

# Rázová odolnost těles vytvořených metodou FDM 3D tisku

Michal Kocák

---

Bakalářská práce  
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Michal Kocák**  
Osobní číslo: **T18438**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Rázová odolnost těles vytvořených metodou FDM 3D tisku**

### Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární rešerže
2. Výroba zkušebních těles technologií FDM
3. Provedení rázové zkoušky
4. Závěr a zhodnocení řešené problematiky

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

**Seznam doporučené literatury:**

GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HOTTER. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Cincinnati: Hanser Publications, [2016]. ISBN 9781569905821.

GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Second edition. London: Springer, [2015]. ISBN 9781493921126.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Strnad**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **5. ledna 2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2021**

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

L.S.

**prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

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

### **Prohlašuji,**

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

Ve Zlíně, dne: 18. 5. 2021

Jméno a příjmení studenta: Michal Kocák

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce je zaměřena na technologii aditivní výroby, konkrétně na možné vytváření vnitřních tvarových dutin pomocí technologie FDM 3D tisku. Pro práci byl zvolen jeden druh materiálu, tak aby byly otestovány jeho fyzikálně mechanické vlastnosti, ale především vlastnosti vnitřních struktur, zejména schopnost odolávat vnikání cizích těles. Hlavním kritériem pro tvorbu vnitřních dutin je vytvořit dutiny s různými tvary, tak aby všechna zkušební tělesa měla jednotný objem, ale zároveň nižší hmotnost než plný materiál. Zkušební tělesa jsou testována pomocí rázové zkoušky pádem, která simuluje jedno z možných využití těchto struktur v oblasti balistiky.

Klíčová slova: FDM, 3D tisk, struktura, model, pádová zkouška, objem, dutina, tvar

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis is focused on technology of additive production, especially on the possible creation of internal shaped cavities using FDM 3D printing technology. One type of material was chosen for thesis, so that its physical and mechanical properties were tested, but above all the properties of internal structures, especially the ability to resist the penetration of foreign bodies. The main criterion for the formation of internal cavities is to create cavities with different shapes, so that all test specimens have a uniform cubic capacity, but at the same time lower weight than solid material. The test specimens are tested using a falling weight impact test, which simulates one of the possible uses of these structures in the field of ballistics.

Keywords: FDM, 3D printing, structure, model, falling weight impact test, volume, cavity, shape

Rád bych poděkovat svému vedoucímu, Ing. Janu Strnadovi za odborné vedení, jeho čas, trpělivost, a především cenné rady, které mi po celou dobu zpracování bakalářské práce ochotně předával. V neposlední řadě bych touto cestou rád poděkoval rodině za podporu ve studiu.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 3D TISK</b> .....	<b>11</b>
1.1 HISTORIE.....	11
1.2 VYUŽITÍ 3D TISKU.....	11
1.2.1 Rapid prototyping.....	12
1.2.2 Zdravotnictví.....	12
1.3 VÝHODY A NEVÝHODY 3D TISKU.....	13
1.4 TECHNOLOGIE 3D TISKU.....	14
1.4.1 DoP Technologie.....	14
1.4.2 SLS technologie.....	15
1.4.3 DMLS technologie.....	15
1.4.4 SLM technologie.....	16
1.4.5 SLA technologie.....	17
1.4.6 DLP technologie.....	17
<b>2 TECHNOLOGIE FDM</b> .....	<b>18</b>
2.1 PRINCIP FDM TECHNOLOGIE.....	18
2.2 PROSTOROVÁ ORIENTACE FDM 3D TISKÁREN.....	20
2.2.1 Kartézský souřadnicový systém.....	20
2.2.2 Polární souřadnicový systém.....	20
2.2.3 Souřadnicový systém delta.....	21
2.2.4 Speciální systém.....	21
2.3 MATERIÁL PRO FDM TECHNOLOGII.....	22
2.3.1 PLA (polylactic acid).....	22
2.3.2 PETG (polyethylene terephthalate glycol).....	23
2.3.3 PVA (Polyvinyl alcohol).....	23
2.3.4 ABS (Akrylonitril Butadien Styren).....	23
2.3.5 ASA (Acrylonitril styren acrylat).....	24
2.4 SPECIÁLNÍ MATERIÁLY PRO FDM 3D TISK.....	25
2.4.1 Laybrick sandstone filaments.....	25
2.4.2 NonOilen.....	25
2.4.3 Laywoo-D3.....	26
<b>3 RÁZOVÉ ZKOUŠKY</b> .....	<b>27</b>
3.1 ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI CHARPYHO KLADIVO.....	27
3.2 IZOD METODA.....	28
3.3 RÁZOVÁ ZKOUŠKA PÁDEM.....	28
3.3.1 Konstrukce pádových strojů.....	29
3.3.2 Poškození způsobené pádovou zkouškou.....	30

<b>4</b>	<b>STRUKTURY MATERIÁLU .....</b>	<b>31</b>
4.1	VYUŽITÍ STRUKTUR .....	31
4.2	TUBULANOVÁ STRUKTURA .....	31
4.3	HONEYCOMB .....	32
<b>5</b>	<b>SHRnutí TEORETICKÉ ČÁSTI.....</b>	<b>33</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>STANOVENÍ CÍLU BAKALÁŘSKÉ PRÁCE .....</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>POPIS ZKUŠEBNÍHO TĚLESA.....</b>	<b>36</b>
7.1	TVORBA VNITRNÍCH STRUKTUR.....	37
7.2	NASTAVENÍ PARAMETRŮ TISKU V SOFTWARE Z-SUITE .....	38
7.3	STROJ .....	40
7.3.1	Aspekty ovlivňující přesnost tisku .....	41
7.4	POUŽITÝ MATERIÁL .....	43
7.4.1	ASA.....	43
<b>8</b>	<b>PÁDOVÁ ZKOUŠKA.....</b>	<b>44</b>
8.1	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A PŘÍSTROJE .....	44
8.2	POSTUP ZKOUŠKY .....	46
<b>9</b>	<b>VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>47</b>
9.1	KRUH .....	47
9.2	TROJÚHELNÍK.....	48
9.3	PLÁSTVE.....	49
9.4	KOULE.....	50
9.5	KUŽEL .....	51
9.6	PLNÝ MATERIÁL .....	52
<b>10</b>	<b>DISKUZE .....</b>	<b>54</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>66</b>



## ÚVOD

Oblast 3D tisku zaznamenala v posledních letech obrovský rozvoj a začala se rozšiřovat do mnoha odvětví, jako je strojírenství, architektura, zdravotnictví, ale také se čím dál více objevuje v domácích dílnách kutilů a nadšenců. Se zvyšujícím se zájmem roste jeho dostupnost, a především cenová přijatelnost. Jedním z dalších důvodů je také využití nových druhů materiálů s různými mechanickými a chemickými vlastnostmi. Tyto materiály by společně s tvarovou strukturou mohly vytvářet tělesa, které by pojila ty nejlepší vlastnosti, jako je nízká hmotnost, houževnatost, vysoká rázová odolnost, a především rychlá výroba a cenová dostupnost.

Cílem bakalářská práce je vytvořit pomocí technologie FDM (fused deposition modeling) takové těleso, které by mělo nejlepší rázovou odolnost. Samotnou podstatou je vymodelovat a následně vytisknout zkušební tělesa. Hlavním předpokladem pro tvorbu těchto těles je jejich vnitřní tvarová rozlišnost. Všechna tělesa však musí mít jednotný objem a musí být lehčí než plný materiál. Kritériem pro testování zkušebních vzorků je tzv. pádová zkouška. Tato metoda je začleňována mezi rázové zkoušky, kdy síla působí na těleso dynamicky. Což znamená, že veškerá energie je koncentrována do jednoho okamžiku, z čehož lze zjistit, jak bude těleso reagovat na náhlé namáhání. Vyhodnocení výsledků je především hodnota síly potřebné k proražení zkušební vzorku, ale také porovnání výsledků s výsledky plného materiálu a velikost viditelného poškození vzorku.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 3D TISK

3D tisk, nazývaný také aditivní výroba (AM) „Additive Manufacturing“, označuje širokou škálu technologií, které produkují trojrozměrné objekty pomocí softwaru Computer Aided Design (CAD) nebo 3D skenerů. Ostatní výrobní procesy vyžadují podrobnou analýzu geometrie dílu, postup, v jakém pořadí se budou jednotlivé prvky obrábět, a jaké nástroje a procesy je třeba použít k dokončení dílu. Naproti tomu AM potřebuje pouze fyzický model vytvořený technologií CAD. Který je následně převeden do formátu STL. Tento soubor převádí vymodelovaný objekt na tenké plátky a vede materiál do tiskové hlavy, která nanáší jednotlivé vrstvy materiálu. Každá jednotlivá vrstva je tenkým průřezem součásti odvozeným z původních dat v softwaru CAD. [1,5,6]

### 1.1 Historie

Technologie 3D tisku poprvé spatřila světlo světa koncem osmdesátých let a byla nazývána technologií Rapid Prototyping (RP). Jedná se o proces, původně koncipován jako velmi rychlá a nákladově přijatelná metoda pro vytváření prototypů a pro vývoj průmyslových produktů, které nesloužily pro sériovou výrobu. První patentovou přihláškou pro technologii Rapid Prototyping podal v květnu 1980 dr. Kodama v Japonsku. Protože však nedodal úplnou patentovou specifikaci, byla jeho žádost zamítnuta. [2,6]

Jako počátek 3D tisku lze tedy datovat až rok 1986, kdy byl vydán první patent pro stereolitografický přístroj (SLA). Ten patřil Charlesi Hullovi, kterého tedy můžeme označit za zakladatele 3D tisku. Navrhl, nový způsob použití UV technologie: umístování tisíců tenkých vrstev plastu na sebe pomocí UV technologie, tzv. vytvoření fotocitlivé pryskyřice polymeru UV zářením. Roku 1987 založil společnost 3D systém corporation a zahájil provoz prvního zařízení SLA-1. [6]

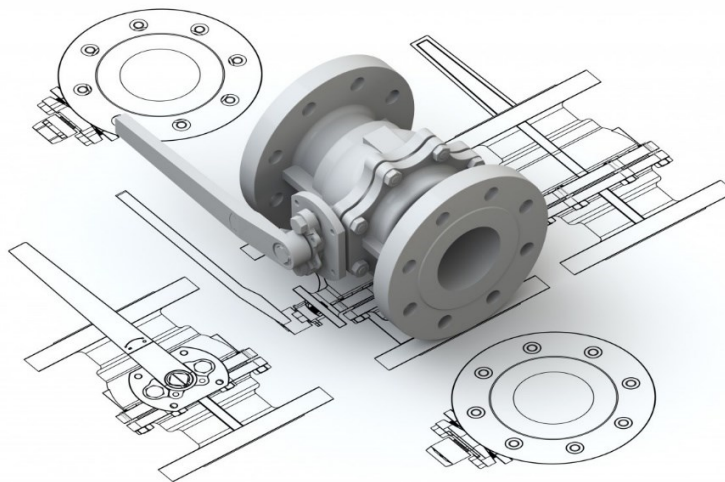
### 1.2 Využití 3D tisku

3D tisk se začleňuje mezi metody rychlé a levné výroby bez nutnosti drahých forem nebo nástrojů. K většímu využití těchto technologií dochází díky použití nových druhů materiálu s různými mechanickými a chemickými vlastnostmi, které zlepšují vlastnosti tištěného výrobku. [1,6]

V současné době je tak 3D tisk využíván především pro maloobjemovou výrobu, kde je primárním cílem rychlá a nízkonákladová výroba malého množství hotových výrobků. Technologie 3D tisku je také využívána v různých oborech jako je strojírenství, architektura, zdravotnictví. [1,6]

### 1.2.1 Rapid prototyping

Rapid prototyping, česky prototypování lze popsat, jako revoluci ve vývoji, navrhování a výrobě produktů. Jelikož dosavadní technologie prototypování jsou zdoluhavé a vysoce nákladné, a často brání vývoji a zavádění nových produktů složitějších tvarů a rozměrů. Tato technologie slouží především pro inovaci a rychlejší navrhování fyzických modelů, za pomoci 3D CAD softwaru. Společně s těmito softwary dochází k využívání technologie Aditivní výroby. Díky 3D tisku lze zavádět a testovat nové nástroje a součásti složitějších tvarů, vytvořené za kratší časovou dobu. Obecně platí, že čím je součást tvarově složitější, tím je nákladnější na výrobu. 3D tiskárny tyto tvarové složitosti a detaily ignorují, pouze registrují množství materiálu, které je třeba spotřebovat pro vytvoření daného výrobku. [5]



Obr. 1.: Rapid prototyping [12]

### 1.2.2 Zdravotnictví

Další možnou oblastí využití 3D tisku je zdravotnictví. Výzkum 3D tisku se v lékařství za posledních 20. let rychle rozvinul a nabízí stále nové možnosti. Je uplatňován v různých lékařských oborech. Především v oblasti chirurgie a ortopedie. Společně s 3D technologií jako jsou scannery lze lépe přistupovat individuálně ke každému pacientovi. [6]

Z těchto scanovaných dat lze pomocí Digital Imaging and Communications in Medicine vytvořit počítačový model ze kterého lze jednoduše pomocí 3D tiskárny vytisknout dokonale padnoucí implantát. Jedním z dalších důvodů tohoto rozvoje je využívání tisku z různých druhů materiálů, jako jsou například slitiny titánu. Výhodou vůči konvenčním metodám je, že při tisku nevzniká odpad a je tak šetrnější vůči životnímu prostředí. Proto právě 3D tisku je jednou z možných alternativ pro snižování nákladů na výrobu zdravotnických pomůcek, implantátů a protéz. Zejména díky využití vhodných materiálů, přesnosti a rychlosti tisku. [6]



Obr. 2.: Využití 3D tisku v medicíně [7]

### 1.3 Výhody a nevýhody 3D tisku

#### Výhody:

- Větší flexibilita s možností výroby tvarově složitých součástí a geometrií.
- Rychlá příprava a vytvoření modelu.
- Výrobní a pořizovací cena.
- Možnost dalšího zpracování nebo povrchových úprav (broušení, obrábění, leštění).

#### Nevýhody:

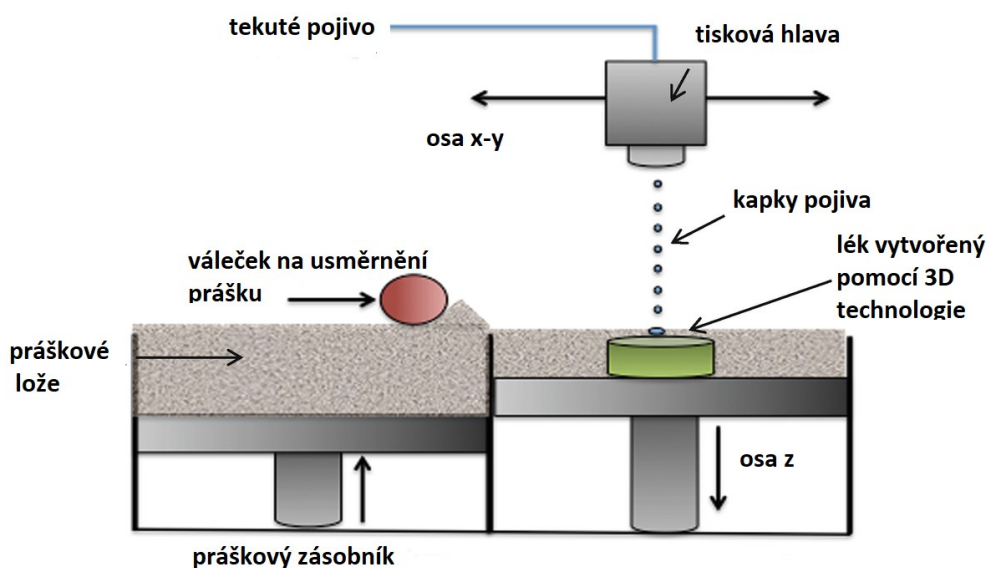
- Většina konvenčních metod dosahuje větší přesnosti.
- Zatím není vhodný pro využití v sériové výrobě.

## 1.4 Technologie 3D tisku

Existuje mnoho způsobů, dle kterých lze rozdělovat technologie AM. Jednou z variant je rozdělení dle typu technologií, např. lasery, technologie tiskáren, technologie vytlačování atd. Další variantou je klasifikace dle typu vstupní suroviny, jako kapalný polymer, práškové částice, roztavený materiál, laminované listy. Problém nastává tehdy, když některé metody využívají stejnou technologii, nelze tak jednoznačně určit o jakou metodu se jedná. Proto se nejčastěji používá právě kombinace těchto dvou rozdělení, jak technologií, tak typem vstupní suroviny. [5]

### 1.4.1 DoP Technologie

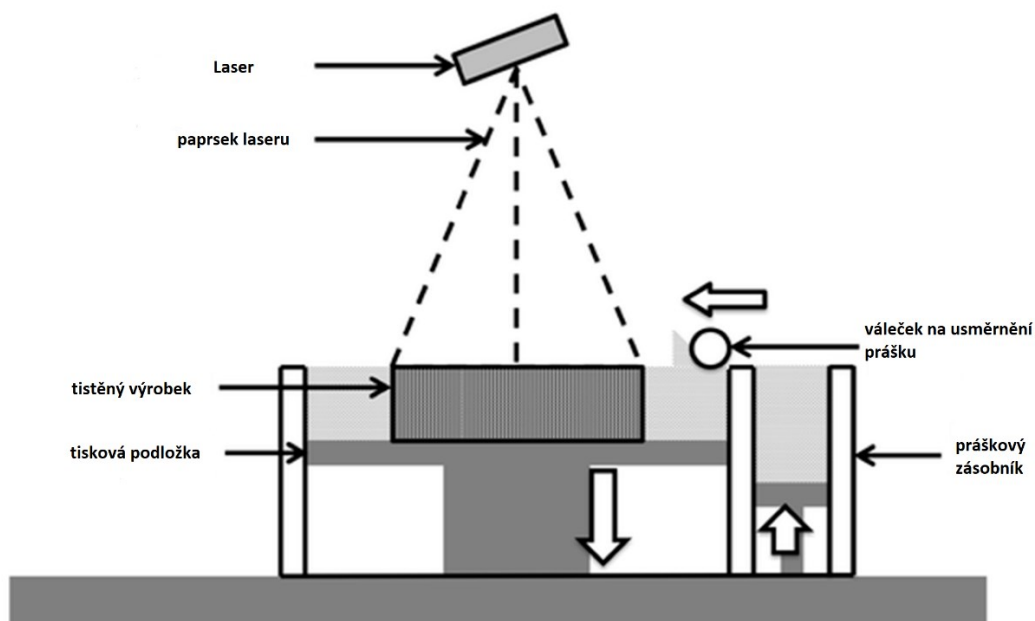
Jedná se o technologie 3D tisku na bázi tryskání pojiva „drop-on-powder“, jinak známá také jako PB (Powder-based). Tato technologie byla vyvinuta na Massachusetts Institute of Technology (MIT) v 80. letech a je považována za první technologickou adaptaci 3D tisku pro farmaceutické požadavky. Tato technologie využívá tryskovou hlavu, která dodává kapalný roztok pojiva na zploštělou práškovou vrstvu. Poté jsou částice prášku spojeny dohromady organickými nebo anorganickými pojivy. V tomto případě jsou výsledné 3D objekty vytvořeny postupným skládáním aglomerovaných vrstev. Díky výhodám, jako snadná adaptace a fixace lze tuto technologii využít především ve farmaceutickém průmyslu na výrobu tabletových léčiv. [10]



Obr. 3.: Schéma DoP technologie [40]

### 1.4.2 SLS technologie

Selektivní laserové slinování (SLS) „Selective laser sintering“ je průmyslová technologie 3D tisku, která využívá práškové lože k vytvoření 3D objektu, podobně jako u DoP. Místo použití rozprašovacího roztoku však SLS používá ke spojení práškových částic laser. Během tisku je laser usměřován tak, aby vykresloval určitý vzor na povrch práškového lože. Po dokončení první vrstvy je rozdělena a nanese nová vrstva prášku na předchozí vrstvu. Objekt je tištěn vrstvu po vrstvě, kdy každá jednotlivá vrstva je získána zpod práškového lože, nebo z práškového zásobníku, odkud je dopravována pomocí válečku, jako na obrázku Obr. 4. Kvůli použití laseru dochází u této technologie k výraznému smrštění. Mezi největší výhody ve srovnání s DoP technologií patří skutečnost, že se jedná o bezrozpouštědlový proces, proto není třeba čekat na odpaření rozpouštědla. [6,8,9]



Obr. 4.: Schéma SLS technologie [39]

### 1.4.3 DMLS technologie

DMLS „Direct Metal Laser Sintering“ je technologie 3D tisku založena na principu tisku kovových modelů, které lze dále zpracovávat a obrábět. Má podobným principu jako technologie SLS. Hlavním rozdílem mezi DMSL a SLS technologií je používaný materiál. Kovový prášek je pomocí laseru slinován dohromady v jednotlivých vrstvách, dokud nedojde ke zhotovení celého výrobku. Je zde využívána také ochranná atmosféra plynu Argon. [4,6]

Hlavním zdrojem energie je již zmiňovaný laser, který však musí vyvinout mnohem větší energii (teplotu), protože se jedná právě o kovový prášek. Nejpoužívanější materiály jsou nerezová ocel, titan, bronz, nebo inconel. Díky použití těchto materiálů má vysokou žáruvzdornost a je tak využíván v letectví. [4,6]



Obr. 5.: Součást vytvořená technologií DMLS [32]

#### 1.4.4 SLM technologie

SLM „Selective laser melting“ česky známé jako selektivní laserové tavení je typ aditivního výrobního procesu, který začíná umístěním vrstvy prášku na pevný podklad. Laserový paprsek prochází povrchem práškové vrstvy podél předem definovaného profilu. Intenzivní teplo generované laserovým paprskem způsobuje roztavení práškových částic a vytvoření taveniny, která tuhne jako kondenzovaná vrstva materiálu. Tento mechanismus funguje přes celou vrstvu podle potřeby a opakuje se pro každou další vrstvu, dokud nedojde k vytvoření požadovaného produktu. [13]

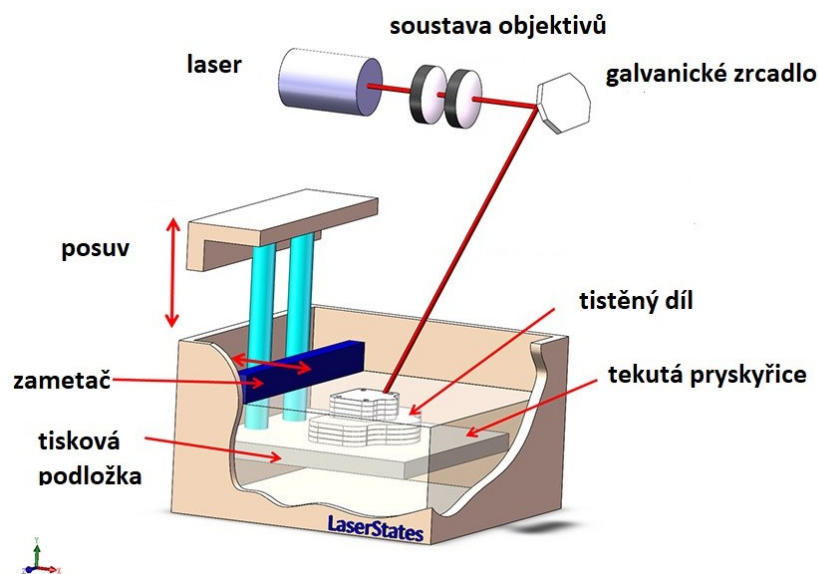
SLM má širokou škálu potenciálu aplikace v leteckém a kosmickém průmyslu, nástrojářství, automobilovém a prototypovém průmyslu. SLM se také používá při výrobě ortopedických a zubních bioimplantátů, kde jsou porézní titanové struktury.[13]



### 1.4.5 SLA technologie

SLA „Stereolithography“ je založena na řízeném tunutí pryskyřice fotopolymerací. Zdrojem energie je UV-laser. Podle konstrukce tiskárny jsou možné dvě varianty. Jednou z možností je, že laser působí na pracovní plochu zespod, skrze nádobu s fotopolymerem, dochází k prozáření povrchu pryskyřice a první vrstva je zpevněna do definované hloubky na pracovní plošině. Pracovní plocha se tak pohybuje směrem vzhůru, přičemž doslova vytahuje zhotovovaný model ven z nádoby. Druhá z možností má stejný princip s tím rozdílem, že laser působí na pracovní plochu shora a tisková podložka se pohybuje směrem dolů, stejně jako na Obr. 6. [4,6,39]

SLA metoda nabízí několik výhod ve srovnání s jinými metodami 3D tisku, především vysokou možnost povrchové úpravy a krátkou dobu tisku. Tato metoda se využívá například v medicíně nebo průmyslovém odvětví. [6]



Obr. 6.: Princip technologie SLA [29]

### 1.4.6 DLP technologie

DLP Metoda „Digital Light Processing“ pracuje na principu digitálního zpracování světla. Energie, která vzniká pomocí UV záření, ztvrdzuje vrstvy tekuté fotocitlivé pryskyřice naplněné keramickým práškem do požadovaného tvaru, po kterém následuje odstranění pojiva z organických složek a slinování. Jediným rozdílem mezi metodou DLP a SLA je princip tunutí, když se v SLA kapalina stane pevnou látkou pomocí UV-laserového skenování, zatímco v přístupu DLP je celá oblast postupně vytvrzována. [4, 11]

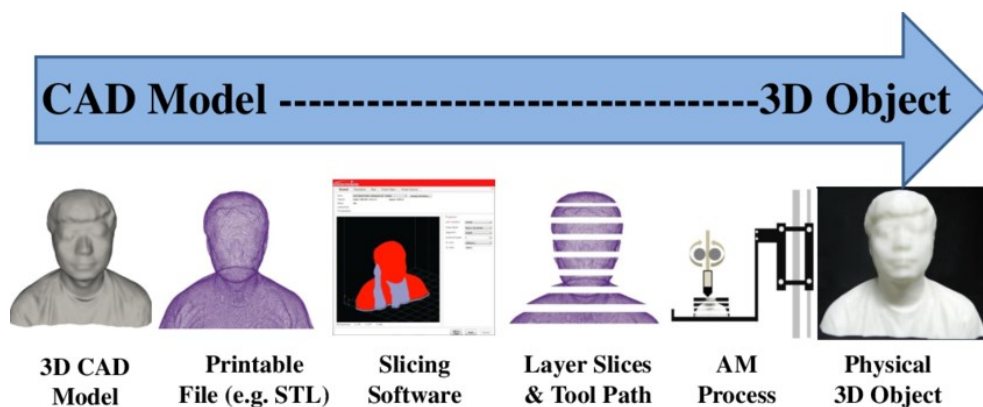
## 2 TECHNOLOGIE FDM

Fused deposition modeling (FDM) je jednou z nejpoužívanějších technologií aditivní výroby v současnosti. Tato technologie je běžně používána pro modelování, prototypování a produkční aplikace. Za autora FDM technologie je označován Scott Crump, který je také zakladatel značky Stratsys. Mezi největší přednosti FDM technologie ve srovnání s ostatními AM metodami je především pestrost materiálů, jejich využití, jednoduchý provoz a uživatelsky přijatelná dostupnost. Díly vytvořené touto technologií mají nejvyšší pevnost ze všech procesů aditivní výroby na bázi polymeru. Nevýhodou ve srovnání s ostatními technologiemi je menší přesnost tisku. [4,5,6]

Ve spojení s FDM technologií se také uvádí pojem FFF technologie „fused filament fabrication“, ta pracuje na stejném principu, takže mezi podstatou těchto technologií není žádný rozdíl. Jedná se pouze o právní spory, kdy FDM je známkou společnosti Stratsys. To znamená, že pouze produkty značky Stratsys mohou nést název technologie FDM. Všichni ostatní výrobci jiných značek jsou spojováni s názvem FFF. [1]

### 2.1 Princip FDM technologie

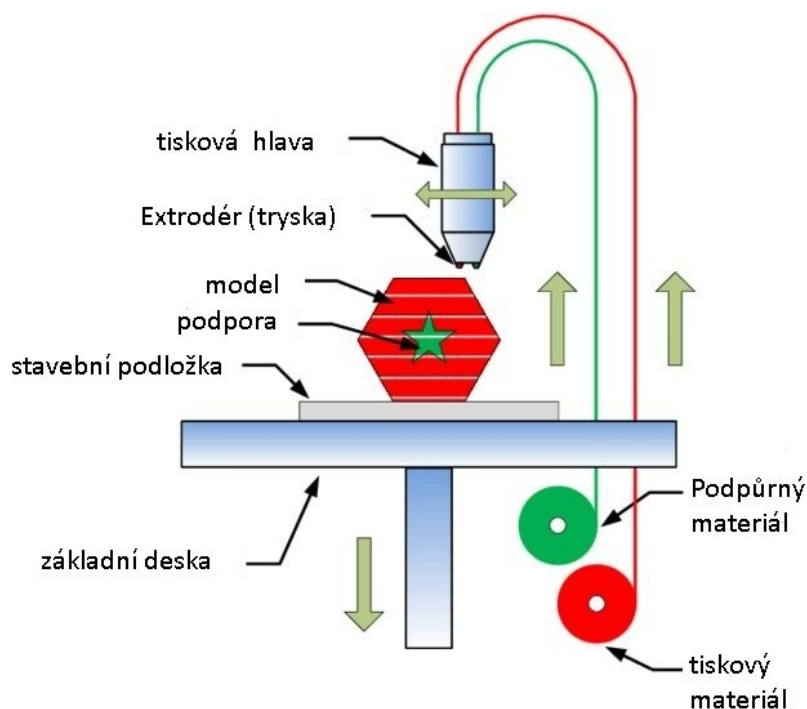
Proces FDM 3D tisku začíná vytvořením digitálního modelu v programu CAD (Computer-Aided Design). Tento model je uložen jako formát STL. Stereolitografie (STL) je nativní formát programu CAD, kdy je model popisován v nestrukturalizovaném tvaru pouze geometricky v trojrozměrné kartézské soustavě. Celá tato geometrie je převedena do G-codu, jedná se o soubor instrukcí, které dopodrobna popisují směr jízdy tiskové hlavy. Tento soubor je potom přenesen do programu tiskárny, kde je sestaven fyzický objekt a také podrobné nastavení tisku, teplota trysky, rychlost tisku, teplota vyhřívané podložky. [1,5,6]



Obr. 7.: Proces FDM 3D tisku [14]

Po nastavení všech parametrů, dochází k samotnému procesu tisku, materiál používaný u 3D tiskáren má formu polymerního vlákna navinutého na cívce, která usnadňuje vedení a skladování materiálu. Vlákno je vloženo do extruderu, který se skládá ze dvou částí: první slouží k vedení vlákna do topného tělesa, a druhá k ohřevu vlákna na jeho bod tání. Část, která táhne vlákno a přivádí jej do topného tělesa, se nazývá studený konec, zatímco část ohřívající vlákno se nazývá horký konec. Ve většině případů extruder obsahuje obě části v jedné jednotce, ale není to neobvyklé vidět je jako dvě samostatné části. Někdy výrobci označují obě části jako extruder. [1,6]

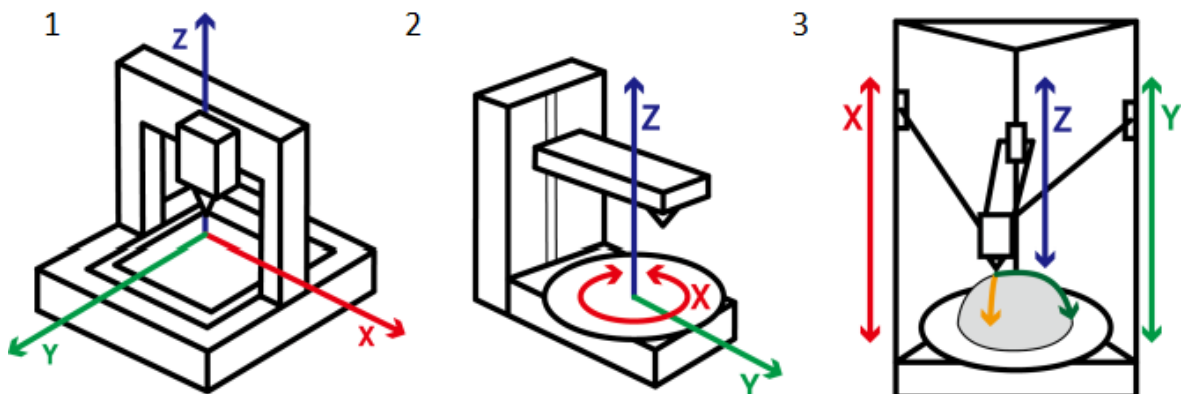
Z extruderu (trysky) je materiál v plastickém stavu vytlačován v jednotlivých vrstvách a pokládán na tiskovou podložku, dokud nedojde k vytištění celého objektu. Dle složitosti součásti se také volí postup tisku, u složitých součástí je potřeba použít tzv. podpurné materiály. Podpory mohou být tvořeny stejným materiálem, nebo pokud je tiskárna opatřena dvěma tryskami je možno využít jiný podpurný materiál, jak je vidět na Obr. 8. Všechny tyto parametry jsou dány konstrukcí a možnostmi 3D tiskárny. [1,5,6]



Obr. 8.: Popis FDM 3D tiskárny [15]

## 2.2 Prostorová orientace FDM 3D tiskáren

FDM 3D tiskárny se dále rozdělují podle prostorové orientace tiskárny. Jedná se o souřadnicový systém, který udává polohu tiskové hlavy vůči tiskové desce. Na trhu se dosud objevují 4 základní druhy souřadnicových systémů: Kartézský, Polární, Delta a také jeden speciální tzv. robotické rameno. [16]



Obr. 9.: Schéma pohybu souřadných systémů [17]

- a. kartézský souřadný systém (2.2.1), 2. polární souřadnicový systém (2.2.2), 3. souřadný systém delta (2.2.3)

### 2.2.1 Kartézský souřadnicový systém

Kartézský souřadnicový systém je nejběžnější systém používaný u FDM 3D tiskáren na trhu. Na základě kartézského souřadnicového systému v matematice je tato technologie využívána ke stanovení správných pozic a směru tiskové hlavy ve třech osách: X, Y a Z. U tohoto typu tiskárny se tisková základna obvykle pohybuje pouze v ose Z, přičemž tisková hlava pracuje dvourozměrně v rovině X-Y. [16]

### 2.2.2 Polární souřadnicový systém

Orientace tiskáren pracujících na polárních souřadnicích není určeno souřadnicemi X, Y a Z, ale úhlem a délkou. To znamená, že dochází k otáčení desky a zároveň se deska pohybuje, přičemž extruder se pohybuje nahoru a dolů. [16]

Hlavní výhodou těchto tiskáren je, že mají pouze dva motory, zatímco kartézské tiskárny potřebují alespoň tři. Z dlouhodobého hlediska má polární tiskárna vyšší energetickou účinnost a dokáže vyrábět větší objekty při menší spotřebě místa. [16]

### 2.2.3 Souřadnicový systém delta

Souřadnicový systém Delta je čím dál více uváděn na trhu FDM 3D tisku, zejména díky nedávné modifikaci. Modifikace se skládala z šestiosé 3D tiskárny založené na technologii Delta. Tyto stroje pracují s kartézskými souřadnicemi. Ale na rozdíl od klasického kartézského systému se jedná o kulatou tiskovou desku, která je kombinována s extruderem, ten je upevněn ve třech trojúhelníkových bodech viz. Obr. 9. Každý ze tří bodů se poté pohybuje nahoru a dolů, čímž určuje polohu a směr tiskové hlavy. [16]

### 2.2.4 Speciální systém

Mezi speciální systémy patří tzv. robotická ramena, která jsou nejčastěji známá pro montáž komponentů na průmyslových výrobních linkách, zejména ve velkých automobilových závodech. Zatímco 3D tisk začal do svého výrobního procesu začleňovat robotická ramena, což se nejvíce projevuje ve 3D tisku domů a budov, tato technologie stále zůstává ve fázi vývoje. [16]

I když se nejedná o běžně používaný tiskový proces, začíná u této metody tisku docházet k nárůstu využití. Je to proto, že proces není fixován na tiskovou desku, takže je mnohem mobilnější. Navíc díky flexibilitě při umístění hlavy FDM 3D tiskárny je snazší vytvářet složité struktury. Je však třeba poznamenat, že konečná kvalita tisku není tak dobrá jako u běžných kartézských tiskáren. [16]



Obr. 10. Robotické rameno [18]

## 2.3 Materiál pro FDM technologii

Materiály, které se využívají pro FDM 3D tisk jsou stejně rozmanité jako produkty, které jsou vyráběny tímto procesem. 3D tisk je dostatečně flexibilní, aby uživatelům umožnil vytvářet různé tvary, struktury a pevné produkty. Právě díky větší flexibilitě dochází k využívání různých polymerních materiálů s různými mechanickými, fyzikálními či chemickými vlastnostmi. Vlákno je skladováno v podobě polymerní struny, která je navinuta na cívce, a je dostupné v mnoha barevných provedení. [19]

### 2.3.1 PLA (polylactic acid)

Jednou z nejekologičtějších materiálů pro 3D tiskárny je materiál PLA. Jedná se o kyselinu polymléčnou, která pochází z přírodních produktů, jako je cukrová třtina a kukuřičný škrob, a je proto biologicky odbouratelná. Předpokládá se, že plasty vyrobené z tohoto materiálu, budou v příštích letech dominovat průmyslu 3D tisku. [19]

PLA má výraznou odolnost a je to tedy ideální materiál pro širší škálu produktů. Materiál je možno dále zpracovávat běžnými metodami, ovšem u strojním obrábění nastává problém, kdy díky zahřívání dochází ke změkčení plastu teplem, toto je způsobeno nízkou teplotou skelného přechodu a není tak schopen odolávat vyšším teplotám. Tento problém však lze odstranit použitím chlazení. [19,20]

- Teplota extrudéru: 190–220 °C
- Teplota tiskové podložky: 50–70 °C



Obr. 11.: Výrobek a cívka materiálu PLA [24]

### 2.3.2 PETG (polyethylene terephthalate glycol)

PETG je glykolem upravený polyethyltereftalát (PET), který je nejběžnějším materiálem používaným k výrobě lahví na vodu. Je to polotuhý materiál s dobrou nárazovou odolností, s měkčím povrchem, díky kterému je náchylný na opotřebení. Glykol upravuje vlastnosti PET, usnadňuje tisk a méně křehne. Při tisku nedochází téměř k žádným deformacím, takže je vhodný pro tisk velkých objektů. Jeho využití je univerzální, ale je především vhodný pro mechanické součásti s vnitřním i venkovním použitím. [23,25]

- Teplota extrudéru: 230–250 °C
- Teplota tiskové podložky: 75–90 °C

### 2.3.3 PVA (Polyvinyl alcohol)

PVA nebo také Polyvinylalkohol je bezbarvý syntetický polymer bez zápachu s významnými vlastnostmi biokompatibility. Je také málo toxický, takže ho lze použít ve zdravotnických výrobcích, jako je roztok kontaktních čoček, a přiměřeně biologicky odbouratelný. V oblasti 3D tisku je využíván jako podpůrný materiál. Je využíván především u 3D tiskáren s dvěma tryskami. Největší výhodou PVA vlákn je především rozpustnost ve vodě, takže podpůrné struktury vytvořené z tohoto materiálem lze jednoduše odstranit, stačí jej na pár hodin ponořit do vody. [20]

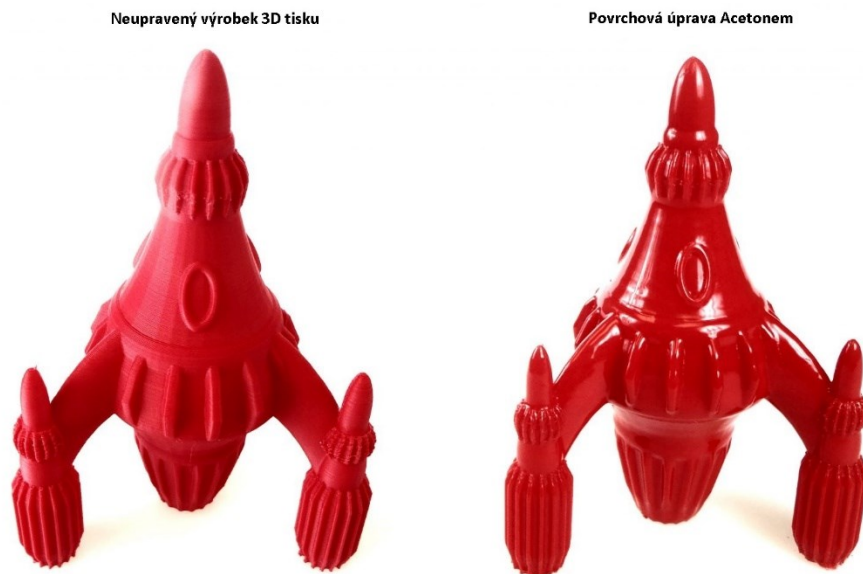
- Teplota extrudéru: 180–200 °C
- Teplota tiskové podložky: 45–60 °C

### 2.3.4 ABS (Akrylonitril Butadien Styren)

Nejuniverzálnějším materiálem pro 3D tisk je rozhodně ABS. Je to nárazuvzdorný termoplastický amorfnní kopolymer. Který se skládá ze tří monomerů: akrylonitril, butadien a styren. Jedná se o ideální materiál pro různé konstrukční aplikace, díky jeho fyzikálním a mechanickým vlastnostem, zejména kvůli vysoké tuhosti, odolnosti proti nárazu, dobré izolaci a vysoké odolnosti proti otěru. Je možné ho zpracovávat až do teploty 280 °C, poté dochází k degradaci a chemickému rozkladu. Má také dobré chemické vlastnosti, je odolný vůči kyselinám, louhům, uhlovodíkům, olejům. [20,21]

U materiálu ABS je také možnost mnoha povrchových úprav. Při kontaktu s acetonovým rozpouštědlem dochází k naleptávání materiálu, díky kterému lze povrch součásti vyhlazovat a leštit jako na Obr. 12. [20,21]

- Teplota extrudéru: 220–250 °C
- Teplota tiskové podložky: 95–110 °C



Obr. 12.: Výrobek z materiálu ABS [22]

### 2.3.5 ASA (Acrylonitril styren acrylat)

ASA je amorfní termoplastický kopolymerní materiál podobný ABS. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma materiály je především strukturální složení, ASA používá akrylový elastomer a ABS elastomer butadienu. Byla původně vyvinuta jako alternativa, k již zmiňovanému ABS, tak aby byla odolnější vůči UV záření. ASA je známá kvůli svým dobrým mechanickým vlastnostem jako je, vysoká odolnost proti nárazu a vyšší teplotní odolnosti. Obvykle se využívá pro venkovních aplikacích místo ABS kvůli jeho vynikající odolnosti proti UV záření a povětrnostním podmínkám. Při tisku je třeba dbát zvýšené opatrnosti kvůli potenciálně nebezpečným výparům, které jsou v materiálu obsaženy díky přítomnosti styrenu. [23,24]

- Teplota extrudéru: 220–245 °C
- Teplota tiskové podložky: 90–110 °C



## 2.4 Speciální materiály pro FDM 3D tisk

Jedná se o běžné materiály používané v oblasti FDM 3D tisku, jako je např. PLA, ABS a PETG. Speciální je dělá jejich vylepšení, o přídavné materiály tzv. plniva. Díky kterým získává obyčejný materiál lepší vlastnosti. Může se jednat pouze o designové prvky, lepší vedení el. Proudů, jinou strukturu povrchu, ale také lepší pevnost materiálu. [30]

### 2.4.1 Laybrick sandstone filaments

Stejně jako u většiny kompozitních vláken tak i Laybrick se skládá z několika materiálů. Vyrábí se napuštěním PLA jemnou práškovou pevnou látkou, jako je například velmi jemně mletá křída. A právě díky této příměsi simulují vzhled pískovce, nebo keramiky. Ačkoliv je křída uhličitán vápenatý a nejedná se o pískovec, je praktický a využívaný materiál. Je velmi lehký a robustní s dobrou odolností vůči povětrnostním podmínkám, navíc se lehce zpracovává. Tento materiál slouží výhradně na výrobu doplňků a designové výrobky. [28]



Obr. 13.: Výrobek z materiálu Laybrick [22]

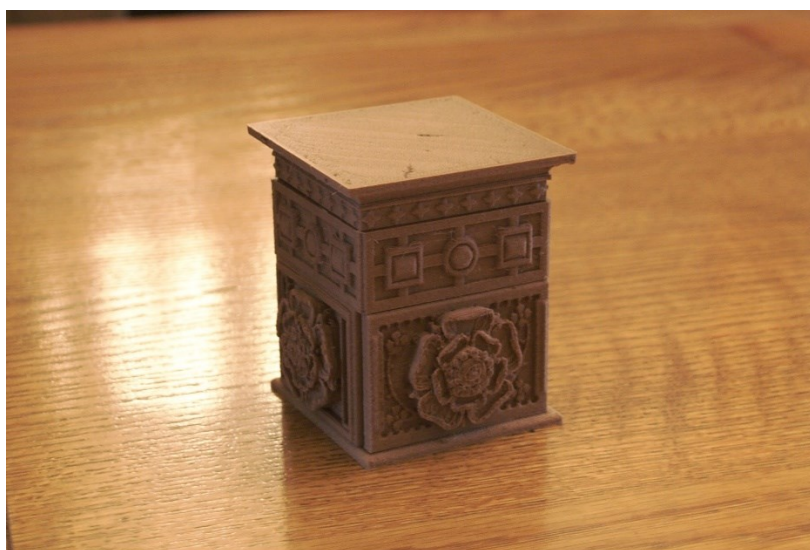
### 2.4.2 NonOilen

NonOilen je revoluční materiál, který vyniká svými vlastnostmi a byl vyvinut s cílem mít co nejmenší dopad na životní prostředí. Jedná se tedy o 100% biologický materiál vyvinutý z polymerů z obnovitelných zdrojů. Surovina tohoto materiálu obsahuje

kyselinu polymléčnou (PLA), polyhydroxybutyrát (PHB) a další složky. Díky tomuto složení je toto vlákno plně biologicky odbouratelné. Je recyklovatelný s malou ztrátou vlastností. To znamená, že zdroj vstupních materiálů lze snížit a samotný materiál lze znovu použít. [24]

### 2.4.3 Laywoo-D3

Jedná se kompozitní dřevo-polymer vyrobený ze 40 % recyklovaných dřevěných částic smíchaných s některými pojivovými polymery. Které podporují povrchovou úpravu a je podobná struktuře dřeva, takže Laywoo-D3 pravděpodobně nejvíce osloví umělce a zákazníky, kteří se hledají nevšední materiály a zajímavé a nestandardní struktury. Výtisky opravdu vypadají a voní jako dřevo a následné zpracování představuje různé možnosti, protože výtisky lze brousit, a malovat jako standardní dřevěné výrobky. Při úpravě teploty vytlačování se také mírně změní barva povrchu dílu. Při nižší teplotě extruze je barva povrchu světlejší, při vyšší teplotě je barva povrchu tmavší. [24,36]



Obr. 14.: Výrobek vytvořený z materiálu Laywoo-D3 [36]

### 3 RÁZOVÉ ZKOUŠKY

Rázové zkoušky udávají, kolik práce nebo energie je potřeba na porušení zkušebního tělesa. Obecně se jedná o namáhání, které není statické, takže síla nepůsobí na těleso konstantně, ale dynamicky. Působící síla je koncentrována do velmi krátké doby, zajímá nás tedy, jak bude zkušební těleso reagovat na náhlé namáhání. Spolu s tím také souvisí, jak se bude těleso deformovat a jak velká energii bude schopno absorbovat. Ve srovnání se statickým namáháním například v ohybu, kde je těleso postupně namáháno a k porušení dojde až při extrémním průhybu, u rázových zkoušek je použito najednou dostatečné množství energie k porušení vzorku. Testuje se tak zejména houževnatost a křehkost. [33]

#### 3.1 Zkouška vrubové houževnatosti Charpyho kladivo

Zkouška vrubové houževnatosti je jednou z nejčastěji využívaných zkoušek k hodnocení relativní houževnatost materiálu rychlým a ekonomickým způsobem. Tato zkouška byla vynalezena v roce 1900 Georges Augustin Albert Charpy. Se měří energie absorbovaná standardním vrubovaným vzorkem pod nárazovým zatížením. Tento test se nadále používá jako ekonomická kontrola kvality a metoda pro stanovení citlivosti vrubů a houževnatosti technických materiálů, jako jsou kovy, kompozity, keramika a polymery. Standardizovaný zkušební vzorek má rozměr 55 mm 10 mm 10 mm a je obroben zářezem napříč jedním z větších rozměrů. [33]

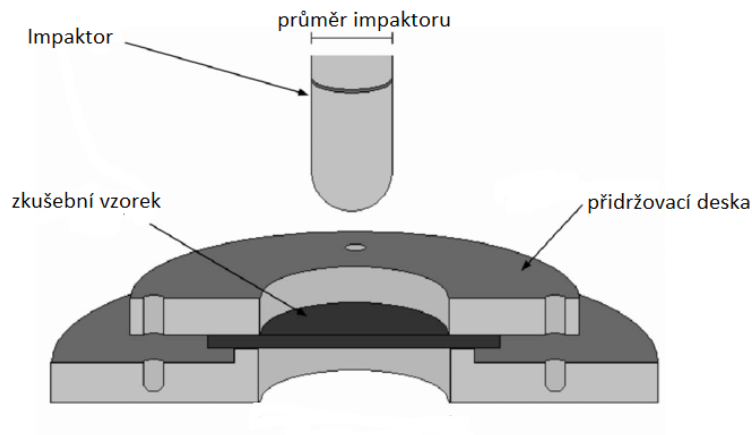
Tato zkouška udává velikost energie, které je zkušební těleso schopno absorbovat při vzniku lomu. Spočívá v zásahu zkušební vzorky kyvadlovým kladivem, které je zavěšeno na ramenu, a vyzvednuto do určité výšky a zajištěno proti pohybu, po následném uvolnění je vzorek přeražen jediným rázem padajícího kladiva. Stanoví se energie absorbovaná vzorkem přesně měřením snížení pohybu kyvadlového ramene. Důležité faktory, které ovlivňují houževnatost materiálu, zahrnují nízké teploty, vysoké rychlosti, deformace a koncentrátoři napětí, jako jsou zářezy, praskliny. [33]

### 3.2 IZOD metoda

Tato zkouška byl pojmenován podle anglického inženýra Edwina Gilberta Izoda. Stejně jako zkouška vrubové houževnatosti je také zkouška Izod nárazová zkouška a používá se ke zkoušení materiálů, rozdíl je pouze v uložení, kdy je na jedné straně vzorek upnut v čelisti a na straně druhé se přeráží. Zkušební vzorek má tvar čtverce, nebo s jedním, dvěma nebo třemi zářezy, které mají rozměr 70 mm 15 mm 3 mm. Nárazová zkouška Izod se skládá z kyvadla, které je umístěno na rameni, na protějším konci je závaží s určenou váhu, po uvolnění ramena padá volně dolů a při tom udeřil do vzorek, který je uchycen ve svislé poloze. Rázová pevnost je určena ztrátou energie kyvadlo určeno přesným měřením ztráty výšky v kyvadle houpačka. Výzkumníci také definovali rázovou pevnost jako tendenci polymerních kompozitů snášet náraz s vysokou energií, bez rozbití nebo zlomení. [33]

### 3.3 Rázová zkouška pádem

Pádovou zkoušku nejlépe popisuje americká norma ASTM D7136 / D7136M-12. Která je obdobná českým normám ČSN EN ISO 6603–1 a ČSN EN ISO 6603–2 Plasty – Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání. Zkouška se provádí na padostroji. Jedná se o přístroj, který demonstruje zákony rovnoměrně zrychleného a rovnoměrného pohybu. Jehož principem je volně padající těleso (impaktor), které se pohybuje pouze ve svislé ose. Impaktor bývá nejčastěji polokulový úderník, tzv. tlouk, který má leštěnou polokulovou plochu, s vysokou odolností, další možností impaktoru je ocelová kulička. Padající impaktor dosahuje optimální rychlosti, která při kontaktu se vzorkem vyvodí energii dopadu a způsobí tak poškození zkušební vzorku. Velikost dopadové energie je ovlivněna několika parametry, jako je hmotnost závaží, počáteční rychlost a počáteční výška tělesa. [34,35]



Obr. 15.: Schéma pádové zkoušky [26]

### 3.3.1 Konstrukce pádových strojů

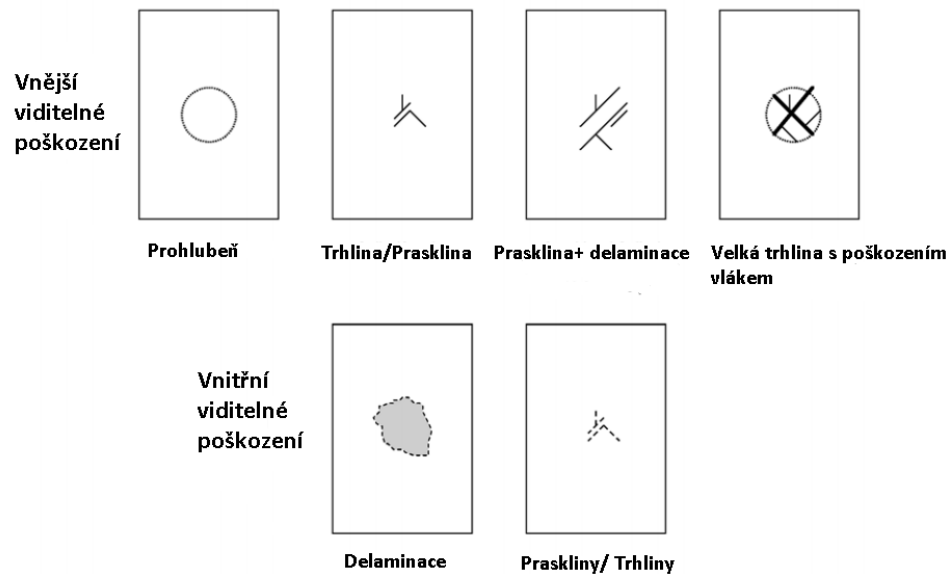
Celá konstrukce pádového stroje je pevně uchycena k základní desce, která slouží jako pevná podstava celého stroje, z rámu pak vedou vodící tyče, které slouží k vedení impaktoru se závažím a zabraňují tak pohybu v jiných osách, tudíž jediný volný pohyb je svisle dolů. Většina moderních padostrojů obsahuje spouštěcí zařízení, které umožňuje jednoduché odjištění závaží. Jedním s užitečných zařízení je také polohovatelný doraz, který zabraňuje opětovnému nárazu na testovaný vzorek. Padostroj může být opatřen o různé pomocné senzory a měřidla, jako je například siloměr a rychloměr. [34,35]



Obr. 16.: Konstrukce pádového stroje [27]

### 3.3.2 Poškození způsobené pádovou zkouškou

Pro stanovení přesných výsledků je třeba test opakovat, tak aby byla dostatečná četnost výsledků. Na základních těchto výsledků pak můžeme stanovit dopadovou energii, a především sílu potřebou k proražení vzorku. Kromě těchto numerických výsledků lze také stanovit viditelnou míru poškození a možné poruchy ve vnitřních strukturách materiálů, které jsou zobrazeny na Obr. 17. [34,35]



Obr. 17.: Běžně pozorované poruchy materiálu při pádové zkoušce [35]

## 4 STRUKTURY MATERIÁLU

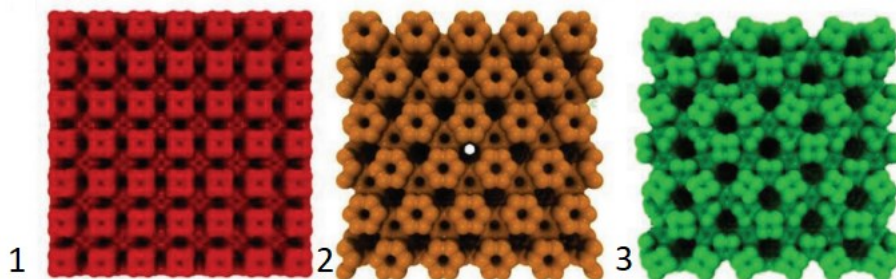
Tvarové struktury se vyskytují všude kolem nás ve všech různých rozměrech od submikrometrické až po námi měřitelnou makrometrickou velikost. Některé biomateriály jako např. kosti, zuby žraloků, mušle, zobáky datlů, zobáky lednáčků, jsou také složeny z různých struktur. U všech těchto geometricky složitých materiálů byla pozorována vysoká odolnost a výjimečné mechanické vlastnosti. [37]

### 4.1 Využití struktur

Napodobování přírodních struktur bylo vždy složité a pro většinu konvenčních metod obrábění takřka nemožné. S přicházejícími moderními technologiemi, jako je vstříkávání a 3D tisk je možné se těmto strukturám aspoň trochu přiblížit. Vytvářet materiály s nízkou hmotností, které by měly zároveň vysokou nosnost a vysokou nárazovou odolnost by hrálo významnou roli v celé řadě oborů, jako je letectví, automobilový průmysl, sportovním odvětví, dokonce i v biomedicině. [37]

### 4.2 Tubulanová struktura

Předlohou tubulanové struktury je 3D porézní alotropní struktura složená ze zesíťované uhlíkové nanotrubic. Na základě výpočtů se odhaduje, že Yongův modul těchto materiálů by měl být řádově podobný diamantu. Konkrétní předpoklad stanovuje, že objemový modul by měl být pouze o 6% nižší než u zmiňovaného diamantu. Tubulany jsou porézní struktury inspirované modely v nanoměřítku, a jsou zvětšeny do makroskopických délek a mají výrazné mechanické vlastnosti. Jsou vytvořeny pomocí 3D tisku z materiálu PLA. Pro experiment byli zvoleny 3 typy, vyobrazené na Obr. 18. [37]



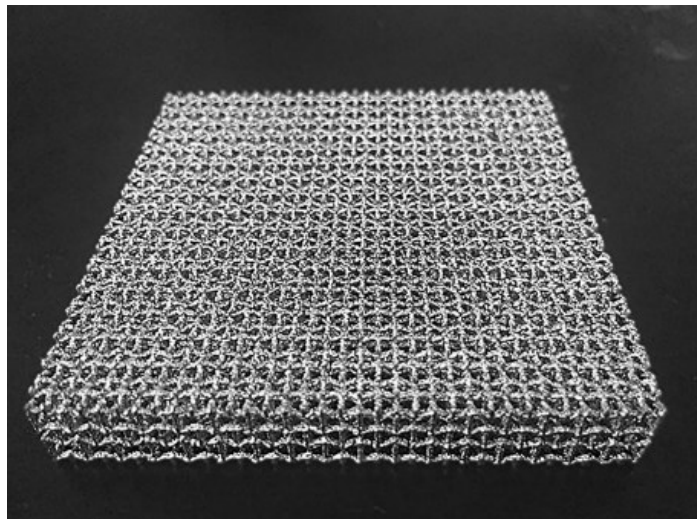
Obr. 18.: Struktura Tubulanu [37]

1. 8 tetra-tubulan, 2. 12 hexa-tubulan, 3. 36 hexa-tubulan

Při zvýšení jednoosého zatížení se začnou jednotlivé vrstvy uzavírat a postupně natlačovat do další vrstvy. Dochází tak k deformaci vrstvy po vrstvě. Po zatlačení všech vrstev dochází k dalšímu zhoustnutí a rozkladu sil a deformaci do stran. Vzniklé trhliny se podobají smykovému zatížení při ohybu, podobně jako u ohýbání trubek. Zkušební tělesa vykazují lepší vlastnosti v porovnání s neporézní kostkou, která se rozpadla na několik malých kousků. [37]

### 4.3 Honeycomb

Honeycomb, českým názvem voština se také řadí mezi tvarové struktury. Tato struktura se nejčastěji používá jako jádro do kompozitních sendvičů. Nově vyvíjené voštinové struktury s negativním poissonovým efektem mají vynikající mechanické vlastnosti, především vlačovací odpor, smykový modul, houževnatost a kapacitu absorpce energie. Při působení nárazového zatížení bude hexagonální voštinová struktura stlačena a materiál bude proudit z nárazové části do okolní oblast ve směru kolmém na nárazové zatížení. Vtlačováním jednotlivých vrstev do okolí dochází ke snížení dopadové energie vstupujícího tělesa a ke snížení jeho rychlosti. [38]



Obr. 19.: Voština vytvořená technologií vstřikování [38]



## 5 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTÍ

Teoretická část obsahuje řadu informací a obecný popis technologií rázového zatížení materiálů. Konkrétně je pak práce zaměřena na rázovou zkoušku pádem. Dále je v teoretické části zmíněno několik typů výroby pomocí 3D tisku a materiály podporující tuto aditivní technologii, která je později využita v praktické části.

První kapitola je zaměřena na 3D tisk jako takový. Je zde zahrnut popis a bližší informace týkající se oblasti 3D tisku, především jeho funkce, principy a stručná historie. Dále také vývoj, využití v současnosti, a především popis jednotlivých technologií 3D tisku.

V druhé kapitole je představena technologie FDM. Obsahuje podrobně popsané jednotlivé kroky od vytvoření modelu až po vytištění samotné součásti. Dále popisuje jednotlivé druhy souřadných systémů, které jsou využívány u těchto typů tiskáren. V neposlední řadě jsou zde popsány materiály, které je možné u tohoto druhu technologie využít.

Obsahem celé třetí kapitoly jsou rázové zkoušky. Je zde popsána zkouška vrubové houževnatosti, IZOD metoda, a především pádová zkouška, která je využita ke zhotovení praktické části. U rázové zkoušky pádem je představen její princip, konstrukce pádových strojů a výpočtové parametry.

Poslední kapitola popisuje význam tvarových struktur a jejich chování při zatížení. Konkrétně se odráží od tubulanové a voštinové struktury, na kterých již byly prováděny obdobné experimenty na jiných univerzitách.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 STANOVENÍ CÍLU BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je zkoumat rázovou odolnost těles vytvořených pomocí technologie FDM 3D tisku. Testovaným vzorkem byla zvolena deska s vnitřními tvarovými strukturami, jako koule, kužely, šestihrany. I přes rozdílnost tvarů, musí mít všechna tělesa jednotný objem a musí být lehčí než plný materiál. Kritériem pro hodnocení rázové odolnosti je pádová zkouška.

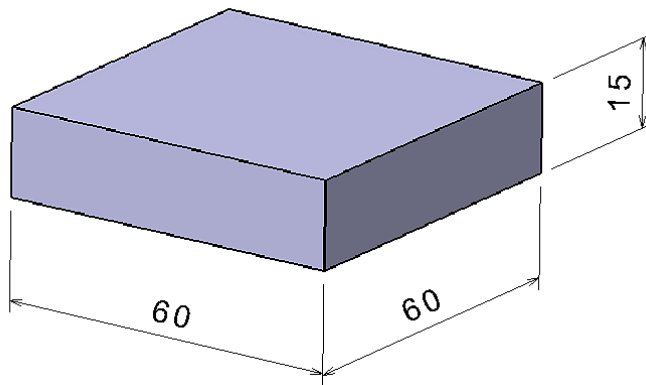
Návrh zkušebních těles byl vytvořen v softwaru Catia V5R19, pro nastavení parametrů tisku byl využit software Z-Suite. K samotnému tisku byla využita tiskárna Zortrax M200 Plus. Pro testování zkušebních vzorků bylo zvoleno zařízení německé firmy Zwick GmbH & Co. KG padostroj HIT 230 F.

Praktická část obsahuje:

- návrh jednotlivých zkušebních vzorků.
- podrobné parametry tisku.
- kritéria pádové zkoušky.
- vyhodnocení výsledků.

## 7 POPIS ZKUŠEBNÍHO TĚLESA

Zkušebním tělesem byla zvolena deska o rozměru (60x60x15) mm. Uvnitř se nachází tvarové struktury různých tvarů obsahující širokou škálu rádiusů a úhlů. Vzhledem k odlišné konstrukci těchto těles lze porovnávat chování při dynamickém zatížení a zkoumat tak mechanickou odolnost jednotlivých struktur.



Obr. 20.: Rozměry zkušebního tělesa

Volba vnitřní stavby je závislá především na tvaru a rozměru struktury a prostorovém rozložení v materiálu. Kromě těchto skutečností hraje velkou roli samotné uspořádání těchto struktur. Pro tuto práci byly zvoleny dva typy uspořádání:

1. Plně průchozí struktura

Zde byl zvolen pouze tvar tělesa, který byl průchozí skrze celý materiál a tvořil tak plně průchozí otvor daného tvaru. V našem případě kruh, trojúhelník, plástev (šestihrany).

2. Neprůchozí tzv. vnitřní dutiny

V tomto případě bylo zvoleno několik těles, konkrétně koule, kužel. Tyto tělesa byla rovnoměrně rozložena po celé vnitřní struktuře, kdy každé jedno těleso tvořilo tzv. vnitřní dutinu.

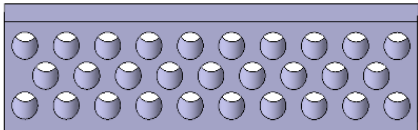
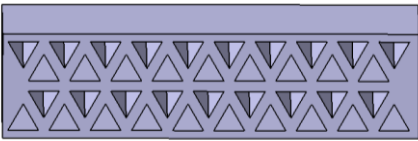
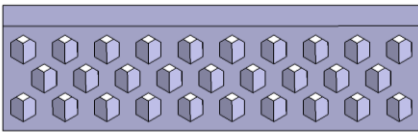
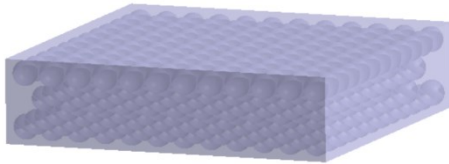


3. Bez struktury

Jedná se o plně objemný materiál bez vnitřní struktury.

## 7.1 Tvorba vnitřních struktur

Při navrhování všech modelů bylo využito softwaru CATIA konkrétně verze CATIA V5R19. Jedná se o multiplatformní software podporující CAD, CAM, vyvinutý francouzskou společností Dassault Systèmes. Je označován za jeden z nejvyvinutějších konstrukčních softwaru dnešní doby. Je hojně využíván v konstrukční praxi, zejména v automobilovém a leteckém průmyslu.

Tab. 1 Rozdělení a náhledy použitých struktur

1. PRŮCHOZÍ STRUKTURA		
KRUH		Objem: 34,78 cm <sup>3</sup>
TROJÚHELNÍK		
PLASTVE		
2. NEPRŮCHOZÍ (VNITŘNÍ DUTINY)		
KOULE		Objem: 34,78 cm <sup>3</sup>
KUŽEL		
3. BEZ STRUKTURY		
PLNÝ MATERIÁL		Objem: 54,00 cm <sup>3</sup>

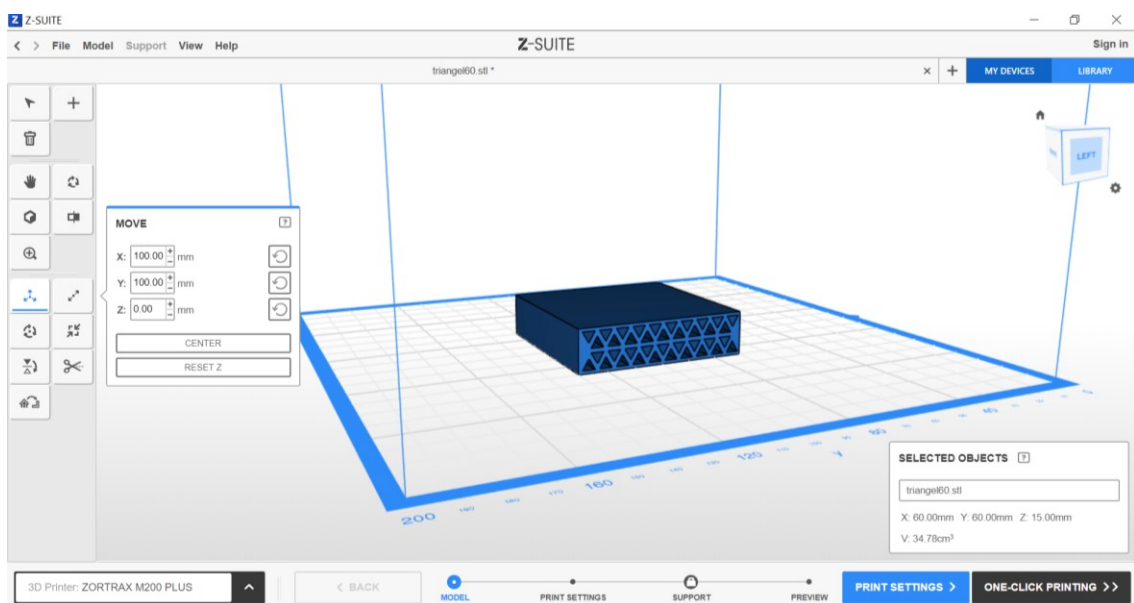
Odlíšný tvar dutin způsobuje specifické chování při zkoušce rázovou hmotností a výraznou mechanickou odolnost jednotlivých konstrukcí. Všechny testované vzorky mají stejný objem materiálu. Vzorky s různými vnitřními strukturami jsou o 35% lehčí než zkušební vzorek bez struktury.

Hlavním předpokladem je že vnitřní struktura vzorků významně přispívá ke snížení možnosti proražení testovaného vzorku, díky uvolnění nárazové energie v různých směrech, které snižují rychlost nebo zcela zastavují nárazové těleso. Proto byly pro porovnání deformace s plně vyplněným materiálem vybrány struktury s různými tvary vnitřních dutin. Z čehož je možné porovnat rozdíl mezi strukturou s velkou škálou úhlů nebo rádiusů.

## 7.2 Nastavení parametrů tisku v softwaru Z-Suite

Nativní formát STL, je následně převeden po programu Z-Suite. Jedná se o program podporující tiskárny Zotrax. V něm lze nastavit veškeré parametry související s tiskem, jako tloušťka jednotlivých vrstev, teplota trysky, teplota tiskové podložky, nebo samotné rozložení tištěných těles v pracovním prostoru tiskárny.

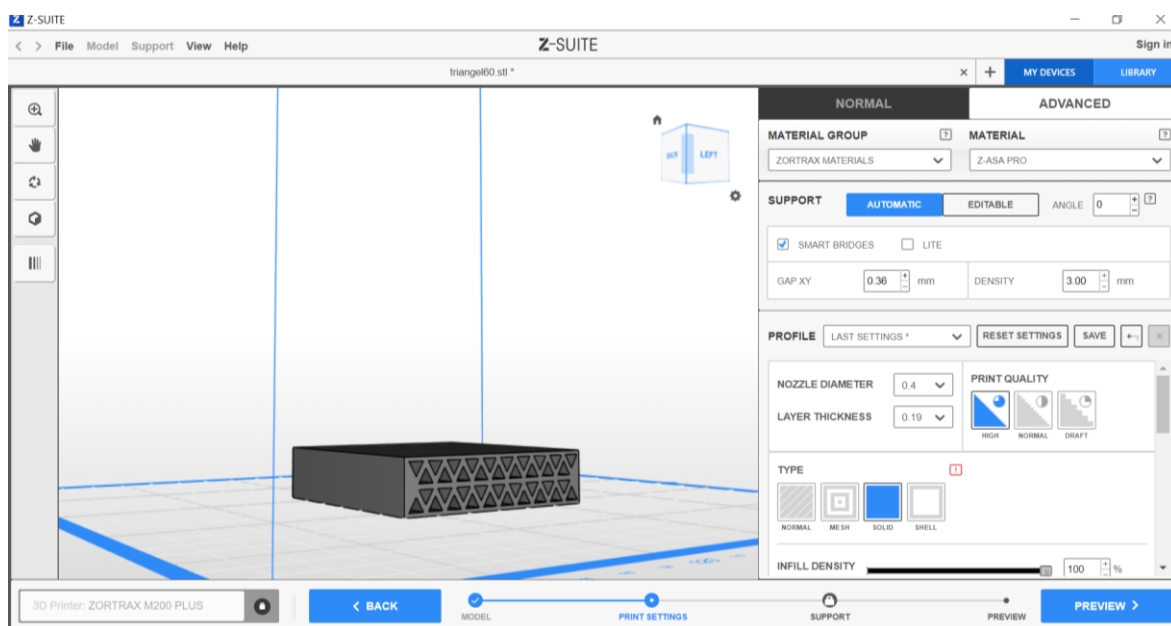
Ze všeho nejdříve je třeba provést již zmiňované rozložení těles v prostoru tiskárny. Každý vzorek byl tištěn samostatně, a je uložen uprostřed tiskové podložky viz. Obr. 21, tak aby bylo dosaženo co největší přesnosti. Díky tomuto uložení lze redukovat chyby a nepřesnosti, které by mohly vznikat při uložení v krajních polohách.



Obr. 21.: Uspořádání tištěného vzorku v prostoru tiskárny

V dalším kroku je třeba zvolit optimální parametry a nastavení tisku. Jeden z prvních parametrů je volba samotného tištěného materiálu. V programu Z-Suite jsou pro volbu materiálu dvě možnosti. Volba interního materiálu, kdy jsou některé parametry, jako teplota trysky, teplota podložky nebo rychlost tisku již přednastaveny, konkrétně pro materiály Zortrax. Jedná se o materiály produkované touto společností. Toto nastavení bylo zvoleno pro materiál ASA, jelikož jsou tyto parametry stejné, jako doporučované parametry výrobce Fillamentum. Další možností je volba externího materiálu, kdy je třeba veškeré parametry nastavit manuálně.

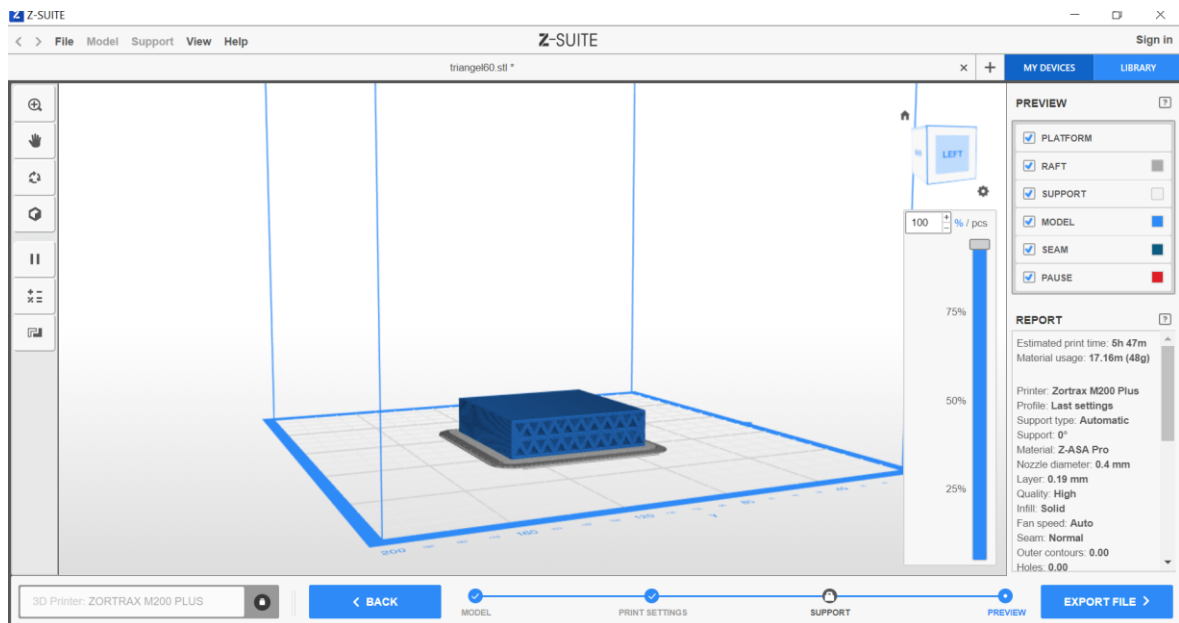
Důležitým nastavením jsou parametry jednotlivých vrstev. Průměr trysky je v našem případě volen průměr 0,4 mm. Tento rozměr plyne z konstrukce tiskárny, která je popsána v odstavci 7.3. Dále je nastavena vysoká kvalita tisku, typ výplně jako plný objem, a především velikost jednotlivých vrstev (Layer Thickness), která je 0,19 mm, jak lze vidět na Obr. 22. Tisk zkušebních těles je bez podpůrného materiálu, s pominutím spodní vrstvy, která je automaticky generována a slouží pro lepší přilnutí k tiskové podložce.



Obr. 22.: Nastavení parametrů tisku v systému Z-Suite

Po volbě materiálu a nastavení všech parametrů tisku dojde k převedení, kdy se z STL souboru vytvoří G-Kód, který dopodrobna popisuje směr pohybu tiskové hlavy. V kroku preview lze vidět kompletní simulaci nanášení jednotlivých vrstev, včetně podpůrného materiálu automaticky generovaným mezi zkušebním vzorkem a tiskovou podložkou. Lze si zde detailně projít tisk průběh v jednotlivých intervalech.

Ve správě parametrů je možná kontrola nastavených parametrů tisku. A také je zde vidět čas tisku daného výrobku, kdy konkrétně struktura s trojúhelníky byla tištěna 5h 47min. Kromě času zde můžeme najít také hmotnost a délku spotřebované struny viz. Obr. 23. Díky této informaci můžeme jednoduše stanovit, kolik vzorků je možné vytisknout z jedné cívky, popřípadě kdy je třeba cívku vyměnit.



Obr. 23.: simulace a krok preview v programu Z-Suite

### 7.3 Stroj

Pro zhotovení zkušebních vzorků byla zvolena 3D tiskárna Zortrax M200 Plus. Tiskárna se skládá z tuhé konstrukce o rozměru (350x360x505) mm s možností plného zakrytování. Tiskárna je založená na technologii LPD (Layer Plastic Deposition), ta pracuje na stejném principu jako FDM, jedná se pouze o značku výrobce Zortrax. Díky této technologii lze využívat širokou škálu materiálů s odlišnými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Vstupní materiál je dodáván v podobě struny o průměru 1,75 mm, která je navinuta na cívce. Tiskárna pracuje pouze s jednou tryskou, takže podpůrný materiál je stejný, jako materiál modelu. Tryska, která slouží k vytlačování materiálu, byla použita tryška s vnitřním průměrem 0.4 mm (s možnou modifikací na 0.3 mm nebo 0.6 mm).





Obr. 24.: Tiskárna Zortrax M200 Plus [41]

Pro samotný tisk je třeba zvolit optimální podmínky tisku, tj. musí dojít k dostatečnému zahřátí materiálu. O vyhřívání se stará topné těleso, které ohřívá trysku na požadovanou teplotu, konkrétní teplota je zvolena z materiálových listů výrobce. Maximální teplotní podmínky tiskárny Zortrax jsou uvedeny v Tab. 2. Vytlačovaný materiál je ve vrstvách nanášen na vyhřívanou tiskovou desku s rozměry 200 x 200 mm. Po vytlačení materiálu jsou jednotlivé vrstvy ochlazovány pomocí dvou ventilátorů a radiálního ventilátorového bloku ochlazující extrudér.

Tab. 2. Provozní teploty tiskárny Zortrax M200 Plus [41]

Maximální teplota trysky	Maximální teplota vyhřívané podložky	Okolní teplota za provozu	Skladovací teplota
290 °C	105 °C	20-30 °C	0-35 °C

### 7.3.1 Aspekty ovlivňující přesnost tisku

Před samotným tiskem, tak v jeho průběhu je třeba předcházet nežádoucím vlivům, které by mohly ovlivnit jak samotný tisk, tak výslednou kvalitu tištěných vzorků. Jedním z těchto vlivů je smrštění materiálu. Materiál ASA je výrazně náchylný na smrštění, mohlo by tedy docházet ke zhoršení připnutí v jednotlivých vrstvách a snížení výsledné pevnosti, příčinou kolísání teploty. Tato skutečnost je eliminována díky konstrukci samotné tiskárny. Jak již bylo zmíněno v odstavci 7.3, konstrukce tiskárny umožňuje plné zakrytování, tudíž dochází k minimálnímu úniku tepla.

Před zahájením tisku je třeba zkontrolovat pracovní prostor tiskárny, a především tiskovou desku. Jakékoliv nečistoty, nebo zbytky předešlých materiálu by mohly ovlivnit přilnavost tištěného vzorku. Je velmi důležité, aby se první vrstva materiálu pevně přichytila k podložce. Pokud nedojde k dostatečnému přilepení, není vhodné pokračovat v tisku. Ve většině případů dojde k deformaci výrobku. Velkou výhodou tiskáren Zortrax je vyhřívaná pórovitá tisková podložka, která zajišťuje lepší přilnutí tištěného výrobku k tiskové ploše.

Tiskovou podložku je třeba před zahájením tisku správně zkalibrovat. Je důležité, aby byla tisková plocha v rovině, jinak by mohlo dojít k nepřesnostem tisku. Větší výchylku je třeba vyrovnat pomocí stavěcích šroubů, u menší výchylky stačí kalibrace. U těchto typů tiskáren je kalibrace prováděna automaticky, společně s kalibrací roviny tiskové plochy dochází také ke kalibraci polohy tiskové desky vůči tiskové hlavě. Pokud je tisková podložka daleko od trysky, docházelo by k předčasnému ochlazení materiálu a opět by nedošlo ke správnému přilnutí vrstvy k tiskové podložce.

Jedním z dalších problémů, který vzniká při tisku zkušebních vzorku bylo obroušování vlákna. Tento problém vzniká v extrudéru, kdy ozubené kolo, které slouží k posouvání vlákna směrem k trysce začne vlákno obroušovat viz. Obr. 25. Po obroušení nedochází k posouvání vlákna tudíž nedochází k vytlačování jednotlivých vrstev. Řešením tohoto problému je zastavení tisku, manuální vytažení vlákna a následné zastřížení obroušené části.



Obr. 25.: Obroušené vlákno

## 7.4 Použitý materiál

Pro výrobu vzorků byl zvolen jeden druh materiálu. A to konkrétně materiál ASA. Jedná se o jeden z nejvyžívanějších materiálů na trhu. Zejména díky jeho cenové dostupnosti. Tento materiál disponuje různými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi, díky kterým může nabízet široký rozsah využití.

### 7.4.1 ASA

ASA (Akrylate Styrene Acrylonitril) je termoplastický polymer, který je alternativou materiálu ABS. Konkrétně od firmy Fillamentum. Jedná se o kvalitní konstrukční vlákno se zvýšenou odolností vůči povětrnostním podmínkám a vysokou odolností proti UV záření. Disponuje také výraznou mechanickou odolností a je odolný vůči náhlým tepelným změnám. Ve srovnání a materiálem ABS je ASA vodotěsnější, tužší a snadněji se tiskne, nedochází k deformaci. Hustota materiálu ASA je 1,07 g/cm<sup>3</sup>.

Tab. 3. Doporučené nastavení tisku pro ASA [24]

Nastavení tisku pro materiál ASA	
Teplota extrudéru:	245-255 °C
Teplota tiskové desky:	90-105 °C
Rychlost tisku:	40-60 mm/s

Tab. 4. Mechanické vlastnosti ASA [24]

Mechanické vlastnosti	Hodnoty	Testovací metody	Zkušební podmínky
Pevnost v tahu	40 MPa	ASTM D638	50 mm/min
Prodloužení při přetržení	35 %	ASTM D638	50 mm/min
Modul tahu	1726 MPa	ASTM D638	1 mm/min
Pevnost v ohybu	62 MPa	ASTM D790	15 mm/min
Ohybový modul	1814 MPa	ASTM D790	15 mm/min
Rázová houževnatost	441 J/m	ASTM D256	23 °C, 1/8 ”
Tvrdost Rockwell	92	ASTM D785	R-stupnice

## 8 PÁDOVÁ ZKOUŠKA

Jako kritérium pro hodnocení výsledné rázové odolnosti byla pro tento experiment zvolena pádová zkouška. Která nejlépe simuluje jedno z možných využití těchto struktur v oblasti odolnosti vůči dynamickým zatížením. Dalším důvodem je rozměr zkušební tělesa. Při použití zkoušky vrubové houževnatosti by nebylo možné vytvořit adekvátní strukturu, a to především proto, že zkušební tělesa pro tento typ zkoušky mají rozměr 10x10-55 mm. Tudíž vnitřní struktura by v tomto případě neměla vliv na rázovou odolnost a toto měření by nemělo výpovědní hodnotu.

Pro požadované účely tedy nejvíce vyhovuje již zmiňovaná pádová zkouška. Tato zkouška je prováděna na základě českých norem ČSN EN ISO 6603-1 a ČSN EN ISO 6603-2 Plasty – Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání – Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška. Tyto normy jsou obdobné americké normě ASTM D7136 / D7136M-12, která nejlépe popisuje tuto metodu, protože je přímo zaměřena na pádové zkoušky. Testována jsou všechna zkušební tělesa s rozměrem (60x60x15) mm.

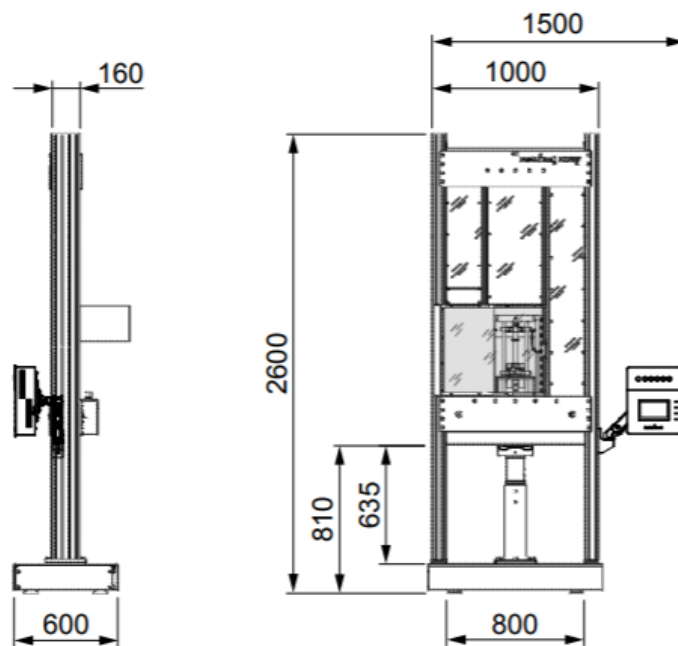
### 8.1 Použité zařízení a přístroje

Pádová zkouška byla prováděna na zařízení německé společnosti Zwick GmbH & Co. KG padostroj HIT230F. Jedná se o padostroj vyvinut speciálně pro potřeby leteckého průmyslu. Využívá se především pro testování panelů z vláknových kompozitů. Jedním z největších výhod tohoto zařízení je jeho bezpečná a nenáročná obsluha.

Padostroj se skládá z pevné základní desky, ze které vychází hlavní konstrukce. Hlavní rozměry tohoto zařízení jsou na Obr. 27. Zkušebním tělesem je tlouk o poloměru 20 mm, který má leštěnou polokulovou hlavu. Materiál tlouku je nejčastěji nástrojová ocel. Tlouk musí být dostatečně odolný proti otěru, musí mít dostatečnou pevnost, tak aby nevznikala plastická deformace. Jednoosý pohyb je zajištěn díky vodícím tyčím, které zabraňují jinému než svislému pohybu. Toto zařízení je také opatřeno dorazem, který zabraňuje opakovanému nárazu do testovaného vzorku. K zařízení je připojen počítač, do kterého jsou ukládány výsledky prováděné zkoušky. Celou konstrukci jsou na Obr. 26, jedná se o fotku přímo využívaného zařízení.



Obr. 26.: padostroj Zwick Roell HIT230F

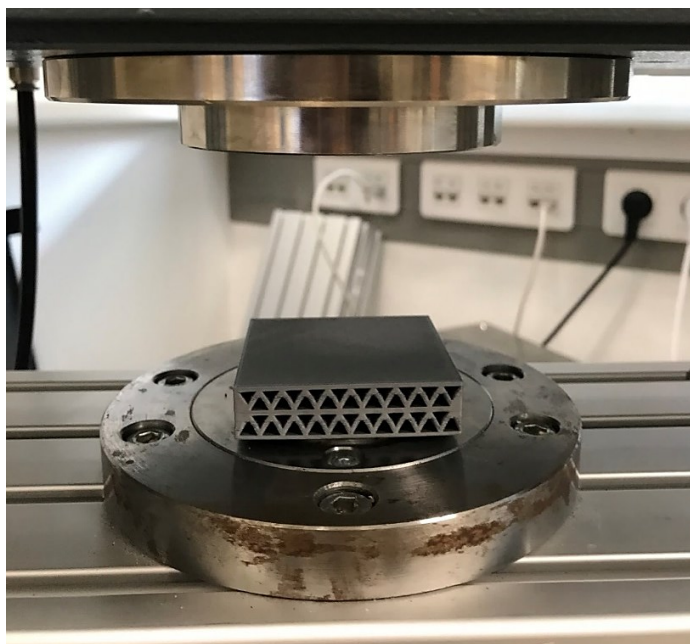


Obr. 27.: Rozměry padostroje Zwick Roell HIT230F [31]

## 8.2 Postup zkoušky

Zkouška probíhala ve školní laboratoři, při stálé pokojové teplotě 23 °C. Testována byla všechna zkušební tělesa o tloušťce 15 mm. Nejprve bylo třeba zvolit parametry pádové zkoušky. Jaké první parametrem byla zvolena hmotnost závaží, vycházelo se z doporučené hmotnosti udávané výrobcem padostroje pro testování polymerních materiálů. Hmotnost padacího tlouku tedy činila 23,77 kg, s jmenovitou pádovou energií 99,98 J a rychlostí 2,901 m/s.

Na podpěrný kroužek, který je pevně připevněn ke konstrukci padostroje je položen zkušební vzorek, je viditelně vycentrován do středu kroužku, viz. Obr. 28. Zkušební těleso se manuálně nijak nefixuje ani neupíná.



Obr. 28.: Zkušební vzorek vložený do padostroje

Po spuštění zkoušky v programu TestXpert II dochází k zajištění tlouku se závažím v horní poloze ve výšce 429 mm. Uvolnění zkušebního tělesa je řízeno současným přidržetím dvou bezpečnostních tlačítek na konstrukci padostroje. Nejprve sjede horní kroužek, který slouží k zafixování zkušebního tělesa. Následně dojde k uvolnění tlouku a těleso padá volně ve svislém směru. Při kontaktu s povrchem zkušebního vzorku dojde k vyvození kinetické energie a dochází k jeho proražení. Díky dorazům nedojde k opakovanému nárazu. Po dokončení zkoušky, tedy po uvolnění bezpečnostních tlačítek se tlouk vrací do původní polohy. Padostroj je připojen k elektronickému převodníku, který převádí naměřené hodnoty do počítače využívající program TestXpert II.

## 9 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Program TestXpert II zajišťuje sběr dat z průběhu pádové zkoušky. Veškeré výsledky byly následně přeneseny do programu Microsoft Office Excel, ve kterém bylo zpracováno statistické vyhodnocení výsledků celého měření. Výsledky jsou popsány pomocí statistiky, která zahrnuje průměrnou hodnotu a směrodatnou průměrovou odchylku. Včetně grafů, díky kterým lze lepe vizuálně porovnat naměřené výsledky zkoušky.

Ze všech naměřených parametrů byla jako porovnání všech struktur zvolena maximální síla potřebná k proražení zkušebního tělesa a průtisku. Společně se statistickými výsledky byly struktury porovnány také podle povrchového poškození a velikosti vizuální deformace samotného zkušebního vzorku. Všechna tělesa byla testována za stejných parametrů, které můžeme nalézt v odstavci 8.2. Každá struktura byla testována desetkrát, z čehož byl stanoven aritmetický průměr.

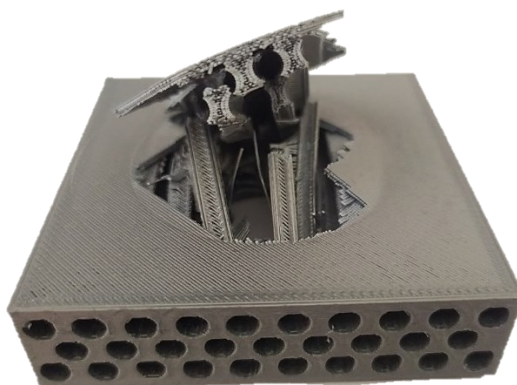
### 9.1 Kruh

První testovanou strukturou byla kruhová struktura. V Tab. 5 můžeme vidět statistické vyhodnocení výsledků pádové zkoušky pro kruhovou strukturu z 10 měření. Maximální síla potřebná k proražení činila 7725,53 N. Velikost průtisku je 5,54 mm.

Tab. 5. Výsledky pádové zkoušky pro strukturu kruhu

<b>Kruh</b>	
Opakovatelnost měření [n]	10
Průměrná hodnota síly [ $\bar{x}$ ]	7725,53 N
Sm. odchylka [ $\sigma$ ]	311,20 N
Průměrná hodnota průtisku [ $\bar{x}$ ]	5,54 mm
Sm. odchylka [ $\sigma$ ]	0,16 mm

U kruhové struktury došlo k výraznému viditelnému poškození zkušebního vzorku, kdy celá horní plocha byla vtlačena do tělesa. Následně došlo k delaminaci jednotlivých vrstev, především mezi jednotlivými kruhovými strukturami a následnému vytlačení celé vnitřní struktury ven ze zkušebního vzorku, jak lze vidět na Obr. 29. Nedocházelo zde k předpokládanému vtlačení první vrstvy do druhé, tedy postupné deformaci vrstvy po vrstvě.



Obr. 29.: Zkušební vzorek Kruhu po pádové zkoušce

## 9.2 Trojúhelník

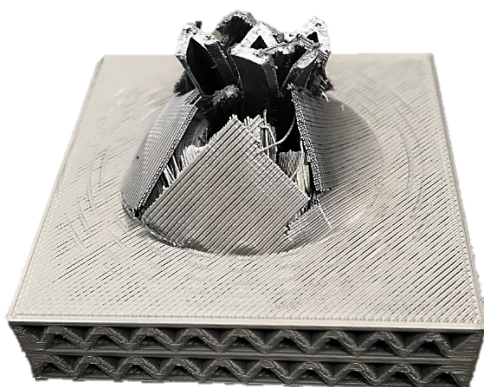
U vzorku s trojúhelníkovou průchozí strukturou byl předpoklad, že díky různým úhlům a složitosti tvarů může dojít k významnému snížení energie nárazu díky mnoha variantám úhlů a také kvůli potenciálu rozkladu energie nárazu do stran. V případě zkušebních vzorků byla maximální síla potřebná k proražení 5144,53 N. Velikost průtisku je téměř srovnatelná jako u kruhové struktury tedy 5,93 mm.

Tab. 6. Výsledky pádové zkoušky pro strukturu trojúhelníku

Trojúhelník	
Opakovatelnost měření [n]	10
Průměrná hodnota síly [ $\bar{x}$ ]	5144,53 N
Sm. odchylka [ $\sigma$ ]	213,86 N
Průměrná hodnota průtisku [ $\bar{x}$ ]	5,93 mm
Sm. odchylka [ $\sigma$ ]	1,97 mm

U trojúhelníkové struktury dochází podobně jako u kruhové struktury k vtláčování horní plochy do zkušebního tělesa, tedy k výraznému mechanickému poškození zkušebního vzorku. Samotná vnitřní struktura trojúhelníku nebyla poškozena, došlo k delaminaci mezi jednotlivými vrstvami a dochází k vytlačení celé struktury trojúhelníku z tělesa ven. Lze tedy říct, že dochází k celkové delaminaci mezi vnitřní strukturou.





Obr. 30.: Zkušební vzorek Trojúhelník po pádové zkoušce

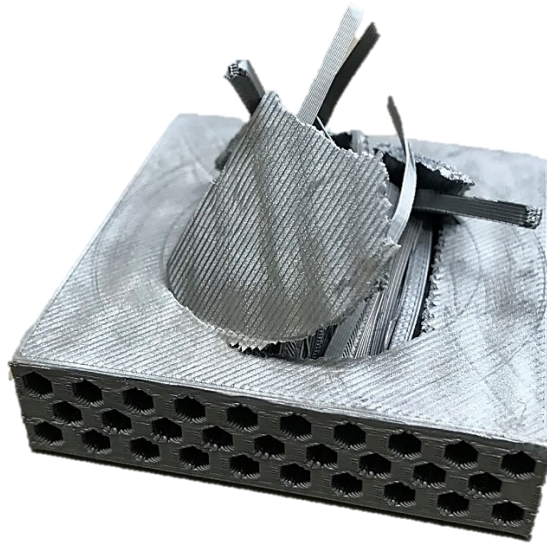
### 9.3 Plástve

Poslední testovanou plně průchozí strukturou byla struktura plástve. Tato struktura dopadla ze všech testovaných struktur nejhůře. Maximální síla potřebná k proražení činila pouhých 3394,92 N. U průtisku je rozdíl oproti ostatním plně průchozím strukturám kolem 3 mm, viz. Tab. 7.

Tab. 7. Výsledky pádové zkoušky pro strukturu plástve

Plástve	
Opakovatelnost měření [n]	10
Průměrná hodnota síly [ $\bar{x}$ ]	3394,92 N
Sm. odchylka [ $\sigma$ ]	74,74 N
Průměrná hodnota průtisku [ $\bar{x}$ ]	8,01 mm
Sm. odchylka [ $\sigma$ ]	1,59 mm

Stejně tak jako statistické výsledky, tak i mechanické poškození dopadlo u struktury pláství nejhůře ze všech testovaných struktur. Dochází zde k úplné delaminaci vnitřní vrstvy, celá struktura plástve byla poničena zůstaly pouze pásy materiálu vytlačené ven ze zkušebního tělesa.



Obr. 31.: Zkušební vzorek plástve po pádové zkoušce

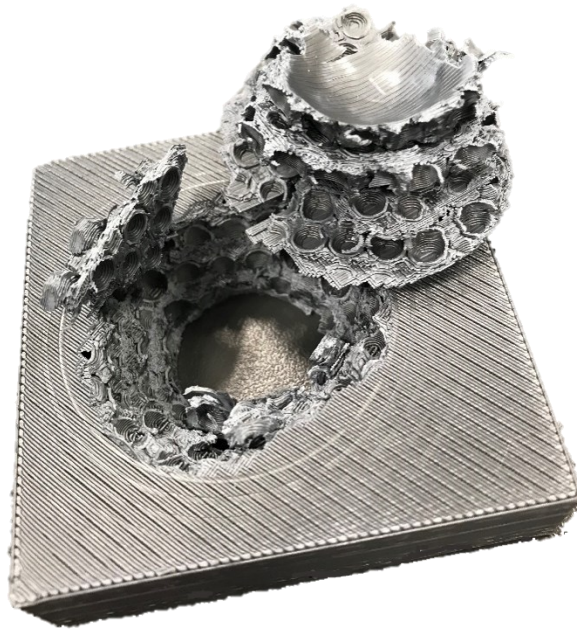
#### 9.4 Koule

Tato struktura dosáhla nejlepších výsledků, když průměrná hodnota síly činila 8555,15 N. Což je více jak dvojnásobek síly u struktury pláství. U průtisku tento rozdíl není tak znatelný, jedná se pouze o desetiny milimetru, jak lze vidět v Tab. 8.

Tab. 8. Výsledky pádové zkoušky pro strukturu koule

Koule	
Opakovatelnost měření [n]	10
Průměrná hodnota síly [ $\bar{x}$ ]	8555,15 N
Sm. odchylka [ $\sigma$ ]	790,95 N
Průměrná hodnota průtisku [ $\bar{x}$ ]	5,00 mm
Sm. odchylka [ $\sigma$ ]	0,16 mm

Na obou vzorcích je vidět, že jednotlivé vrstvy nebyly vytlačeny z tělesa, ale vtlačeny do sebe a následně do okolí. Z čehož můžeme soudit, že při kontaktu se zkušebním tělesem došlo k deformaci vrstvy po vrstvě, díky které došlo ke snížení dopadové síly a k pohlcení určité části dopadové energie. Díky kterým tato struktura dosáhla nejlepší výsledků.



Obr. 32.: Zkušební vzorek koule po pádové zkoušce

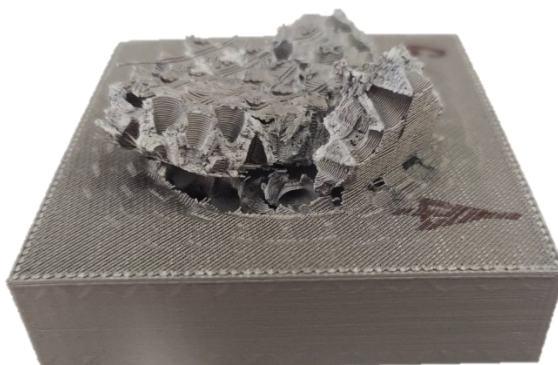
## 9.5 Kužel

Druhou testovanou neprůchozí strukturou byla vnitřní struktura kuželu, ta dosahovala maximální síla 7884,54. Jedná se o druhý nejlepší výsledek ze všech testovaných struktur. Velikost průtisku dosahovala hodnot téměř podobných jako u struktury koule, s rozdílem pouze 0,76 mm.

Tab. 9. Výsledky pádové zkoušky pro strukturu kuželu

Kužel	
Opakovatelnost měření [n]	10
Průměrná hodnota síly [ $\bar{x}$ ]	7884,54 N
Sm. odchylka [ $\sigma$ ]	585,32 N
Průměrná hodnota průtisku [ $\bar{x}$ ]	5,76 mm
Sm. odchylka [ $\sigma$ ]	1,99 mm

Podobně jako u kulové struktury, tak i u struktury kuželu dochází k postupnému vtlačování jednotlivých vrstev do vrstvy následující, tedy docházelo zde k deformaci vrstvy po vrstvě. I přes horší numerické výsledky, konkrétně síly potřebné k proražení, u některých zkušebních těles nedošlo k úplnému proražení a delaminaci jednotlivých vrstev.



Obr. 33.: zkušební vzorek kuželu po pádové zkoušce

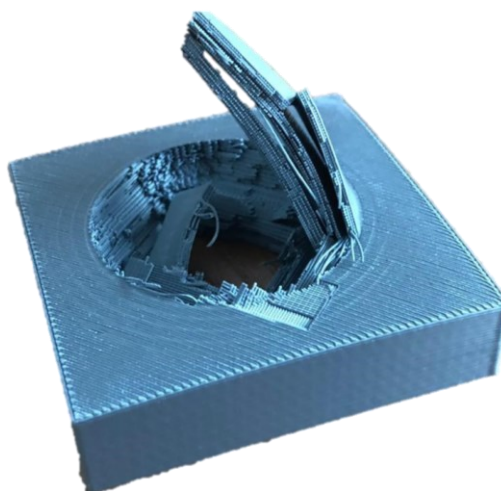
## 9.6 Plný materiál

Plný materiál je materiál bez vnitřní struktury, jehož objem byl o 35% větší než u těles s vnitřní strukturou. Stejně jako u ostatních zkušebních těles, tak i plný materiál byl podroben 10 měření. Celková síla potřebná k proražení činila 7121,53 N. Tuto hodnotu překonaly pouze tři tvarové vnitřní struktury. Výsledná hodnota průtisku je nejnižší ze všech testovaných struktur a to 3,83 mm.

Tab. 10. Výsledky pádové zkoušky pro plný materiál

Plný materiál	
Opakovatelnost měření [n]	10
Průměrná hodnota síly [ $\bar{x}$ ]	7121,53N
Sm. odchylka [ $\sigma$ ]	445,30 N
Průměrná hodnota průtisku [ $\bar{x}$ ]	3,83 mm
Sm. odchylka [ $\sigma$ ]	1,80 mm

U plně průchozí struktury došlo k proražení a celkové deformaci v jednotlivých vrstvách, kdy došlo k delaminaci jak v obvodu kontaktu se zkušebním tělesem, tak v jednotlivých vrstvách zkušebního vzorku. Celá část, ve které dochází ke kontaktu a přenosu kinetické energie se zkušebním tělesem byla vytlačena ven z materiálu.



Obr. 34.: Zkušební vzorek plného materiálu po pádové zkoušce

V Tab. 11. jsou popsány průměrné výsledky všech výsledných hodnot, které jsou spočítány z 10 měření, pro každou strukturu. Další výslednou hodnotou pro toto měření je tzv. Variační koeficient  $[v_x]$ , který je spočítán jako poměr směrodatné odchylky  $[\sigma]$  a průměru  $[\bar{x}]$ . Hodnota variačního koeficientu je vyjádřena v %, tedy jako bezrozměrná veličina, pro lepší porovnání výsledků síly potřebné k proražení a průtisku.

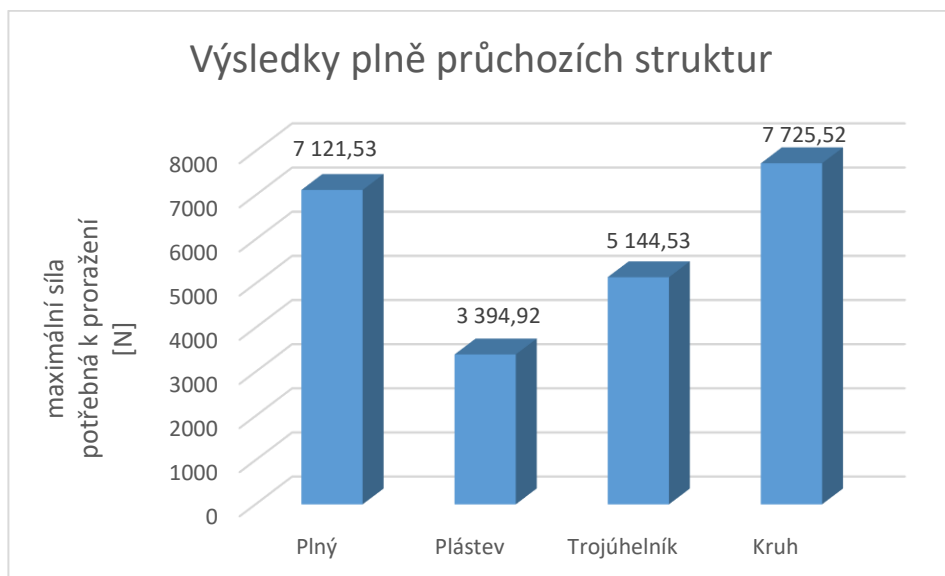
Tab. 11. Porovnání průměrných hodnot všech typů struktur

Porovnání všech výsledných hodnot							
	Síla potřebná k proražení			Průtisk			n
	Průměr $[\bar{x}]$	Sm.odch. $[\sigma]$	Vk. $[v_x]$	Průměr $[\bar{x}]$	Sm.odch. $[\sigma]$	Vk. $[v_x]$	
Kruh	7725,53 N	311,20 N	4,0 %	5,54 mm	0,16 mm	3,3 %	10
Trojúhelník	5144,53 N	213,86 N	4,2 %	5,93 mm	1,97 mm	33,2 %	10
Plástev	3394,92 N	74,74 N	2,2 %	8,01 mm	1,59 mm	24,3 %	10
Koule	8555,15 N	790,95 N	9,3 %	5,00 mm	0,16 mm	22,1 %	10
Kužel	7884,54 N	585,32 N	7,4 %	5,76 mm	1,99 mm	34,3 %	10
Plný mat.	7121,53 N	445,30 N	6,3 %	3,83 mm	1,80 mm	47,0 %	10

## 10 DISKUZE

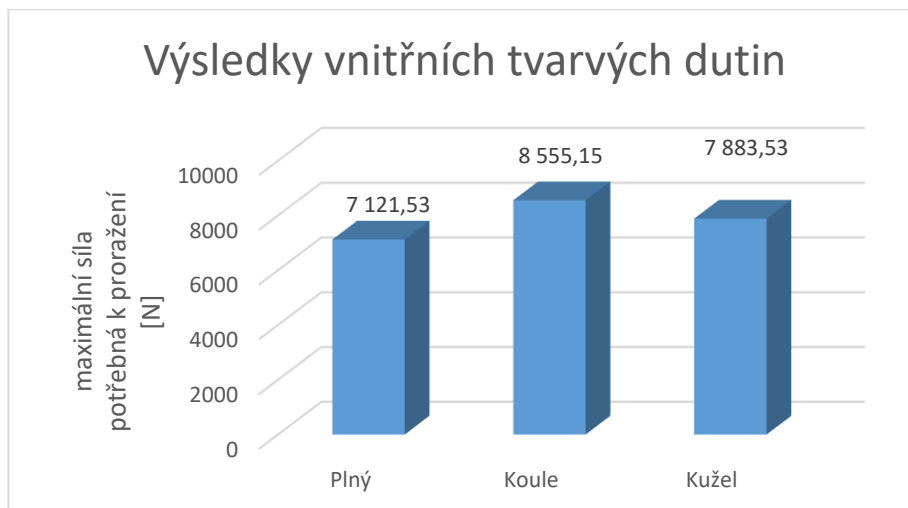
Z naměřených výsledků, jež byly v předchozí kapitole vyhodnocovány byl zvolen aritmetický průměr maximální síly potřebné k proražení a viditelná deformace zkušebních těles. Jedná se o nejlepší porovnávací kritérium, díky kterému lze stanovit nejvyšší rázovou odolnost, jak numerickou, tak nejlepší chování struktury při kontaktu se zkušebním tělesem. Všechny testované struktury jednotlivých typů byly porovnány mezi sebou a následně došlo k porovnání nejlepších výsledků s výsledky plného materiálu.

Při porovnání všech plně průchozích struktur dochází ke značným rozdílům odolnosti jednotlivých struktur. Nejhoršího výsledku dosáhla struktura plástve, které nedosáhla v porovnání s plným materiálem ani polovičních výsledků viz. Obr. 35. Druhou testovanou strukturou byla struktura trojúhelníku, které dosáhla lepších výsledků, jako struktura plástve, ovšem tento výsledek opět není v porovnání s plným materiálem uspokojivý. Nejlepšího výsledku ze všech plně průchozích struktur dosáhla struktura kruhu, která převýšila výsledky plného materiálu. I přes dostačující výsledek jedné z testovaných struktur, není použití těchto struktur dostačující, zejména proto, že zde dochází společně s delaminací k vytlačování jednotlivých vrstev ven z materiálu. Proto nejsou tyto struktury vhodné.



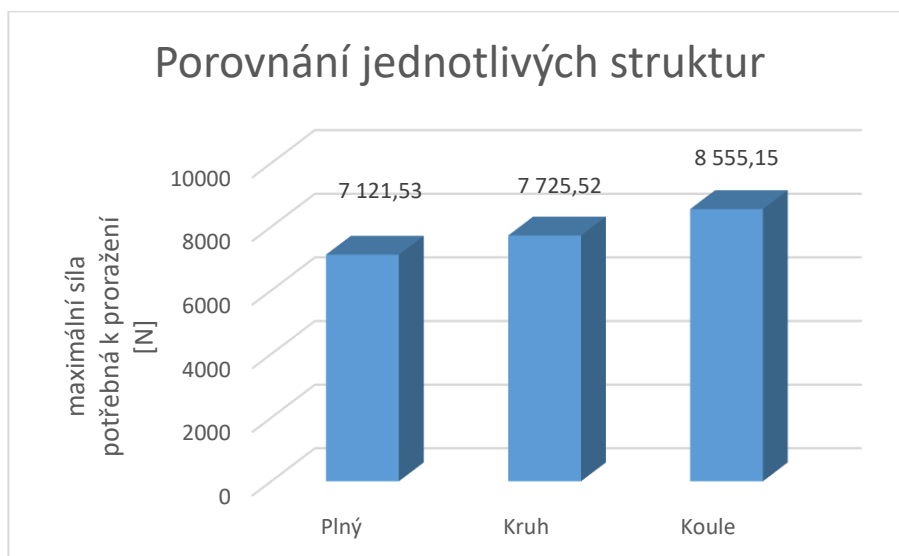
Obr. 35.: Porovnání výsledků plně průchozích struktur v porovnání s plným materiálem v [N]

U struktur s vnitřními tvarovými dutinami se výsledky nějak výrazně neliší, obě dosáhly vynikajících výsledků, kdy u obou struktur, jak u koule, tak u kuželu došlo k překonání výsledků plného materiálu. Výsledky obou struktur lze vidět na Obr. 36. V porovnání s plně průchozími strukturami, nedocházelo k vytlačování jednotlivých vrstev ven ze zkušební vzorku, ale k postupné deformaci a vtláčování vrstvy po vrstvě, díky čemuž došlo ke snížení dopadové energie a snížení dopadové síly.



Obr. 36.: Porovnání výsledků vnitřních tvarových dutin v porovnání s plným materiálem v [N]

Při srovnání jednotlivých typů, nejlepších výsledků plně průchozích struktur dosáhla vnitřní struktura koulí, což lze vidět na Obr. 37. U této struktury nedošlo k vytlačení struktury ven z materiálu, ale k postupné deformaci vrstvy po vrstvě, díky které došlo k výraznému snížení dopadové energie.



Obr. 37.: Porovnání nejlepších výsledků jednotlivých typů struktur s plným materiálem [N]

## ZÁVĚR

V teoretické části bakalářské práce je zmíněno několik typů výroby pomocí 3D tisku a materiály podporující tuto aditivní technologii, která je později využita v praktické části. Obsahuje podrobně popsané jednotlivé kroky od vytvoření modelu až po vytištění samotné součásti. Dále popisuje jednotlivé druhy souřadných systémů, které jsou využívány u těchto typů tiskáren. V neposlední řadě jsou zde popsány materiály, které je možné u tohoto druhu technologie využít. Následně jsou popsány technologie rázového zatížení materiálů. Konkrétně je pak práce zaměřena na rázovou zkoušku pádem, která je využita ke zhotovení praktické části. U rázové zkoušky pádem je představen její princip, konstrukce pádových strojů a výpočtové parametry.

V úvodu praktické části jsou popsány jednotlivé struktury. Je zkoumáno celkem pět struktur, tyto struktury jsou rozděleny do dvou skupin, a to konkrétně do skupiny vzorků s plně průchozími útvary a do skupiny vzorků s vnitřními tvarovými dutinami. Plně průchozími dutinami jsou vzorky s tvarem trojúhelníku, plástve a kruhu. Do vnitřních tvarových dutin jsou zařazeny koule a kužel. Po upřesnění struktur následuje přesný postup nastavení 3D tisku zkušebních těles. Strukturované zkušební vzorky jsou vytvořeny pomocí tiskárny Zortrax M200 Plus z materiálu ASA od společnosti Fillamentum.

Všechny zkušební vzorky byly testovány pádovou zkouškou za použití stroje Zwick Roell HIT230F. Plně průchozí vzorek plástve a trojúhelníku dosáhl nižší hodnoty síly potřebné k proražení než plný testovaný vzorek. Pro vzorek plástve a trojúhelníku jsou průměrné hodnoty průrazných sil pouze 3394,92 N a 5144,53 N, což je neuspokojivý výsledek. Jelikož jak u pláství, tak u trojúhelníku byla odolnost v porovnání s plným materiálem nižší, a to konkrétně o 53 % u plástve a o 28 % u trojúhelníku. U těchto vzorků byly jednotlivé vrstvy materiálu vytlačeny příčinou celkové delaminace vnitřní vrstvy. Podobné výsledky byly získány s plně průchozí kruhovou strukturou, která měla průměrnou hodnotu síly potřebné k proražení 7725,52 N. Což je o 8,5 % lepší výsledek oproti plnému materiálu. K delaminaci jednotlivých vrstev došlo i v této struktuře. Dalším testovaným typem struktur byly vnitřní tvarové dutiny, kdy první testovanou strukturou byl kužel, jehož síla potřebná k proražení činila 7884,54 N, tedy o 10 % více než u plného materiálu. U této struktury nedocházelo k vytlačení struktury ze zkušebního vzorku, ale k protlačení vrstvy po vrstvě.



Ze všech testovaných struktur dopadla nejlépe struktura s vnitřními sférickými dutinami tzv. koule. Která měla nejvyšší odolnost proti proražení. Síla potřebná k proražení tohoto vzorku byla 8555,15 N. Z čehož vyplývá, že struktura koule má o 20 % lepší rázovou odolnost v porovnání s plným materiálem. Navíc nedocházelo k žádné delaminaci nebo vytlačování jednotlivých vrstev. U této struktury docházelo k postupnému vtlačování jedné vrstvy do druhé, tedy k deformaci vrstvy po vrstvě, existuje zde potenciální zastavovací účinek.

Kruhová struktura a struktura kuželu vykazují mezi sebou vyšší a srovnatelné hodnoty síly potřebné k proražení zkušebního vzorku než plný objem zkušebního vzorku bez dutin. Nejvyšší hodnotu síly potřebné k proražení prokazuje struktura koulí, a to jak výsledky, tak viditelným poškozením. Odpor vzorku bez dutin dosáhl odporu 7121,53 N.

Po vyhodnocení rázové zkoušky pádem je zřejmé, že nejlepších výsledků dosáhla struktura s kulovými dutinami. Bylo prokázáno, že vnitřní struktury zkušebních vzorků mohou zvýšit odolnost vůči dynamickému zatížení, a to za předpokladu nižší spotřeby materiálu při výrobě namáhané součásti.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Charles Bell. 2014. *Maintaining and Troubleshooting Your 3D Printer* (1st. ed.). Apress, USA. ISBN:978-1-4302-6809-3
- [2] Historie 3D tisku. 3dfactory.cz [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/10/27/historie/>
- [3] Discover the history of 3D printer: The history of 3d printer: from rapid prototyping to additive fabrication. Sculpteo [online]. Mar 1, 2017 [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>
- [4] Přehled technologií 3D tisku. Dk metal prominent [online]. 09.01.2018 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [5] GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Second Edition. Springer, 2015. ISBN ISBN 978-1-4939-2113-3.
- [6] THOMAS, Daniel J. a Deepti SINGH. *3D Printing in Medicine and Surgery*. 2020. United Kingdom: Elsevier. ISBN 978-0-08-102543-7. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/C2017-0-01048-0>
- [7] Global 3D Printing In Medical Applications Market 2017 Size, Share, Outlook and Forecast to 2024. Steemit [online]. [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <https://steemit.com/printing/@marketforecast/global-3d-printing-in-medical-applications-market-2017-size-share-outlook-and-forecast-to-2024>
- [8] FINA, Fabrizio, Alvaro GOYANES, Simon GAISFORD a Abdul W. BASIT. *International Journal of Pharmaceutics: Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines*. 2017. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.06.082>
- [9] AWAD, Atheer, Fabrizio FINA, Alvaro GOYANES, Simon GAISFORD a Abdul W. BASIT. *International Journal of Pharmaceutics: 3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering*. 2020. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119594>

- [10] Shi K, Tan DK, Nokhodchi A, Maniruzzaman M. Drop-On-Powder 3D Printing of Tablets with an Anti-Cancer Drug, 5-Fluorouracil. *Pharmaceutics*. 2019;11(4):150. Published 2019 Apr 1. doi:10.3390/pharmaceutics11040150.
- [11] KOMISSARENKO, Dmitrii A., Petr S. SOKOLOV, Anastasiya D. EVSTIGNEEVA, et al. *Journal of the European Ceramic Society: DLP 3D printing of scandia-stabilized zirconia ceramics*. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.09.010>
- [12] Alucast [online]. [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://alucast.cz/cs/sluzby/rapid-prototyping>
- [13] KUMAR, L. Jyothish, M. Pandey PULAK a David Ian WIMPENNY. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. Singapore: Springer, 2019. ISBN 978-981-13-0304-3.
- [14] Rapidprototyping3d [online]. [cit. 2021-01-11]. Dostupné z: <https://rapidprototyping3d.com/4-popular-rapid-prototyping-technologies-manufacturing/>
- [15] NING, Fuda, Junhua WEI, Shiren WANG a Meng ZHANG. *Additive Manufacturing of CFRP Composites Using Fused Deposition Modeling: Effects of Carbon Fiber Content and Length*. June 2015. Dostupné z: doi:10.1115/MSEC2015-9436
- [16] The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar). *3dnatives* [online]. Dec 15, 2017 [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/#!>
- [17] The Introductory Guide on FDM 3D Printing [online]. [cit. 2020-12-23]. Dostupné z: <https://www.creality.com/blog-detail/the-introductory-guide-on-fdm-3d-printing>
- [18] This 6-Axis Robot Arm Can 3D Print Fiberglass Composites. *Archdaily* [online]. March 26, 2017 [cit. 2020-12-23]. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/867696/atropos-this-6-axis-robot-arm-can-3d-print-fiberglass-composites>
- [19] WHAT MATERIALS ARE USED FOR 3D PRINTING? *Sharrettsplating* [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.sharrettsplating.com/blog/materials-used-3d-printing/>

- [20] All3dp [online]. [cit. 2021-01-11]. Dostupné z: <https://all3dp.com>
- [21] Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and its Features. Omnexus The material selection platform [online]. [cit. 2020-12-25]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-plastic>
- [22] Airwolf3d [online]. Nov 26, 2013 [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: <https://airwolf3d.com>
- [23] Simplify3d [online]. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com>
- [24] Filament2print [online]. [cit. 2021-01-11]. Dostupné z: <https://filament2print.com/gb/>
- [25] Prusament PETG. Prusament [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://prusament.com/materials/prusament-petg/>
- [26] ALCOCK, Ben, N. O. CABRERA, Nektaria-Marianthi BARKOULA a Anne B SPOELSTRA. The mechanical properties of woven tape all-polypropylene composites. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2006.01.003
- [27] Directindustry: Impact testing machine 9440 [online]. [cit. 2021-01-11]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/instron/product-18463-583390.html>
- [28] FLYNT, Joseph Flynt. Sandstone Filament: Properties, How to Use Them, and Best Brands. 3dinsider [online]. June 6, 2018 [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/sandstone-filament/>
- [29] LaserStates [online]. [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <http://laserstates.com/About-SLA-Process.html>
- [30] A quick guide to exotic FDM printing materials. Treatstock [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://www.treatstock.com/guide/article/123-a-quick-guide-to-exotic-fdm-printing-materials>
- [31] Zwickroell [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com>
- [32] Stratasysdirect [online]. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com>

- [33] Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites 1st Edition. Woodhead Publishing, 19th September 2018n. 1. ISBN 9780081023006.
- [34] KIM, Garam, RonaldSterkenburga STERKENBURGA a Waterloo TSUTSUIB. Investigating the effects of fluid intrusion on Nomex® honeycomb sandwich structures with carbon fiber facesheets. 2018. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.054>
- [35] ASTM D7136/D7136M – 12: Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. Philadelphia: ASTM International. D7136/D7136M – 12.
- [36] What Material Should I Use For 3D Printing? – Advanced Materials Review #1 – BendLay, Laywoo-D3 and LayBrick. 3dprintingforbeginners [online]. [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: <http://3dprintingforbeginners.com/3d-printing-materials-bendlay-laywood-laybrick/>
- [37] SAJADI, S. M., P. RAMESH, Dr. M. M. RAHMAN, Dr. C. S. TIWARY a Prof. P. M. AJAYAN. 3D Printed Tubulanes as Lightweight Hypervelocity Impact Resistant Structures. Nov 11, 2019. 2019. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/sml.201904747>
- [38] Zhao, L., Qian, X., Sun, Y. et al. Ballistic behaviors of injection-molded honeycomb composite. J Mater Sci 53, 14287–14298 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2611-y>
- [39] Sharafeldin, M.; Jones, A.; Rusling, J.F. 3D-Printed Biosensor Arrays for Medical Diagnostics. Micromachines 2018, 9, 394. <https://doi.org/10.3390/mi9080394>
- [40] Madla C.M., Trenfield S.J., Goyanes A., Gaisford S., Basit A.W. (2018) 3D Printing Technologies, Implementation and Regulation: An Overview. In: Basit A., Gaisford S. (eds) 3D Printing of Pharmaceuticals. AAPS Advances in the Pharmaceutical Sciences Series, vol 31. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-90755-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-90755-0_2)
- [41] Zortrax: Zortrax M200 Plus [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://zortrax.com>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

FDM	Zkratka technologie Fused deposition modeling
AM	Zkratka Additive manufacturing
CAD	Zkratka Computer Aided Design
STL	Zkratka formátu Stereolithography
RP	Zkratka Rapid Prototyping
SLA	Zkratka technologie 3D tisku
UV	Zkratka ultrafialového záření
3D	Zkratka technologie třídímenzionálního souboru
PB	Zkratka technologie Powder-based
DoP	Zkratka technologie Drop-on-powder
SLS	Zkratka technologie Selective laser sintering
DMSL	Zkratka technologie Direct metal laser sintering
SLM	Zkratka technologie Selective laser melting
DLP	Zkratka technologie Stereolithography
FFF	Zkratka technologie Digital Light Processing
PLA	Zkratka pro polyactic acid
PETG	Zkratka pro polyethylene terephthalate glycol
PET	Zkratka pro polyetyléntereftalát
PVA	Zkratka pro Polyvinyl alcohol
ABS	Zkratka pro Akrylonitril Butadien Styren
ASA	Zkratka pro materiál Acrylonitril styren acrylat
PHB	Zkratka pro Polyhydroxybutyrát
AF	Zkratka pro aramid fiber
s	Vyjádření času (sekunda)
m	Vyjádření délky (metr)

---

J	Vyjádření energie (joule)
mm	Vyjádření délky (milimetr)
kg	Vyjádření hmotnosti (kilogram)
Pa	Vyjádření tlaku (Pascal)
°C	Vyjádření teploty (stupeň Celsia)
N	Vyjádření síly (Newton)
Sm	Zkratka pro směrodatnou odchylku
Vk	Zkratka pro variační koeficient
$\bar{x}$	Symbol průměru
$\sigma$	Symbol směrodatné odchylky
$v_x$	Symbol variačního koeficientu

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1.: Rapid prototyping [12] .....	12
Obr. 2.: Využití 3D tisku v medicíně [7] .....	13
Obr. 3.: Schéma DoP technologie [40] .....	14
Obr. 4.: Schéma SLS technologie [39] .....	15
Obr. 5.: Součást vytvořená technologií DMLS [32] .....	16
Obr. 6.: Princip technologie SLA [29] .....	17
Obr. 7.: Proces FDM 3D tisku [14] .....	18
Obr. 8.: Popis FDM 3D tiskárny [15] .....	19
Obr. 9.: Schéma pohybu souřadných systémů [17] .....	20
Obr. 10. Robotické rameno [18] .....	21
Obr. 11.: Výrobek a cívka materiálu PLA [24] .....	22
Obr. 12.: Výrobek z materiálu ABS [22] .....	24
Obr. 13.: Výrobek z materiálu Laybrick [22] .....	25
Obr. 14.: Výrobek vytvořený z materiálu Laywoo-D3 [36] .....	26
Obr. 15.: Schéma pádové zkoušky [26] .....	29
Obr. 16.: Konstrukce pádového stroje [27] .....	29
Obr. 17.: Běžně pozorované poruchy materiálu při pádové zkoušce [35] .....	30
Obr. 18.: Struktura Tubulanu [37] .....	31
Obr. 19.: Voština vytvořená technologií vstřikování [38] .....	32
Obr. 20.: Rozměry zkušební tělesa .....	36
Obr. 21.: Uspořádání tištěného vzorku v prostoru tiskárny .....	38
Obr. 22.: Nastavení parametrů tisku v systému Z-Suite .....	39
Obr. 23.: simulace a krok preview v programu Z-Suite .....	40
Obr. 24.: Tiskárna Zortrax M200 Plus [41] .....	41
Obr. 25.: Obroušené vlákno .....	42
Obr. 26.: padostroj Zwick Roell HIT230F .....	45
Obr. 27.: Rozměry padostroje Zwick Roell HIT230F [31] .....	45
Obr. 28.: Zkušební vzorek vložený do padostroje .....	46
Obr. 29.: Zkušební vzorek Kruhu po pádové zkoušce .....	48
Obr. 30.: Zkušební vzorek Trojúhelníku po pádové zkoušce .....	49
Obr. 31.: Zkušební vzorek plástve po pádové zkoušce .....	50
Obr. 32.: Zkušební vzorek koule po pádové zkoušce .....	51
Obr. 33.: zkušební vzorek kuželu po pádové zkoušce .....	52
Obr. 34.: Zkušební vzorek plného materiálu po pádové zkoušce .....	53
Obr. 35.: Porovnání výsledků plně průchozích struktur v porovnání s plným materiálem v [N] .....	54
Obr. 36.: Porovnání výsledků vnitřních tvarových dutin v porovnání s plným materiálem v [N] .....	55
Obr. 37.: Porovnání nejlepších výsledků jednotlivých typů struktur s plným materiálem [N] .....	55



**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Rozdělení a náhledy použitých struktur.....	37
Tab. 2. Provozní teploty tiskárny Zortrax M200 Plus [41] .....	41
Tab. 3. Doporučené nastavení tisku pro ASA [24] .....	43
Tab. 4. Mechanické vlastnosti ASA [24].....	43
Tab. 5. Výsledky pádové zkoušky pro strukturu kruhu .....	47
Tab. 6. Výsledky pádové zkoušky pro strukturu trojúhelníku .....	48
Tab. 7. Výsledky pádové zkoušky pro strukturu plástve .....	49
Tab. 8. Výsledky pádové zkoušky pro strukturu koule.....	50
Tab. 9. Výsledky pádové zkoušky pro strukturu kuželu .....	51
Tab. 10. Výsledky pádové zkoušky pro plný materiál .....	52
Tab. 11. Porovnání průměrných hodnot všech typů struktur .....	53

## SEZNAM PŘÍLOH

P I Materiálový list ASA Extrafill

P II CD Disk obsahující:

- textovou část bakalářské práce.
- Zortrax printing code všech tištěných struktur.

# PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST ASA EXTRAFILL

## Datasheet



## ASA Extrafill

### Description:

Thanks to mechanical properties is ASA filament ideal for the production of the first samples before serial production for functional prototyping, manufacturing tools, but also for the production of goods for everyday usage including outdoor applications.

The advantage of this material is its excellent weather resistance, high retention of physical features and low level of yellowing.

ASA has a higher rigidity than ABS and thus it is suitable for demanding applications. Another advantage is its good dimensional stability.

This material can be used for production of electrical and electronic equipment. It doesn't contain the restricted substances. The use of the material in the food or medical industry is not recommended.

Fillamentum guarantees precision of filament dimensions within the tolerance of +/- 0,05 mm, which is strictly controlled throughout the production.



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
---------------------	---------------	-------------	----------------

Material density	1,07 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792	
Melt flow index	5 g/10 min		220 °C, 10 kg
Diameter tolerance	± 0,05 mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
-----------------------	---------------	-------------	----------------

Tensile strength	40 MPa	ASTM D638	50 mm/min
Elongation at break	35 %	ASTM D638	50 mm/min
Tensile modulus	1726 MPa	ASTM D638	1 mm/min
Flexural strength	62 MPa	ASTM D790	at yield, 15 mm/min
Flexural modulus	1814 MPa	ASTM D790	15 mm/min
Izod impact strength	441 J/m	ASTM D256	23 °C, 1/8"
Rockwell hardness	92	ASTM D785	R-Scale

Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
--------------------	---------------	-------------	----------------

Heat distortion temperature	86 °C	ASTM D648	1,8 MPa
	96 °C	ASTM D648	0,45 MPa
Vicat softening temperature	94 °C	ASTM D1625	50 °C/h, 5 kg

Printing properties	Recommended	Notes
---------------------	-------------	-------

Print temperature	240-255 °C	Recommended settings! It may differ according to the printer and the object.
Hot pad	90-105 °C	Try your own settings before printing.
Bed adhesive	3Dlac, glue stick	

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.  
The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o.  
nam. Miru 1217, 768 24 Hulín  
Czech Republic

(+420) 720 060 947  
helpdesk@fillamentum.com  
www.fillamentum.com