



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

MECHANICKÉ VLASTNOSTI VELKOROZMĚROVÝCH 3D TIŠTĚNÝCH DÍLŮ

MECHANICAL PROPERTIES OF LARGE SCALE 3D PRINTED PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Strela

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Petr
Křivohlavý**

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Dominik Strela**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Křivohlavý**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Mechanické vlastnosti velkorozměrových 3D tištěných dílů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro 3D tisk velkorozměrových dílů je charakteristické využití trysek větších průměrů a vyšších vrstev pro snížení výrobního času a navýšení produktivity výroby. Pro takto tištěné díly nejsou zcela známy pevnostní charakteristiky. Je tak třeba zjistit pevnostní charakteristiky vhodných materiálů. Zároveň se předpokládá nalezení vhodných procesních parametrů pro zvýšení těchto charakteristik pro vybrané materiály pomocí robotického 3D tisku.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je zjistit pevnostní charakteristiky velkorozměrových 3D tištěných dílů a jejich porovnání s výsledky ze stolních FDM tiskáren.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešerše materiálů, mechanického testování 3D tištěných dílů,
- návrh experimentů a metodiky,
- tisk testovacích těles,
- vyhodnocení výsledků a jejich interpretace.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukoncenii/>

Seznam doporučené literatury:

ROUF, Saquib, Ankush RAINA, Mir IRFAN UL HAQ, Nida NAVEED, Sudhanraj JEGANMOHAN a Aysha FARZANA KICHLOO. 3D printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2022, roč. 5, č. 3, s. 143–158. ISSN 25425048.

DIVYATHEJ, M.V., M. VARUN a P. RAJEEV. Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016, roč. 7, č. 3, s. 116–124. ISSN 2229-5518.

DEQUIR, Francois, Kelsey PHELAN a Bryant C. HOLLINS. Mechanical strength of 3-D printed filaments. *Proceedings - 32nd Southern Biomedical Engineering Conference, SBEC 2016*. 2016, č. September, s. 47–48.

KRAJCAR, Ivo. Porovnání tahových vlastností polymerních vzorků vyrobených metodami 3D tisku na principu extruze. Brno, 2019, 62 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Škaroupka, Ph.D.

NOVOSÁD, I. Mechanické vlastnosti PLA dílů realizovaných 3D tiskem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práca je zameraná na vplyv vstupných parametrov tlače na výsledné mechanické vlastnosti výrobkov vyrobených technológiou FDM (Fused Deposition Modelling). Vzorky z materiálu PLA vyrobené pomocou robotického ramena KUKA KR8 R1620 podstúpili ťahovú skúšku, ich tvar bol navrhnutý tak aby zamedzil vplyvu nežiadúcich javov výroby na výsledky. Výsledky boli vyhodnotené a graficky znázornené. Z výsledkov vyplýva, že medzi-rastrové väzby silno oslabujú pevnosť súčasti, no mierne preplnenie výrobku materiálom pomáha utvoriť pevnejšie väzby vo výrobku. Maximálna pevnosť v ťahu bola nameraná na vzorke s najvyššími medzi-rastrovými vzdialenosťami a výškou vrstvy, s prítokom materiálu na 1,1násobku nominálnej hodnoty. Výsledky majú slúžiť ako referenčné hodnoty pre budúce skúmanie vlastností a správania výrobkov tlačených využitím trysiek s vyšším priemerom. Opisujú vplyv rastrovania výrobkov na výslednú pevnosť.

KLÍČOVÁ SLOVA

Veľkorozmerová 3D tlač, Mechanické vlastnosti, Vstupné parametre, Ťahová skúška

ABSTRACT

This study focuses on the effects of printing parameters on mechanical properties of parts manufactured with FDM (Fused Deposition Modelling) technology. Specimens made from PLA material using the KUKA KR8 R1620 robotic arm underwent tensile test, their shape was designed so to prevent effects of negative phenomena on the results. The results were evaluated and graphically shown. The results show that inter-rastral bonds intensely weaken the parts strength, however a slight material overfill helps strengthen the bonds. The highest tensile strength was measured on specimens with the largest inter-rastral distance and layer height, with 1,1 as the coefficient of material flow. The results of this study should serve as reference values for future research of properties and behaviours of parts printed using nozzles of larger diameter. They describe the impact of rasterizing products on the final strength.

KEYWORDS

Large-Scale 3D printing, Mechanical properties, Printing parameters, Tensile test

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STRELA, Dominik. *Mechanické vlastnosti velkorozměrových 3D tištěných dílů*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157753>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Petr Křivohlavý.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto mieste by som rád poďakoval svojmu vedúcemu práce pánovi Ing. Petrovi Křivohlavému za jeho úžasný prístup a ochotu pomôcť vždy, keď som to potreboval. Ďalej by som chcel poďakovať svojej rodine za silnú podporu pri štúdiu.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že bakalársku prácu som vypracoval samostatne, pod odborným vedením Ing. Petra Křivohlavého. Súčasne prehlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal sú správne citované v zozname použitých zdrojov.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	12
2.1	Aditívna technológia výroby	12
2.1.1	Proces výroby 3D tlačeného výrobku	12
2.1.2	Fused deposition modeling FDM	13
2.1.3	Stereolitografia SLA	13
2.1.4	Selective Laser Sintering SLS	14
2.1.5	Binder jetting	15
2.2	Materiály filamentov pre 3D tlač pomocou FDM	15
2.2.1	ABS	15
2.2.2	PLA	16
2.2.3	PETG	16
2.2.4	ASA	16
2.2.5	TPE	16
2.2.6	CPE	17
2.2.7	NonOilen®	17
2.3	Konfigurácia FDM tlačiarne	18
2.3.1	Kartézská 3D tlačiareň	18
2.3.2	FDM tlačiareň typu delta	18
2.3.3	Polárna 3D tlačiareň	18
2.3.4	Robotické ramená	18
2.4	Parametre 3D tlače	19
2.4.1	Teplota extruderu	19
2.4.2	Orientácia súčasti	20
2.4.3	Uhol rastru	20
2.4.4	Výška vrstvy	21
2.4.5	Počet obrysových vrstiev	22
2.4.6	Vzor výplne	22
2.4.7	Hustota výplne	23
2.4.8	Rýchlosť tlače	24
2.4.9	Air gap	25
2.4.10	Flow rate	25
2.5	Tvorba nechcených koncentrátorov napätia	26
2.6	Veľkorozmerová výroba	27
2.6.1	Efektívne tavenie extrudovaného materiálu	27

2.6.2	Kontrola okolitej teploty	27
2.6.3	Hmotnosť materiálu	27
2.7	Porozita pričného prierezu	28
2.7.1	Druhy kavít	28
2.7.2	Vplyv kavít na mechanické vlastnosti	29
2.7.3	Vyhodnocovanie porozity	29
2.7.4	Predohrev dráhy	29
2.7.5	Ohrev po dokončení tlače	29
2.7.6	Alternujúca výška vrstvy	30
2.8	Ťahová skúška	30
2.8.1	Výstup ťahovej skúšky	31
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	32
3.1	Analýza problému	32
3.2	Cíl práce	32
4	MATERIÁL A METODY	33
4.1	Materiál	33
4.2	Návrh experimentu	33
4.2.1	Podmienky pre validitu experimentu	33
4.2.2	Návrh vzoriek	34
4.2.3	Vstupné parametre	35
4.3	Príprava vzoriek	36
4.3.1	Algoritmické modelovanie	37
4.4	Ťahové skúšky	39
4.4.1	Vyhodnocovanie	40
4.4.2	Priebeh skúšok	40
5	VÝSLEDKY	41
6	DISKUZE	47
6.1	Interpretácia výsledkov	47
6.2	Nedostatky tlače	47
6.2.1	Vibrácie tlačovej hlavy	47
6.2.2	Poloha vzorku	48
7	ZÁVĚR	49
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	50

9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	53
9.1	Zoznam použitých skratiek	53
9.2	Zoznam použitých veličín	54
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	55
11	SEZNAM TABULEK	57
12	SEZNAM PŘÍLOH	58

1 ÚVOD

3D tlač sa v dnešnej dobe dostáva stále viac a viac do popredia výrobného priemyslu. Od dekoratívnych prvkov vyrobených doma, prototypov až po funkčné súčasti strojov sa táto metóda výroby neustále vyvíja a zlepšuje. Vďaka jednoduchému princípu a cenovej dostupnosti je pre trh najatraktívnejšou technológiou metóda FDM (Fused Deposition Modeling). Využitelnosť výrobkov zostrojených touto technológiou v strojnom priemysle často závisí na ich mechanických vlastnostiach. Kým konvenčná tlač s tryskou o priemere 0,4 mm je v tomto smere široko preskúmaná aj vďaka veľkému objemu údajov a spätnej väzby od bežných užívateľov, tlač s vyšším priemerom trysky, 2-4 mm, ostáva nepreskúmaná a prakticky nedostupná pre osobné účely. Tlač s násobne vyšším priemerom trysky má mnoho výhod, no hlavne urýchľuje výrobu a umožňuje výrobu väčších súčastí dokonca nábytku a pod.

Táto práca je zameraná na mechanické vlastnosti, reprezentované medzou pevnosti v ťahu, vzoriek vyrobených technológiou FDM pomocou robotického ramena s extrudérom. Pevnosť vzoriek z materiálu PLA bude vyhodnocovaná v závislosti na rozmeroch siete rastrovania a na koeficiente prítoku materiálu. Práca obsahuje návrh tvaru vzoriek pre zamedzenie nežiaducich javov spätých s technológiou výroby. Práca naďalej zahŕňa výsledky skúšky pevnosti v ťahu na univerzálnom testovacom zariadení. Výsledky budú štatisticky spracované a porovnané medzi sebou. Experiment čiastočne vrhá svetlo na posiaľ málo preskúmanú problematiku veľkorozmerovej tlače.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Aditívna technológia výroby

Aditívna technológia výroby, ďalej už len ATV, je jednou z najrýchlejšie sa vyvíjajúcich metód produkcie rôznorodých súčastí a dielov. Za posledné roky sa dostala do každodenného života moderného človeka. Prenikajúc do komerčného sveta je známa pod veľkou škálou mien ako napríklad; 3D tlač, rapid prototyping (RP), layered manufacturing (LM), solid free-form fabrication (SFF). ATV je koncepčne prístup ktorý umožňuje výrobu súčastí a dielov priamo z počítačových softwarov (CAD) bez špecifických nástrojov pre rôzne tvarové prvky. Takto vyrobená súčasť môže byť použitá ako funkčný prototyp rovnako ako aj hotový výrobok. [1]

2.1.1 Proces výroby 3D tlačeného výrobku

Počítačový model z formátu konkrétneho CAD programu konvertuje do formátu STL (Standard Tessellation Language). Formát STL zaisťuje čitateľnosť súboru pre väčšinu softwarov použitých pri 3D tlači pomocou rozkladu plochy modelu na sieť trojuholníkov.

Model sa vo formáte STL nasledovne vkladá do sliceru. Slicer je program, ktorý model rozdelí na jednotlivé vrstvy a navrhne dráhu trysky 3D tlačiarne. V sliceri je možné upresniť špecifické vlastnosti tlače, ako napríklad výška vrstvy, rýchlosť trysky, teplota extrudovaného filamentu. Pre previsy a nedostatočne podopreté prvky je v sliceri možné navrhnuť vlastné alebo upraviť automaticky vygenerované podpory. Výstupom sliceru je väčšinou súbor nazývaný GCode, ktorý obsahuje údaje o dráhe a nastaveniach trysky zo sliceru.

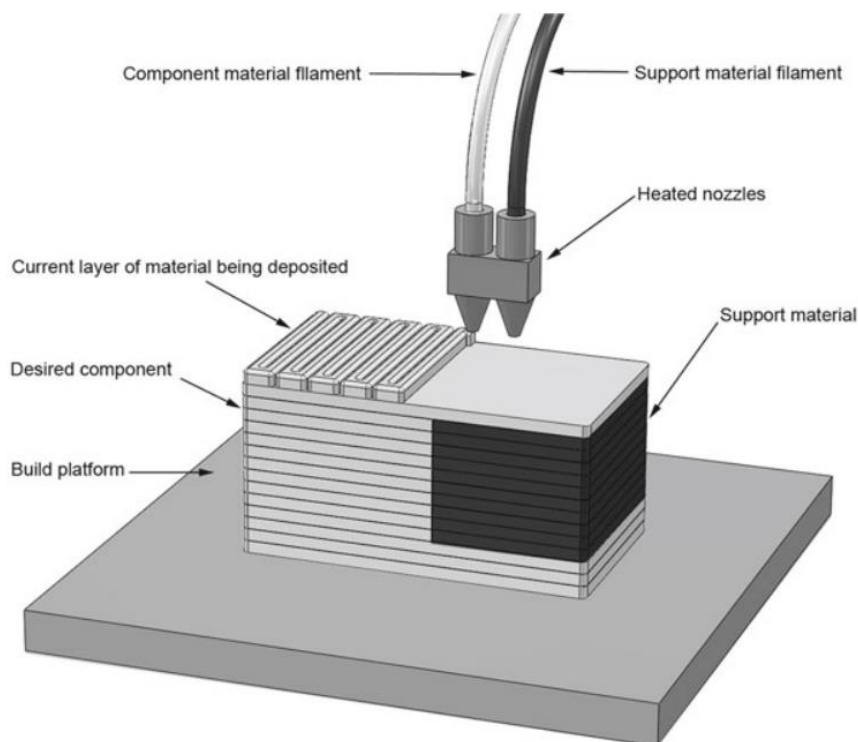
Po spustení tlače s vytvoreným súborom dráhy je proces zväčša automatizovaný prístrojom. Samotná tlač sa uskutočňuje v rôznych formách, najčastejšie z nich sú ďalej uvedené.[2] [1]



Obr. 2-1 Konverzia modelu na sieť trojuholníkov [1]

2.1.2 Fused deposition modeling FDM

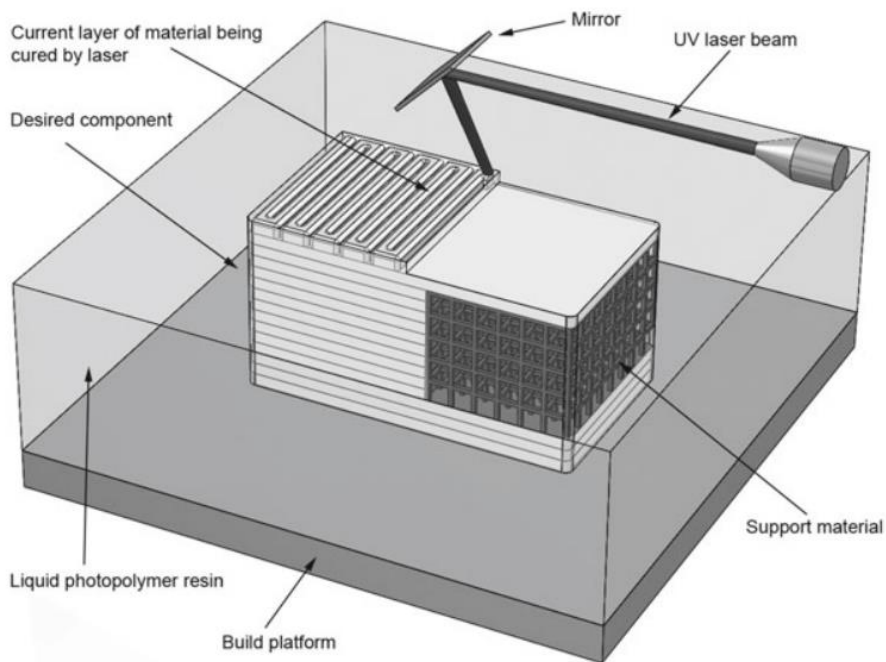
FDM je najbežnejšou metódou, ktorá využíva vytlačanie jemného vlákna materiálu, bežne polyméru. Toto vlákno, nazývané filament, je vytlačané cez trysku ktorá materiál ohrieva na požadovanú teplotu. Tryska nasleduje predom určenú dráhu, po dokončení vrstvy sa tryska posunie o vrstvu vyššie a začne nanášať ďalšiu vrstvu filamentu. Po dokončení súčasti sa podpory jednoducho odlomia, poprípade odrežú. Hlavnými nevýhodami metódy FDM sú nízka pevnosť v ťahu v smere kolmom na vlákna súčasti a kvalita povrchu. Medzi výhody patria jednoduchosť, cenová dostupnosť a škála využiteľných materiálov.[2]



Obr. 2-2 Schéma výroby pomocou FDM [2]

2.1.3 Stereolitografia SLA

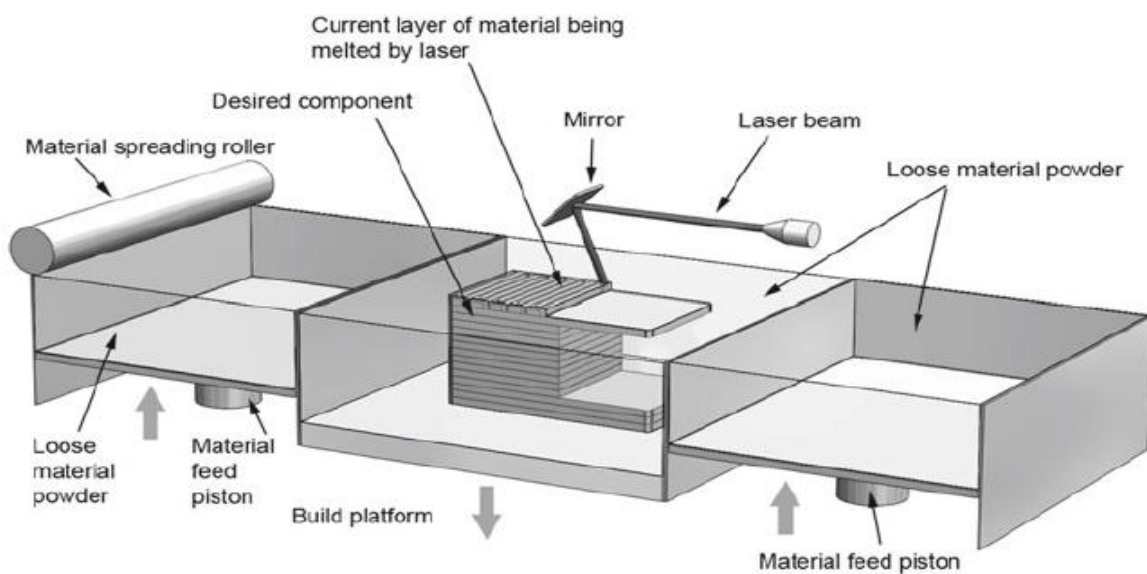
Vyvinutá ako prvá metóda 3D tlače, ako stavebný materiál využíva tekutú živicu ktorá tuhne pod lúčom laseru. Podložka je pokrytá jemnou vrstvou tekutej živice, na ktorej laser vytuhne požadovaný tvar vrstvy. Nasledovne sa podstava ponorí hlbšie do živice o zlomok milimetra a začína sa tvoriť nová vrstva. Proces vrstvenia sa môže diať aj opačne, v tom prípade je súčasť nad laserom ktorý na ňu vysiela lúče cez sklo, súčasť je v tomto prípade vyťahovaná podložkou smerom nahor a živica vyplní priestor medzi súčasťou a sklom. Súčasť môže byť vyrobená z vrchu alebo zospodu. Medzi výhody patria: hladký povrch, možnosti materiálov. Nevýhodami sú napr.: potreba podpor, mechanické vlastnosti.[2]



Obr. 2-3 Schéma výroby pomocou SLA [2]

2.1.4 Selective Laser Sintering SLS

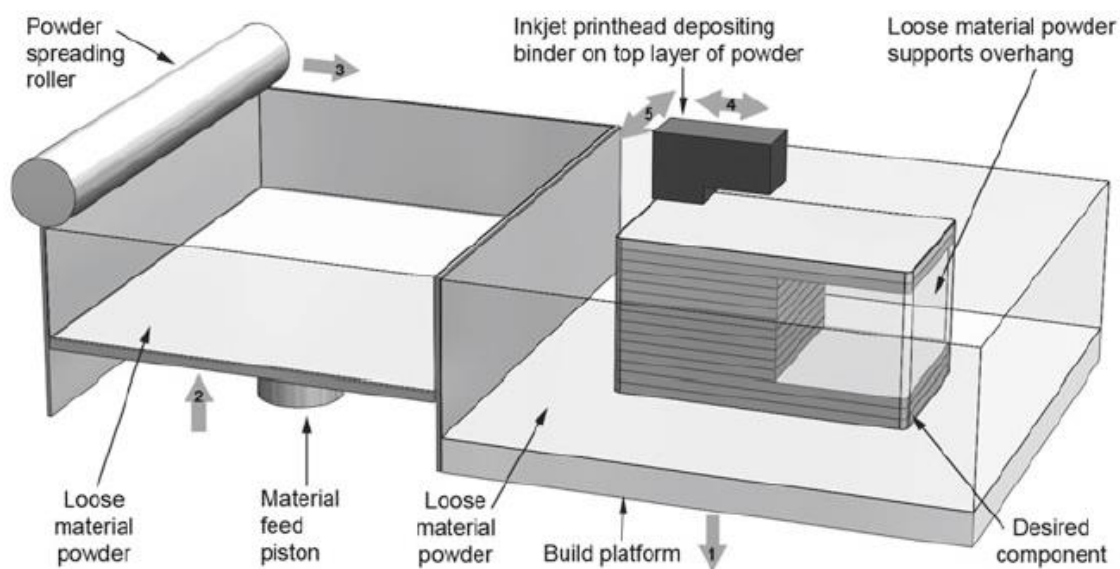
Technológia pracuje na báze spekania práškov pomocou laserových lúčov. Na podstavu sa nasype jemná vrstva prášku stavebného materiálu na ktorej sa pomocou laseru a zrkadiel speká dráha jednej vrstvy. Nasledovne sa podstava o výšku vrstvy zníži a nanesie sa nová tenká vrstva jemného prášku pripravená na spekanie. Výrobok nepotrebuje podpory a technológiou je možné vytvárať aj kovové súčasti [2]



Obr. 2-4 Schéma výroby pomocou SLS [2]

2.1.5 Binder jetting

Podobne ako pri technológii SLS sa na pohyblivú podstavu nanáša tenká vrstva jemného prášku stavebného materiálu no miesto spekania sa na dráhu vrstvy vstrekuje tekuté spojivo. Po zaschnutí spojiva zmes tuhne. Touto technológiou je možné vytvárať previsy aj bez podpôr. [2]



Obr. 2-5 Schéma výroby pomocou technológie Binder jetting [2]

2.2 Materiály filamentov pre 3D tlač pomocou FDM

Technológia FDM umožňuje použitie škály materiálov s pomerne širokým radom mechanických vlastností. Táto práca sa venuje predovšetkým využitiu polymérových filamentov.

2.2.1 ABS

Akrylonitril-butadién-styrén alebo ABS je jeden z najstarších polymérov so širokým využitím vo sfére 3D tlače, je stále veľmi rozšírený vďaka jeho nízkej cene a vysokej pevnosti, najznámejšie zastúpený je v stavebných kockách od spoločnosti LEGO. ABS má vysokú teplotu skleneného prechodu, preto si svoju pevnosť udržiava aj pri vyšších teplotách. Tento materiál je vhodný aj pre exteriérové použitie vďaka odolnosti proti UV žiareniu. Pri tlači z ABS je odporúčaná ventilácia škodlivých výparov. Materiál je náchylný aj na tzv. warping, čo znamená že sa pri rýchlom chladnutí sťahuje a krúti. [3][4]

Teplota podložky: 95-110 °C, Teplota extruderu: 220-250 °C, Hustota: 1,04 g/cm³
Cena: 10-35 €/kg, Medza pevnosti: 39 MPa [3]

2.2.2 PLA

Kyselina polymliečna alebo PLA je jeden z najpopulárnejších materiálov pri domácej 3D tlači. Ako veľmi enviromentálne šetrný a cenovo dostupný zaujíma širokú škálu využití s vysokou kvalitou tlače. PLA je pomerne tuhá a trvanlivá, no náchylná predovšetkým na tečenie pri pomalom chladnutí a stráca svoju húževnatosť po vystavení dlhodobému UV žiareniu. Ďalšou výhodou tohto materiálu je možnosť tlače bez výhrevnej podložky. [3][4]

Teplota podložky: 45-60 °C, Teplota extruderu: 190-220 °C, Hustota: 1,24 g/cm³
Cena: 10-35 €/kg, Medza pevnosti: 60 MPa [3]

2.2.3 PETG

Polyetylén-tereftalátu glykol PETG je polotuhý materiál s vysokou húževnatosťou, náchylný na povrchové poškodenia, pri tlači chladne efektívne a sťahuje sa len minimálne. PETG zachováva svoju pevnosť aj pri vyšších teplotách, v kyselinách, zásadách aj alkohole. Nehodí sa na jemnú tlač, zanecháva na povrchu tenké vlákna filamentu, vyžaduje podpory aj na menšie previsy. [3][4]

Teplota podložky: 75-90 °C, Teplota extruderu: 230-250 °C, Hustota: 1,27 g/cm³,
Cena: 20-60 €/kg, Medza pevnosti: 50 MPa [3]

2.2.4 ASA

Akrylonitril styren akrylát alebo ASA vyvinutý ako náhrada ABS no s ešte vyššou odolnosťou proti UV žiareniu. Má rovnaké komplikácie pri tlači ako jeho predchodca (vysoká teplota, warping, škodlivé výpary), no ešte vyššiu tuhosť. Zlepšenie vlastností sa odzrkadľuje na jeho cene. [3][4]

Teplota podložky: 90-110 °C, Teplota extruderu: 220-245 °C, Hustota: 1,04 g/cm³,
Cena: okolo 35 €/kg, Medza pevnosti: 40 MPa [3]

2.2.5 TPE

Ide o triedu termoplastických elastomérov. Mieru elasticity udáva až špecifický typ elastoméru, a to od čiastočne pružných až po úplne elastické. Skvelo tlmia rázy, majú dlhú životnosť, no tlač je obťažnejšia. Elastoméry zle premostujú previsy, môžu tvoriť nežiadúce vlákna a bubliny, vyžadujú si priamy podávací systém do extruderu a pomalšiu rýchlosť tlače. [3][4]

Teplota podložky: 45-60 °C, Teplota extruderu: 225-245 °C, Hustota: 1,15-1,25 g/cm³,
Cena: 25-60 €/kg, Medza klzu: 5 MPa [3]

2.2.6 CPE

Filament z co-polyesteru je vhodný pre technické využitie vďaka jeho vysokej pevnosti, rovnako ako nárazovej húževnatosti. Vykazuje podobné pevnostné charakteristiky ako PETG, no prekonáva ho v chemickej odolnosti. CPE je taktiež recyklovateľné. [3][4]

Teplota podložky: 70-85 °C, Teplota extruderu: 255-275 °C, Hustota: 1,25 g/cm³, Cena: 40-60 €/kg, Medza pevnosti: 47 MPa [3]

2.2.7 NonOilen®

Materiál vyvinutý a optimalizovaný pre technológiu 3D tlače. Vykazuje skvelú tepelnú odolnosť, pružnosť a tvrdosť. NonOilen® je možné niekoľko-násobne recyklovať bez straty jeho mechanických vlastností. Materiál má značne vylepšenú biologickú rozložiteľnosť, pri kompostovaní sa rozkladá na humus. Cena za skvelé vlastnosti je nízka chemická odolnosť hlavne voči acetónu. [3]

Teplota podložky: 0-50 °C, Teplota extruderu: 175-195 °C, Hustota: 1,27 g/cm³, Cena: 45-60 €/kg, Medza pevnosti: 38,6 MPa [3]

Konkrétne hodnoty od dodávateľa Fillamentum

Tabuľka 2-1 Súhrn vlastností materiálov

Názov materiálu	Nutnosť podložky	Teplota extruderu [°C]	Hustota [g/cm ³]	Cena [€/kg]	R _m [MPa]
ABS	áno	235	1,04	20	39
PLA	nie	205	1,24	20	60
PETG	áno	240	1,27	40	50
ASA	áno	230	1,04	35	40
TPE	áno	235	1,20	45	-
CPE	áno	265	1,25	50	47
NonOilen®	nie	185	1,27	50	39

2.3 Konfigurácia FDM tlačiarne

FDM tlačiarne sa bežne klasifikujú do štyroch rôznych konfigurácií podľa súradnicových systémov s ktorými pracujú.

2.3.1 Kartézska 3D tlačiareň

Najbežnejšie používaný typ FDM tlačiarne používa kartézsky súradnicový systém. Podložka je obdĺžnikového alebo štvorcového tvaru, pracovný objem je v tvare kváдру. Tlačiareň používa tri, na seba kolmé súradnice X, Y a Z. Pre pohyb v týchto súradniciach sa pohybuje buď len tlačová hlava, alebo tlačová hlava s podložkou navzájom. [5]

2.3.2 FDM tlačiareň typu delta

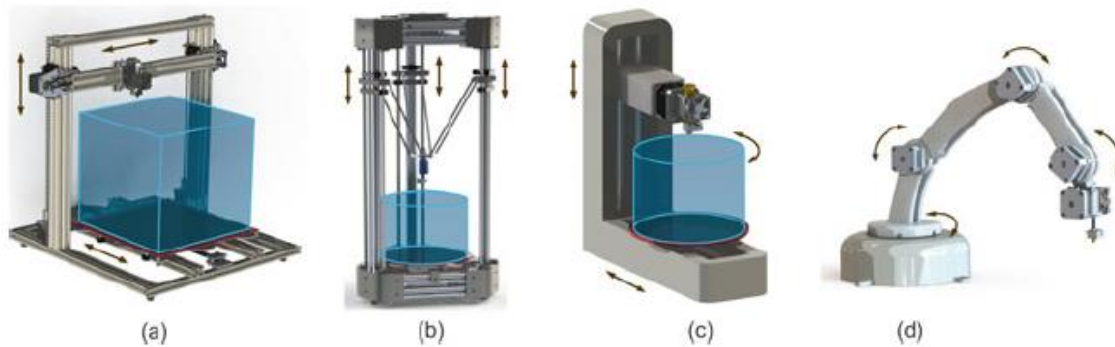
Konfigurácia delta typicky pozostáva z troch ramien pripevnených ku tlačovej hlave v trojuholníkovom rozložení. Koordinovaný pohyb týchto ramien zaisťuje zmenu pozície tlačovej hlavy nad podložkou, podložka sa nehýbe a je v tvare kruhu. Pracovný objem je cylindrický a často zaberá len zlomok objemu celej tlačiarne. Tento typ tlačiarne je lacný a rýchly, no za cenu presnosti tlače oproti kartézskej konfigurácii. [5]

2.3.3 Polárna 3D tlačiareň

Využíva polárne súradnice, pozícia je v horizontálnej rovine definovaná vzdialenosťou od stredu a referenčným uhlom a vertikálne výškou tlačovej hlavy. Referenčný uhol a vzdialenosť od stredu sa typicky reguluje pohybom podložky a výška pohybom tlačovej hlavy. Podložka je okrúhla a tvar pracovného objemu je cylindrický. [5]

2.3.4 Robotické ramená

Robotické ramená s tlačovou hlavou sa zatiaľ využívajú hlavne v priemysle. Vyznačujú sa svojou rýchlosťou a schopnosťou tvoriť komplexnú geometriu. Sú najdrahším variantom FDM tlačiarne. Ich pracovný objem však preyšuje objem samotného prístroja, preto sú schopné tlačiť veľkorozmerné súčasti a výrobky v prijateľnom priestore. [5]



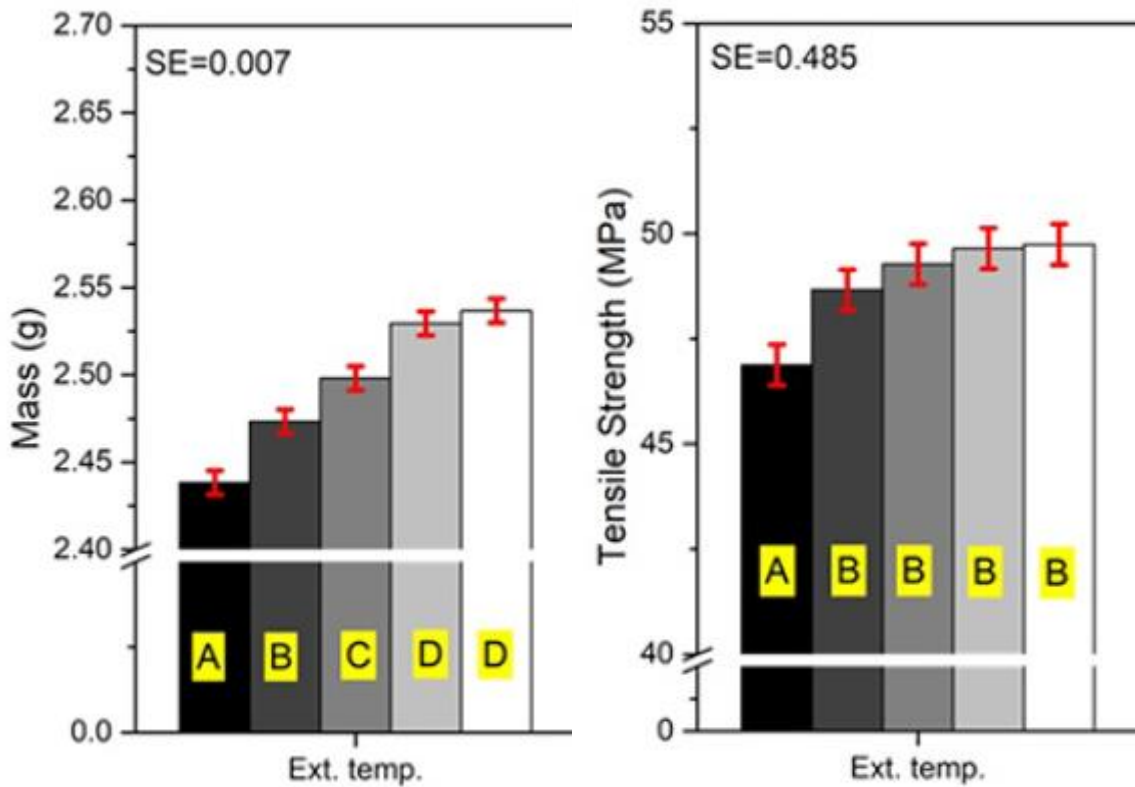
Obr. 2-6 Schématické konfigurácie tlačiarní FDM (a) kartézska, (b) delta (c) polárna a (d) robotické rameno [5]

2.4 Parametre 3D tlače

Ešte pred samotnou tlačou je potrebné nastavenie početných parametrov podľa ktorých sa tlač vykoná. Väčšina týchto parametrov má značný vplyv na mechanické vlastnosti výrobku, ich optimalizácia zohráva veľkú rolu na životnosť a funkčnosť.

2.4.1 Teplota extruderu

Teplota extruderu patrí medzi najkritickejšie parametre tlače, priamo ovplyvňuje vytekanie filamentu z trysky. Pri nízkych teplotách spôsobuje upchávanie trysky a nedostatočné zlúčenie jednotlivých vrstiev medzi sebou. Príliš vysoká teplota naopak znižuje viskozitu polyméru, čo spôsobuje tečenie, degradáciu materiálu a zväčšuje vplyv teplotnej rozťažnosti materiálu na finálny produkt. [5] Tečením materiálu pri vyšších teplotách sa do stavebného objemu vkladá viac materiálu, do pracovného objemu sa tak ukladá viac materiálu dôsledkom čoho je vyššia hmotnosť a rovnako aj vyššia pevnosť hlavne v ťahu. Tento jav je experimentálne dokázaný na vzorku z PLA, graf skúšky ťahu pri rôznych teplotách extruderu na obrázku 2-7. [6] Ďalší spôsob akým môže teplota extruderu vplývať na pevnosť materiálu je pri tvorbe väzieb medzi jednotlivými vláknami. Počnúc nízkymi teplotami kde sa vlákna až dotýkajú až po teploty pri ktorých sa difúzne prepletajú polyméry medzi jednotlivými vláknami. [7] Vďaka teplotnému sťahovaniu materiálov na rozhraniach medzi rastrami môžu vznikáť kavity, ktoré akumulujú napätie. Pri vysokých teplotách je pozorovaná strata pravidelného vzoru rastru a vznik už spomenutých kavít.[8]



Obr. 2-7 Grafická závislosť hmotnosti a pevnosti v ťahu v závislosti na teplote extrudera (190-230°C) [6]

2.4.2 Orientácia súčasti

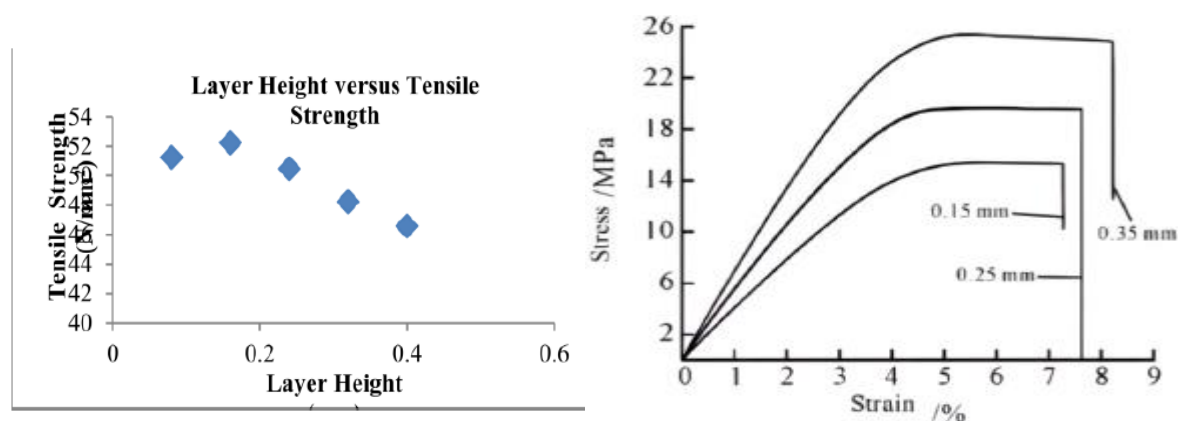
Okrem objemu podporného materiálu vplýva aj na pevnostné charakteristiky v rôznych smeroch. Súčasť je najpevnejšia pozdĺž vlákien, na rozhraní jednotlivých vlákien je pevnosť omnoho nižšia, preto je dôležité aby plochy vrstiev súhlasili s najviac namáhaným smerom. [5]

2.4.3 Uhol rastru

Pojmom uhol rastru označujeme uhol medzi X-ovou súradnicou podložky a hlavným smerom ukladania jednotlivých vlákien. Spolu s orientáciou súčasti určujú smer v ktorom je súčasť najpevnejšia. [5][6]

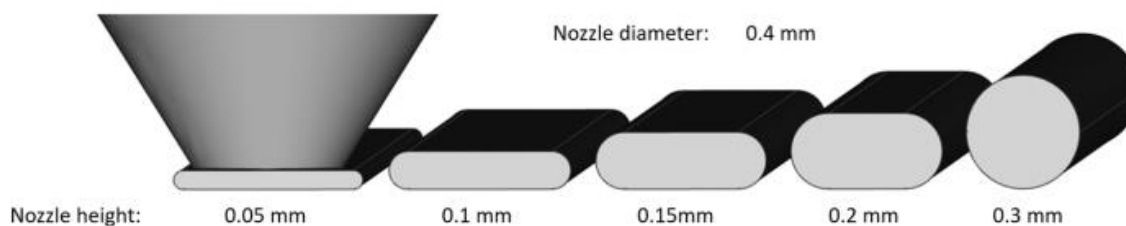
2.4.4 Výška vrstvy

Výška vrstvy sa označuje výšku jednej nanesej vrstvy na plochu tlače, typicky v smere osi Z. Priamo vplýva na kvalitu povrchu a dobu tlače. Pri malých výškach vrstvy je povrch jemnejší a presnejší, za cenu dlhšej tlače. [5] Výška vrstvy ovplyvňuje aj pevnostné charakteristiky. Táto závislosť sa nedá jednoducho vyjadriť, vplýva na ňu mnoho faktorov, najmä póry vzniknuté medzi vrstvami a jednotlivými rastrami. Obsah efektívneho prierezu tak s rastúcou výškou klesá a obsah kavít naopak rastie. Experimentálne výsledky sa často navzájom nezhodujú a pracujú len s rozsahom od $0,08\text{ mm}$ po $0,4\text{ mm}$, ako je vidieť na obrázkoch nižšie. [9] [10] Výška vrstvy je v nepriamo úmernom vzťahu s dobou tlače, čo vplýva nie len na výrobný čas, ale rovnako aj na termodynamické deje pri výrobe. Tenšie vrstvy zabezpečujú prívetivý teplotný gradient, ktorý pomáha vytvoriť dobré podmienky pre difúzne procesy medzi jednotlivými rastrami, čo na koniec zlepšuje mechanické vlastnosti vyrobenej súčasti. Tento trend je ešte možné posilniť nízkou rýchlosťou tlače.[11]



Obr. 2-8 porovnanie dvoch ťahových skúšok s variabilnou výškou vrstvy [9] [10]

Výšku vrstvy ovplyvňuje najmä výška trysky. Výškou trysky sa označuje vzdialenosť medzi koncom trysky extruderu a plochou na ktorú sa stavebný materiál ukladá. Tento parameter ovplyvňuje najmä profil priečného rezu rastrov pokladaného materiálu, zobrazené na diagrame na obr. 2-9. Pri malej vôli dochádza k stlačovaniu rastra pri ktorom sa jeho profil ťahá do strán a vyplňa tak lepšie pracovný priestor za cenu výšky vrstvy. Zvyšovaním tejto medzery sa profil zaobljuje, až kým sa z neho stáva kružnica pri asi 75 až 80% priemeru trysky.[12] Zmenou tvaru dochádza k zníženiu kontaktnej plochy s vrstvami pod a nad rastrom, rovnako klesá aj tlak aplikovaný extruderom na raster. Všetko spomenuté redukuje schopnosť rastrov viazať sa medzi sebou a tvoriť tak pevné celistvé súčasti.[13]



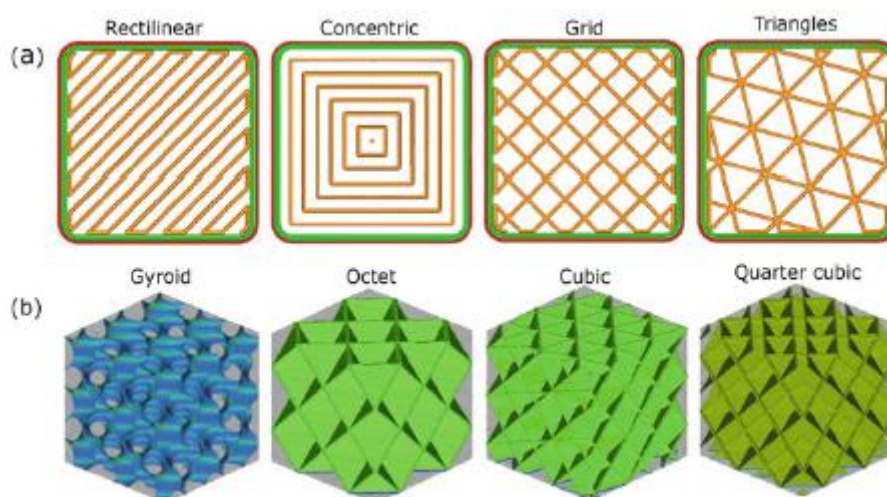
Obr. 2-9 Profily rastrov v priečnom reze pri rôznych výškach trysky o priemere 0,4mm [12]

2.4.5 Počet obrysových vrstiev

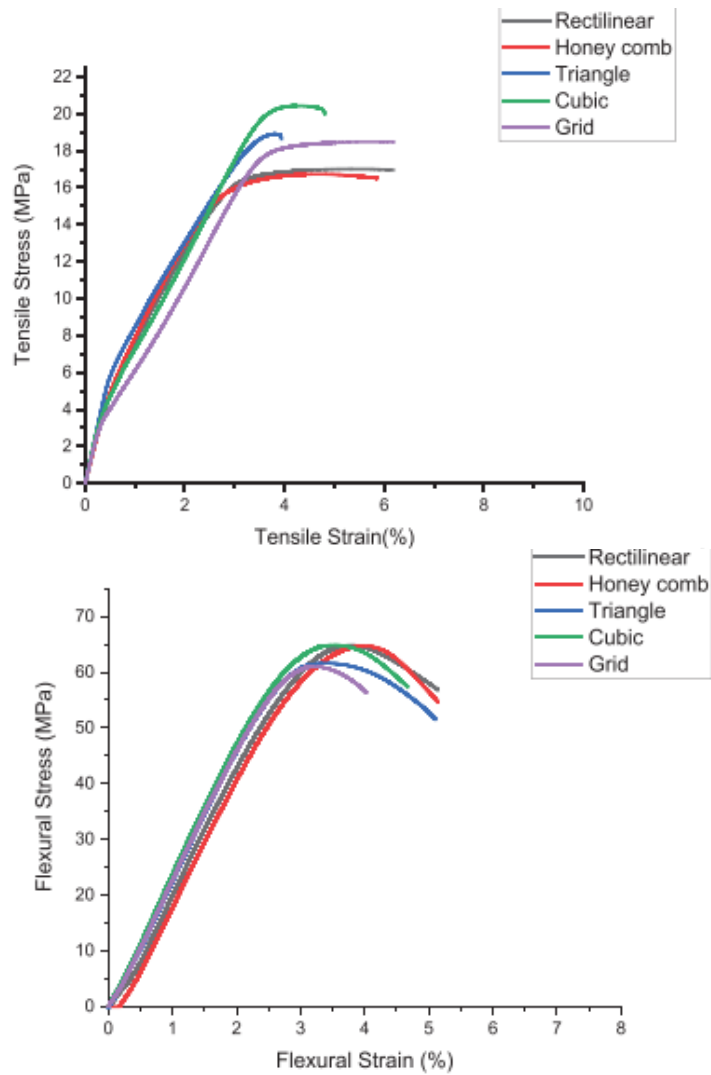
Označuje hrúbku vonkajších stien výrobku počtom vrstiev na obvode. Veľmi značne vplýva na pevnostné charakteristiky výrobku vo všetkých smeroch. [5]

2.4.6 Vzor výplne

Za účelom šetrenia času a materiálu sa zvyčajne súčasti FDM netlačia vyplnené, tlačia sa s pórovitou vnútornou štruktúrou, ktorá sa nazýva infill alebo výplň. Vzor výplne sa volí podľa času tlače, pevnosti a ohybnosti vyžadované od vyrábanej súčasti. Škála vzorov je dostupná priamo v slicer softwaroch. Najbežnejšie používané vzory sú zobrazené na obrázku nižšie. [5] Rôzne vzory majú svoje špecifické pevnostné charakteristiky, čo znamená, že niektoré sú pevnejšie v ohybe niektoré zas v ťahu, vyobrazené na grafoch nižšie. Výber správneho vzoru výplne závisí taktiež na jeho hustote.[14]



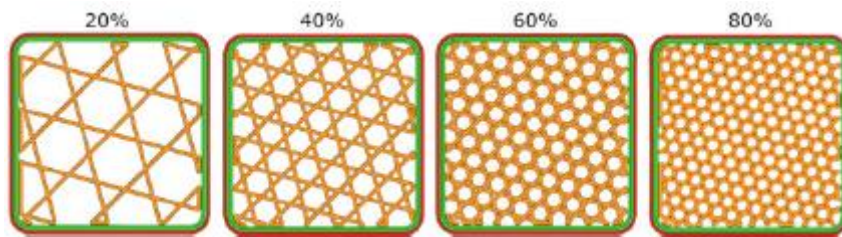
Obr. 2-10 Bežné vzory výplne dostupné v slicer softwaroch (a) 2D vzory (b) 3D vzory [5]



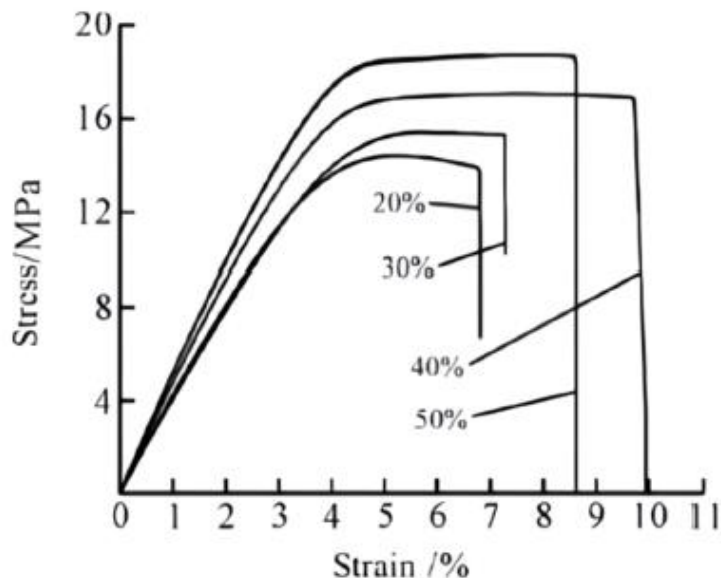
Obr. 2-11 výsledky ťahovej skúšky (hore) a skúšky namáhania v ohybe (dole) s rôznymi vzormi výplne [14]

2.4.7 Hustota výplne

Definuje percento objemu výrobku vyplnené materiálom výplne. Pohybuje sa v škále od 0% (úplne duté) až po 100% (plné). Vyššia hustota výplne má na svedomí vyššiu pevnosť a zároveň vyššiu hmotnosť a spotrebu materiálu. [5] V skúškach pevnosti je prirodzene pevnejšie teleso s vyššou výplňou, vďaka zvýšeniu hustoty a plochy efektívneho prierezu, čím sa zvyšuje potrebná sila na jeho natiahnutie a stlačenie. Výsledky zo skúšky ťahom podľa amerických noriem ASTM uvedené na obrázku nižšie. [10]



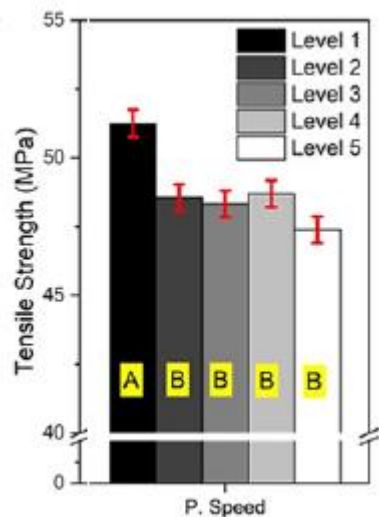
Obr. 2-12 Vyobrazenie rôznych hodnôt hustoty výplne [5]



Obr. 2-13 Výsledky ťahovej skúšky s rôznymi hodnotami hustoty výplne [9]

2.4.8 Rýchlosť tlače

Rýchlosťou tlače odkazujeme na rýchlosť ktorou sa pokladá filament do vrstvy. Rýchlosť tlače priamo vplyva na dobu tlače. Vyššou rýchlosťou sa doba tlače skracuje za cenu nižšej presnosti, ktorá je spôsobená trhavým pohybom tlačovej hlavy. [5] Tento trhavý pohyb spôsobuje tvorbu kavit v objeme, v ktorých sa nasledovne koncentruje napätie. Pri zvýšení rýchlosti tlače je potrebné pokladať vyšší objem filamentu. Tento zvýšený dopyt niektoré typy podávačov nezvládajú pre elastické vlastnosti filamentov, vďaka čomu sa do pracovného objemu ukladá menej filamentu, vlákna sú užšie a pevnostné charakteristiky slabnú. Výsledky experimentu na obrázku nižšie s materiálom PLA pri ťahovej skúške to potvrdzujú. [6]



Obr. 2-14 Závislosť pevnosti v ťahu na rýchlosti tlače (30-90 mm/s) [6]

2.4.9 Air gap

Pojmom air gap odkazujeme na medzeru medzi dvoma susednými vláknami v jednej vrstve. Pri nulovej medzere sa vlákna dotýkajú, pri zápornej sa vlákna prekrývajú. Bežne je záporný air gap preferovaný pre zlepšenie mechanických vlastností za cenu dlhšej tlače. [5] V praxi sa ale znížením tohto parametra zhoršuje schopnosť odovzdávať rovnomerne teplo pri chladnutí, vznikajú malé oblasti s nedokonalosťami, ktoré akumulujú napätie. Na druhú stranu vysoký air gap spôsobuje, že jednotlivé rastre ležia ďalej od seba, znižuje sa hustota a pevnosť výrobku. [15] Je taktiež dokázané, že pri nízkej vzdialenosti od seba sa tvar prierezu jednotlivých vlákien mení z elipsy na obdĺžnikový. Tento jav napomáha eliminácii kavít v priereze výrobku, čo zlepšuje jeho mechanické vlastnosti. [16]

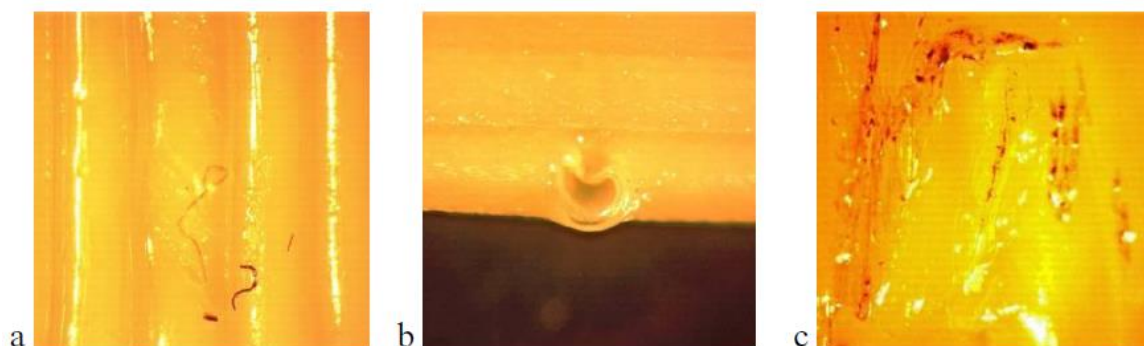
2.4.10 Flow rate

Parameter Flow rate opisuje prítok stavebného materiálu do pracovného objemu, priamo ovplyvňuje šírku rastru. Pri nesprávnom nastavení dochádza ku tvorbe kavít alebo nepresností rozmerov. Správne hodnoty tohto parametru závisia hlavne na výške vrstvy. Nízkym prítokom sa medzi rastrami tvoria medzery, ktoré znižujú celkovú pevnosť. Na druhú stranu príliš vysokým prítokom sa jednotlivé vlákna môžu prekrývať, čo spôsobuje zvýšené rozmery.[8]

2.5 Tvorba nechcených koncentrátorov napätia

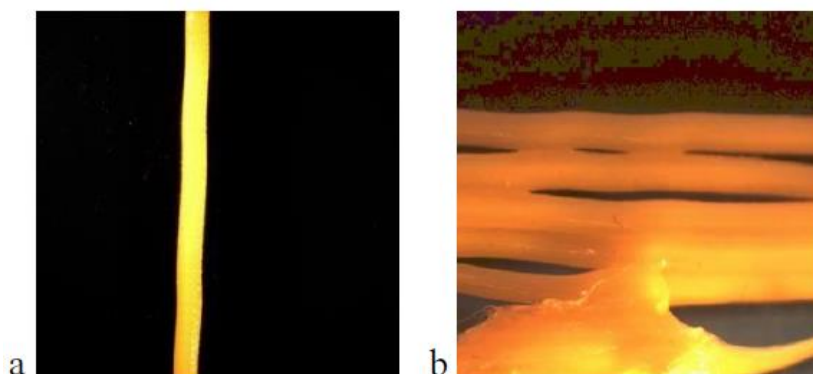
Pri výrobe technológiou 3DP sa vo fabrikáte môže nachádzať škála defektov, ktoré vedú k zhoršeným mechanickým vlastnostiam. Ich minimalizácia je často jeden z dôležitých faktorov, nie len pre pevnosť, ale aj pre tvarovú presnosť. Väčšine druhov chýb je možné predísť pomocou experimentálneho doladenia vstupných parametrov tlače.[17]

Prvým zástupcom sú tzv. mikro-defekty, ktoré narúšajú integritu jednotlivého vlákna. Najčastejšie z nich sú nižšie znázornené: vzduchové bubliny, spálená časť vlákna a kontaminácia iným materiálom. Okrem kontaminácie materiálov je možné zamedziť ich výskyt znížením teploty extrúzie a zlepšením rovnomerného chladenia už uloženého materiálu. Pre elimináciu kontaminácie je potrebná čistota trysky, pracovného objemu a podložky.[17]



Obr. 2-15 Mikro-defekty (a) spálený materiál (b) vzduchová bublina (c) kontaminácia iným materiálom [17]

Ďalej pri 3DP dochádza k plošným poruchám, oslabujúcim celú vrstvu, resp. jej prierez. Hlavnými chybami sú taktiež nižšie znázornené iregularity priemeru, ohyb filamentu alebo nedostatočné materiálové väzby. Plošným poruchám sa dá zamedziť rovnou podložkou a návrhom správnej trajektórie trysky. Opäť je dôležitým faktorom aj správne chladnutie uloženého filamentu, hlavne pri paralelnom ukladaní filamentov vedľa seba. [17]



Obr. 2-16 Plošné poruchy (a) nestály priemer a ohnutý filament (b) nedostatočné materiálne väzby [17]

2.6 Veľkorozmerová výroba

Technológia 3D tlače sa neustále vyvíja a zlepšuje v kvalite a presnosti, no často čelí neoddeliteľným prekážkam pri fyzickom zväčšovaní výroby. Jednou z hlavných výziev naďalej ostáva optimalizácia veľkorozmerovej výroby pre priemyselné aplikácie. Výsledky testovania trysok s veľkým priemerom poukazujú na problémy, ktoré sa pri bežnej tlači nevyskytujú. Veľkorozmerová tlač má potenciál posunúť výrobný priemysel umožnením výroby lacných prototypov v plnej veľkosti. [18]

2.6.1 Efektívne tavenie extrudovaného materiálu

Kľúčovým komponentom 3D tlačiarne je tzv. hot end, ktorý je zodpovedný za tavenie a nasledovné ukladanie materiálu do pracovného priestoru. Filament je tam nahrievaný prostým vedením tepla, čo typicky znamená, že dochádza ku kontaktu. Pri konvenčnej výrobe dopomáha ohrevu proces zužovania filamentu pokračujúceho do trysky, pri tryskách s väčším priemerom k tomuto zužovaniu ale nedochádza, čo má za následok zhoršenie vedenia tepla cez väčší priemer. Pre zlepšenie tavenia filamentu je potrebné spomaliť rýchlosť tlače, nakoľko teplota ohrevu je často limitovaná materiálom a výkonom. Nedostatočné roztavenie filamentu vedie k chabej príľnavosti, tvorbe koncentrátorov napätia rovnako ako k náchylnosti na warping. Jedným z riešení tejto problematiky je predĺženie výhrevného elementu, čo umožňuje dlhší a plynulejší ohrev.[18]

2.6.2 Kontrola okolitej teploty

Častým problémom veľkorozmerových výrobkov je warping počas tlače. Spôsobuje ho vnútorné napätie, ktoré okrem tvarových nepresností spôsobuje aj zníženie celkovej pevnosti. Tento problém teplotnej rozťažnosti sa pri väčších súčiastiach znásobuje. Jednou z metód pre zamedzenie je spomalenie chladenia súčasti, výsledkom čoho je možnosť pomalého uvoľnenia vnútorného napätia. Pri malých výrobkoch je jednoduchým riešením ohrev podložky, ktorá následne ohrieva okolitý vzduch. Pre veľké modely sa toto riešenie stáva nákladné.[18]

2.6.3 Hmotnosť materiálu

Pri konvenčnej tlači je nezvyčajné aby tlačенý diel presahoval hmotnosť jedného kilogramu. Vo väčšom merítke výrobky násobne túto hmotnosť prekročia, používajú sa filamentové kotúče o hmotnosti 5-10 kg, čo kladie zvýšené bremeno na podávací systém. Riešením je podávací systém na pelety, ktorý je ale taktiež ťažký a môže zosilňovať vibrácie počas tlače.[18]

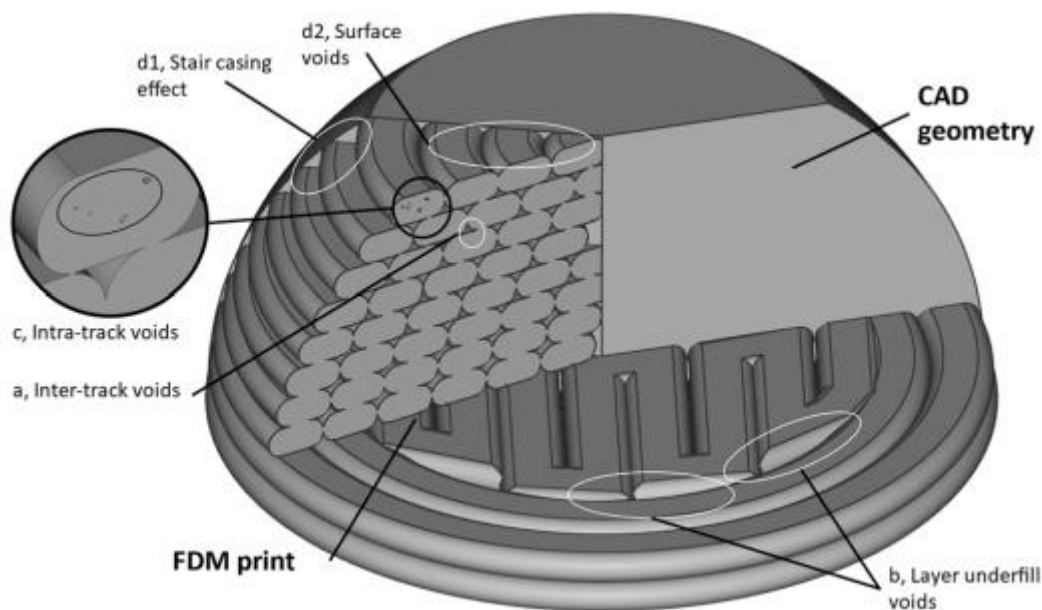
2.7 Porozita priečného prierezu

Prirodzene najvyšší vplyv na pevnosť výrobku má jeho porozita. Pri vysokom obsahu kavít prierez stráca účinnú plochu, čo ho oslabuje.

2.7.1 Druhy kavít

Pri 3D tlači ostávajú rôzne miesta nevyplnené výrobným materiálom, ich typická klasifikácia na základe polohy je naznačená na obr. 2-17.

- Medzi-rastrové kavít – vznikajú medzi jednotlivými vláknami rastrov, spôsobuje ich tvar priečného rezu rastrov a väzby medzi nimi.
- Pod-výplň – tvorí sa na miestach bez vzájomného dotyku susedných rastrov, na rozdiel od air gap-u je tento jav nežiaduci a spôsobený nesprávnou dráhou extrúzie.
- Vnútro-rastrové kavít – nachádzajú sa vo vnútri rastra, sú z pravidla menšie ako ostatné typy, spôsobuje ich sťahovanie pri rýchlom ochladzovaní alebo uväznený plyn.
- Povrchové kavít – tvoria sa na povrchu výrobku nedokonalým dosadaním rastrov vedľa seba, je možné ich minimalizovať pomocou chemickej úpravy povrchu.
- Kavít schodovitého efektu – sú špeciálnym typom povrchových kavít ktoré vznikajú nepresnosťami aproximácie zaoblenia na jednotlivé vrstvy. [12]



Obr. 2-17 Diagram druhov kavít (a) Medzi-rastrové (b) Pod-výplň (c) Vnútro-rastrové (d1) Schodovitý efekt (d2) Povrchové [12]

2.7.2 Vplyv kavít na mechanické vlastnosti

Prítomnosť kavít vplyva na širokú škálu pevnostných charakteristík vrátane pevnosti v ťahu, pevnosti v ohybe, nárazovej energii, Youngovho modulu pružnosti atď.. Analytická štúdia pokúšajúca sa vyjadriť vzťah medzi porozitou a mechanickými vlastnosťami vyniesla v závere 33 percentný nárast v Youngovom module pružnosti pri zredukovani celkového pomeru kavít o 97%. Tento teoretický objav však nebol experimentálne potvrdený. Kavity sú pri technológii FDM často rozložené nepravidelne a stávajú sa tak zdrojom anizotropie súčasti, ktorá môže spôsobovať delamináciu.[12]

2.7.3 Vyhodnocovanie porozity

Experimentálna kvantifikácia porozity FDM častí môže prebiehať deštruktívne alebo nedeštruktívne. Pri deštruktívnych inšpekciách sa zvolený prierez reže. Metóda rezu by mala byť konzervatívna hlavne tepelne, aby nedošlo k roztaveniu materiálu v mieste rezu, po ktorom by sa kavity mohli uzavrieť, či naopak otvoriť. Správna metóda rezania je kľúčová pre použiteľnosť výsledkov. Obsah kavít v už oddelenej časti je možné odčítať pomocou mikroskopie a počítačovej tomografie. Pomocou nedeštruktívnych metóda, ako napr. rádiografia a penetračné testy, sú výsledky presnejšie, no o mnoho drahšie. [12]

2.7.4 Predohrev dráhy

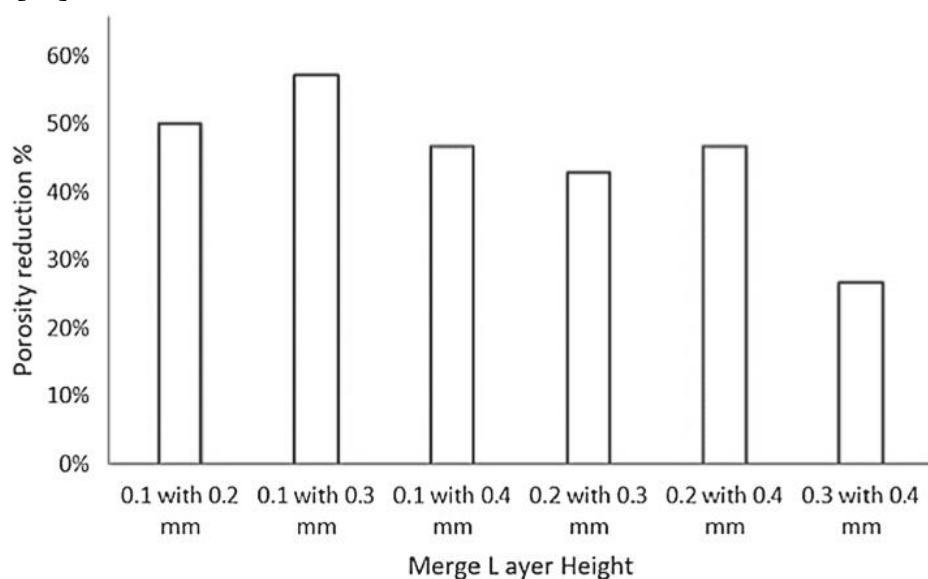
Predohrevom miesta tesne pred ukladaním, približne na teplotu skleneného prechodu, pomáha uzatvoriť kavity okolo rastru. Výskumy s jednoduchým radiátorom pripevneným tesne pred extruderom dokázali výrazne zvýšiť pevnosť vzoriek z PLA. Pri skúškach na lom sa materiál stal skôr húževnatým ako krehkým. Podobné výsledky je možné docíliť aj predohrevom pomocou infračerveného laseru. Zmenou geometrickej presnosti sa ale výskumy nezaoberali.[12]

2.7.5 Ohrev po dokončení tlače

Ohrev dokončenej súčasti môže okrem zjemnenia povrchu pomôcť k uzatvoreniu kavít vzniknutých pri tlači a zosilniť väzby medzi vrstvami. Základom procesu je ohrev výrobku mierne nad teplotu skleneného prechodu. Nevýhodou tohto procesu je ale možná zmena geometrie a rozmerov súčasti. Súčasť sa môže udržiavať na tejto teplote rádovo v minútach, pri dlhších časoch sú výsledky priaznivejšie [12]

2.7.6 Alternujúca výška vrstvy

Dharavathu et al. pomocou metódy alternujúcej výšky vrstvy znížili celkovú porozitu skúšobných vzoriek, taktiež zamedzili kontinuálne póry medzi vrstvami. Vzniknuté kvity sú tak menšie a kratšie. Metóda spočíva v striedaní vysokej pracovnej vrstvy a nízkej vyplňovacej vrstvy, kde výška vyplňovacej vrstvy tvorí 25 až 50% výšky pracovnej vrstvy. Tenká vrstva pomáha usadiť jednotlivé rastre na seba a vyplní tak priestor medzi pracovnými vrstvami. Už spomenutým faktom je úmera medzi výškou vrstvy a výrobným časom, ktorý sa pre použitie nízkych vrstiev výrazne predlžuje. Pomer zníženia porozity závisí hlavne na pomere medzi výškami alternujúcich vrstiev, ako je možné vidieť na Obr. 2-18.[19]



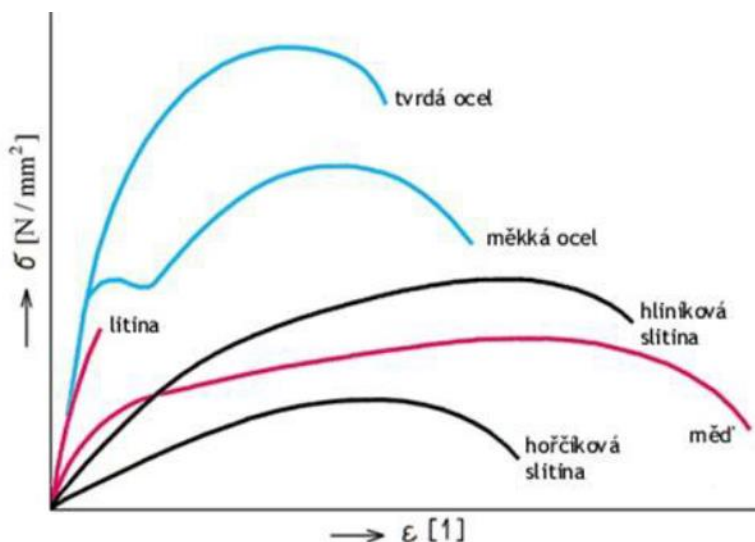
Obr. 2-18 Zníženie porozity pomocou metódy alternujúcich vrstiev pre vybrané výšky [19]

2.8 Ťahová skúška

Ťahová skúška je jednou zo základných typov testov na mechanické vlastnosti materiálov. Tento druh skúšky poskytuje náhľad do vlastností a využiteľnosti materiálov. Princípom ťahovej skúšky je aplikácia ťahovej sily na vzorku a skúmanie jej reakcií.[24]

2.8.1 Výstup ťahovej skúšky

Meranie materiálu alebo produktu v ťahu poskytuje kompletný profil jeho vlastností v ťahu. Pre výskum rôznych vlastností sú predpísané rozličné normy, no najčastejšie sa skúma bod zlyhania, Youngov modul pružnosti, medza klzu, medza pevnosti. Bežným grafickým znázornením skúšky v ťahu je ťahový diagram, príklad na obr. 2-19. [24]



Obr. 2-19 Ťahové diagramy pre spektrum materiálov[20]

Výpočet Youngovho modulu pružnosti pomocou Hookovho zákona pozostáva zo smernice priamky pred medzou klzu na diagrame, čiže ešte pri elastických deformáciách. Niektoré materiály majú medzu na diagrame jasne viditeľnú. Pri materiáloch bez viditeľnej medze klzu sa počíta s takzvanou zmluvnou medzou klzu, ktorá je určená na 0,2% pomerného predĺženia materiálu. Pre ťahové a tlakové napätie sa Hookov zákon dá vyjadriť pomocou pomerného dĺžkového predĺženia.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\Delta l}{l} [-]$$

Kde vystupuje: pomerné predĺženie telesa ε [-], napätie v telese σ [Pa], Youngov modul pružnosti E [Pa], predĺženie alebo skrátenie telesa Δl [m] a dĺžka telesa l [m]. [24]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Pevnosť 3D tlačených výrobkov je silno závislá na ich efektívnom priereze, ktorý sa znižuje porozitou. Pre dosiahnutie čo najvyššej pevnosti je hlavne potrebné doceliť čo najnižšiu porozitu materiálu pomocou už spomenutých parametrov tlače. Jednoznačný návod na to neexistuje a silno závisí na podmienkach a rozmeroch tlače, kým sú konvenčné malé tlačiarne v tomto ohľade preskúvané, optimalizácia mechanických vlastností na základe rozmerov rastrovej siete pri veľkorozmerovej tlači, s výškou vrstvy od dvoch milimetrov vyššie, ostáva viac-menej nepreskúvaná. Vplyv porozity na rastrované súčasti z polymérov ako téma sama o sebe je podľa mojej rešerše nedostatočne empiricky opísaná. Posudok výskumov zaoberajúcich sa témou mechanických vlastností z roku 2022 spomína množstvo článkov a experimentov, no všetky z nich pracovali so stolnými tlačiarňami pre bežné rozmery.[13] Výška vrstvy má na rozsah kavít značný vplyv, pri veľkorozmerovej tlači sa výška vrstvy pohybuje až v 10násobku výšky vrstvy konvenčnej tlače. Značná časť metód pre zníženie porozity výrobku vyžaduje inštaláciu dodatočných systémov pre tlač.

3.2 Cíl práce

Cieľom tejto práce je popísať vplyvy procesných parametrov tlače na pevnosť súčastí vyrábaných aditívnou metódou FDM pre veľkorozmerové účely. Výsledok práce má opísať vplyv hlavných parametrov rastrovania výrobkov na výrobu a pevnosť veľkorozmerových súčastí.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Materiál

Jedným z najpoužívanějších, ak nie najpoužívanším, materiálom je v dobe písania tejto práce materiál PLA. Možnosť tlače bez ohrevu podložky a pomerne nízka cena robia z materiálu PLA všestrannejší materiál vhodný pre tlač vo veľkých rozmeroch. Jeho tečenie pri vysokých teplotách môže v istej miere pomôcť lepšie vyplniť objem výrobku.

4.2 Návrh experimentu

Skúška v ťahu vynesie potrebné vlastnosti vzťahujúce sa na mechanické vlastnosti pre vyhodnocovanie. Skúška pre výrobky vzťahujúce sa na výrobu extrúziou spadá pod normu ISO 527-2. Pre prevedenie skúšky sa skúšobná vzorka v tvare obojstranných lopatiek umiestni medzi čeľuste univerzálneho trhacieho stroja („trhačky“). Medzi výsledky skúšky patrí hlavne medza pevnosti, medza klzu a Youngov modul pružnosti ktorými sa bude táto práca ďalej zaoberať pri vyhodnocovaní výsledkov.

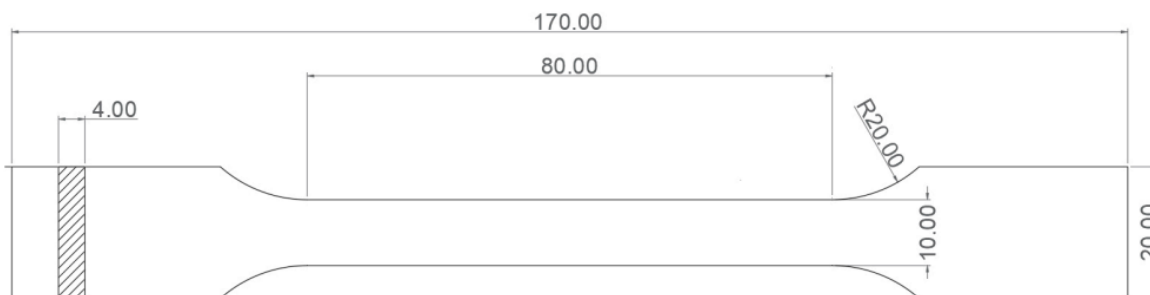
Z rešerše je možné usúdiť, že parametrami s najvyšším účinkom na množstvo kavít je vzdialenosť medzi rastrami (Air gap), výška vrstvy a flow rate. Teplotné parametre majú taktiež jasný vplyv, no ich značná úprava vplýva na samotnú kvalitu materiálu, ktorá už siaha za ciele výskumu tejto práce. Rýchlosť tlače, podobne ako teplota, má dopad na porozitu finálneho výrobku, no tento efekt je možné vyvážiť rýchlejším prísunom materiálu. V tom prípade vyššia rýchlosť tlače prispieva len k tvorbe artefaktov a rozmerových nepresností, preto sa jej vplyvu táto práca už ďalej nevenuje. Uhol rastra a orientácia súčasti majú podľa rešerše jasne preskúmané optimálne nastavenie a to tak aby boli vlákna súčasti namáhané pozdĺžne.

4.2.1 Podmienky pre validitu experimentu

Hlavnou podmienkou je úplné pretrhnutie vzorku na mieste medzi lopatkami slúžiacimi na upevnenie do trhačky. Pre porovnateľnosť výsledkov je potrebné, aby výroba rovnako ako aj skúška všetkých vzoriek prebehla v rovnakých podmienkach, ako napr. teplota, vlhkosť, rýchlosť separácie čeľustí.

4.2.2 Návrh vzoriek

Z normy vychádzajú dva základné typy testovacích vzoriek pre ťahovú skúšku, a to 1A a 1B, pričom typ je 1B špecializovaný pre obrobené súčasti. Pre experiment je vybraná vzorka typu ISO 527-1A, zobrazená na obrázku nižšie.



Obr. 4-1 Testovacia vzorka pre ťahovú skúšku ISO 527-1A [25]

Normalizovaná vzorka ale nie je prijateľná pre tento experiment z dvoch hlavných dôvodov, ktorými sú; veľkosť a koncentrátoory napätia.

Pri hrúbke telesa 4 mm by bolo na výrobu s výškou vrstvy od 2 mm použitých len 2 a menej vrstiev, táto skutočnosť by skresľovala výsledky nie len ťahovej skúšky ale hlavne optického merania plochy kavít medzi vláknami. Pre ťahovú skúšku je tak nutné použiť mohutnejšie teleso, no horný limit určuje rozmer čelústí na trhacom zariadení.

Tvar koncových lopatiek, resp. zaoblená prechodná časť, môže pri technológii výroby 3DP uchovávať koncentrátoory napätie vo forme vzduchových medzier. Vedecký posudok z roku 2019 na tému vzoriek na ťahovú skúšku opisuje značné množstvo experimentov, pri ktorých došlo k pretrhnutiu vzoriek v zaoblení alebo tesne pri zaoblení vzoriek. Údaje z takto chybné vyhodnotených skúšok sú často použité vo výsledkoch, čo môže spôsobovať značné odchýlky vzniknuté porovnaním rôznych experimentov ťahovej skúšky vzoriek FDM.[21] Pre úplnú elimináciu koncentrátoory vzniknutých tvarom testovacieho vzorku bude na skúšky použitý tvar prostého kvádra, na obr. 4-2, o rozmeroch 150x15x6. [22] Presné rozmery sa odvíjajú na rozlíšení a presnosti tlače, ktorá je ovplyvnená výškou vrstvy a vzdialenosťou vrstiev. Pre získanie čo najpresnejších údajov o napätí pri ťahovej skúške je potrebné všetky vzorky osobitne zmerať. Druhoradou výhodou voľby vzoriek v tvare kvádra je možnosť jednoduchej úpravy dráhy pre skúmané parametre, keďže pre robotické rameno KUKA sa dráha tlače tvorí pomocou algoritmického modelovania.



Obr. 4-2 Tvar testovacej vzorky

Z každého setu parametrov je potrebné tlačiť aspoň 3 rovnaké vzorky pre základnú štatistickú váhu.

4.2.3 Vstupné parametre

Skúmané vzorky sú plné bez vzoru výplne, tlač prebieha vo výrobcov odporúčaných teplotných parametroch upravených pre špecifický prietok. Rýchlosť tlače je pre všetky vzorky konštantná.

Odporúčaná výška vrstvy je 75% priemeru trysky, čo pri tryske o priemere 2 mm činí 1,5 mm. Výšku 1,5 mm preto volím ako referenčnú výšku od ktorej sa experimentálne hodnoty znižujú až po 0,9 mm, čiže menej ako 50% priemeru trysky.

Ako referenčnú hodnotu vzdialenosti rastrov volím 2,3 mm, a ako spodnú hranicu prijateľnej vzdialenosti volím 1,9 mm.

Poslednou skúmanou premennou v experimente je flow rate, ktorý sa ovláda rýchlosťou prísunu filamentu. Navrhujem úpravu rýchlosti prísunu o 5-10%.

Experimentálne hodnoty pre tlač vzoriek sú určené štatistickým programom Minitab pre design experimentov s troma premennými a troma opakovaniami vo vyššie spomínaných rozsahoch. Celkový počet vytlačených vzoriek použitých pre ťahovú skúšku tak činí 60 vzoriek. Vplyv jednotlivých parametrov je prekladaný polynómom, pre prípad nelineárnosti.

Tabuľka 4-1 Prehľad experimentálnych hodnôt parametrov

Názov parametra	Spodná hranica	Stredový bod	Horná hranica
Výška vrstvy	0,9 mm	1,2 mm	1,5 mm
Medzi-rastrová vzdialenosť	1,9 mm	2,1 mm	2,3 mm
Flow rate	100%	105%	110%

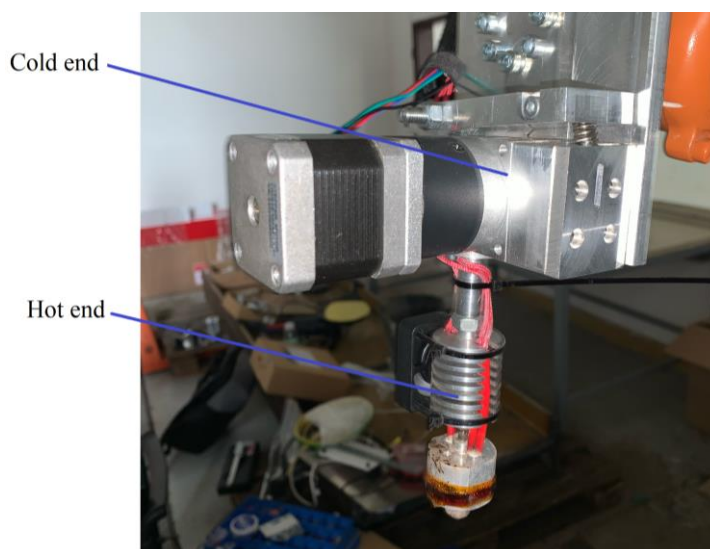
4.3 Príprava vzoriek

Vzorky boli vytlačené pomocou robotického ramena KUKA KR8 R1620 na konci ktorého je pripevnený extrudér pre 3D tlač. Robotické rameno je hodnotené pre manipuláciu s bremenom o hmotnosti 8kg do vzdialenosti 1620 mm s využitím pohybu po šiestich osiach.



Obr. 4-3 KUKA KR8 R1620 pri tlači

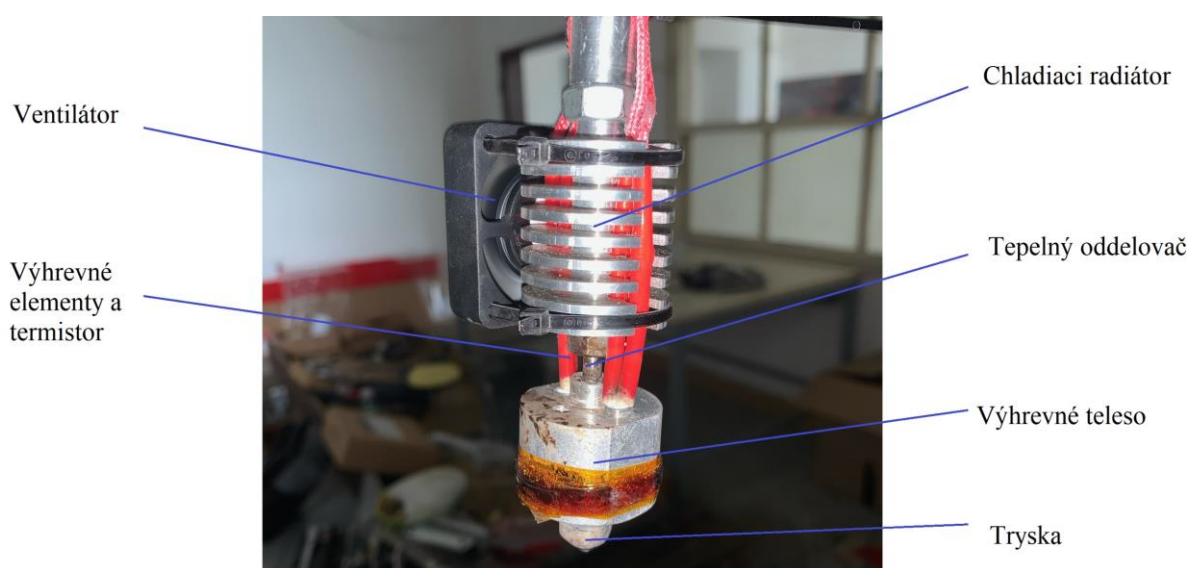
Extrudér sa zložením silno podobá na konvenčný, používaný pri stolnej tlači. Skladá sa z tzv. hot endu a cold endu.



Obr. 4-4 Extrudér pripevnený na robotickom ramene

Filament sa najprv dostáva do cold endu cez priamy podávací systém ku kolesu s jemným ozubením, taktiež nazývaným podávač. Koleso je poháňané krokovým motorom, ozubením zachytáva filament a zaisťuje jeho prítok do hot endu, popr. retrakciu. Pomocnú prítlačnú silu proti prešmyku filamentu zabezpečuje tzv. idler, jedná sa o voľnobežné koleso.

Filament nasledovne putuje cez chladiaci radiátor, ktorý pomáha ochladzovať vedenie filamentu, aby nedošlo k jeho roztaveniu skôr ako je potrebné. Radiátoru pomáha malý ventilátor. Pod radiátorom sa nachádza tepelný oddeľovač vo forme zúženia priemeru, zaisťuje vzduchovú bariéru pre prestup tepla na radiátor. Po tepelnom oddeľovači filament vstupuje do výhrevného telesa, ktorého ohrev zabezpečujú ohrevné elementy. Pre teplotnú reguláciu je do výhrevného telesa zavedený termistor. Cestu filamentu zakončuje tryska v priemere 2 mm.



Obr. 4-5 Hot end extrudéru

Tlač prebiehala na stole s fóliou navrhnutou pre 3D tlač. Fólia má pri teplotách tlače skvelé priľnavé vlastnosti, bráni v pohybe súčasti pri tlači rovnako ako aj krúteniu vzoriek pri chladnutí. Pred tlačou bol na podložku dodatočne nanosený tzv. 3DLAC vo forme sprejového rozprašovača. 3DLAC podobne ako fólia zlepšuje pri vysokých teplotách adhézne vlastnosti podložky, no nesmierne uľahčuje odňatie hotových vychladnutých výrobkov. Stôl nemá možnosť výhrevu podložky.

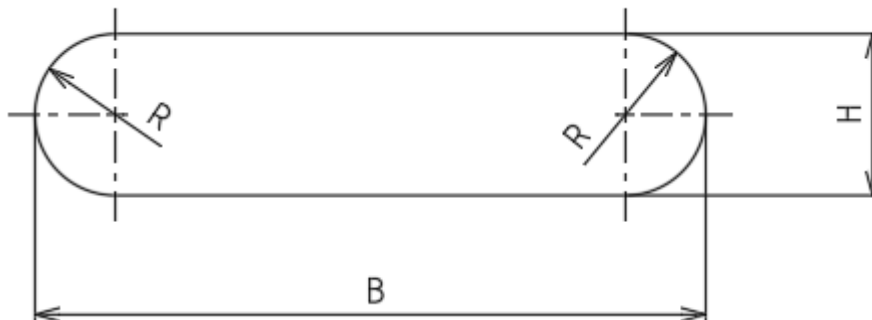
4.3.1 Algoritmické modelovanie

Dráha modelu bola naprogramovaná pomocou jednoducho upraviteľného skriptu, ktorý mi bol poskytnutý ústavom konštruovaniu. Skript bol vytvorený v programe Rhinoceros s pluginom Grasshoper a rozšírením KUKA prc.

Pre výpočet otáčok podávača bolo potrebné dodatočne zostaviť rovnicu pomocou rovnosti prietokov filamentu.

$$Q_{tlače} = Q_{filamentu}$$

Na výpočet prietoku je potrebné určiť obsah plochy uloženého rastru. Vzdialenosť medzi rastrami je vyplnená dvoma polovicami šírky rastrov, to znamená že šírka rastrov sa musí rovnať vzdialenosti medzi nimi.



Obr. 4-6 Tvar extrudovaného filamentu

$$S_{tlače} \cdot v_{tlače} = S_{filamentu} \cdot v_{filamentu}$$

Kde

$$S_{tlače} = H \cdot (B - 2R) + 2\pi \cdot R^2 ; R = \frac{H}{2}$$

$$v_{tlače} = 15 \text{ mm/min}$$

$$S_{filamentu} = \pi \cdot \frac{d_{filamentu}^2}{4}$$

$$v_{filamentu} = \omega \cdot R_{podavača} = 2\pi \cdot n \cdot R_{podavača} ; R_{podavača} = 13,25 \text{ mm}$$

Výsledný vzťah pre otáčky:

$$n = \frac{[H \cdot (B - 2R) + 2\pi \cdot R^2] \cdot (v_{tlače} \cdot 60)}{\pi \cdot \frac{d_{filamentu}^2}{4} \cdot 2\pi \cdot R_{podavača}} \text{ [ot/min]}$$

4.4 Ťahové skúšky

Ťahové skúšky všetkých vzoriek prebehli na univerzálnom testovacom zariadení od SHIMADZU model AGX-V2, na Obr. 4-5, vybaveným extenzometrom.



Obrázok 4-1 Testovacie zariadenie SHIMADZU AGX-V2

Zariadenie dokáže vyvinúť silu až 100 kN . Vzorky uložené medzi mechanické zveráky sú naťahované konštantou rýchlosťou až do ich pretrhnutia. Výstupom skúšky je ťahový diagram ktorý vykresľuje závislosť napätia resp. sily na predĺžení. Predĺženie môže prístroj zaznamenávať buď z posunu zverákov, alebo priamo z extenzometra, čo by malo byť presnejšie.



Obrázok 4-2 Testovaná vzorka s pripraveným extenzometrom

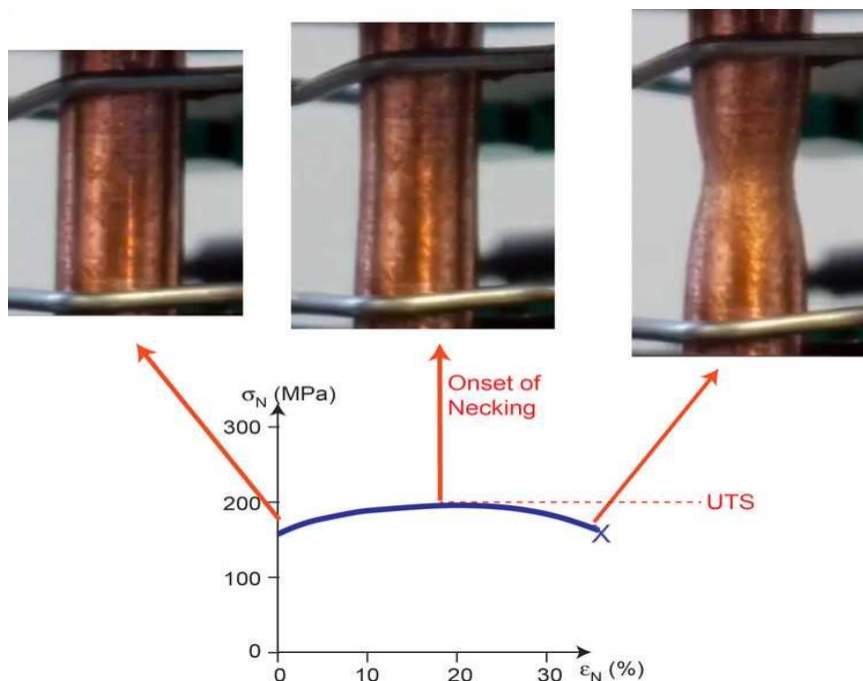
4.4.1 Vyhodnocovanie

Údaje zo skúšky spracovával program TRAPEZIUMX priamo od výrobcu prístroja, ten po manuálnom vložení rozmerov priamo vyhodnocoval konkrétne hodnoty ako Youngov modul pružnosti (E), medzu pevnosti (R_m) atď. Výstupom programu boli aj ťahové diagramy.

Hlavnou charakteristikou bola medza pevnosti, na ťahovom diagrame je to maximálne napätie dosiahnuté na vzorku. Pri krehkých materiáloch ako je PLA dochádza k pretrhnutiu tesne po dosiahnutí medze pevnosti. Medze pevnosti jednotlivých setov vzoriek budú porovnané a vyhodnotené programom Minitab. Výstupom je vplyv jednotlivých vlastností na spomínanú medzu pevnosti rovnako ako aj vplyv ich kombinácií.

4.4.2 Priebeh skúšok

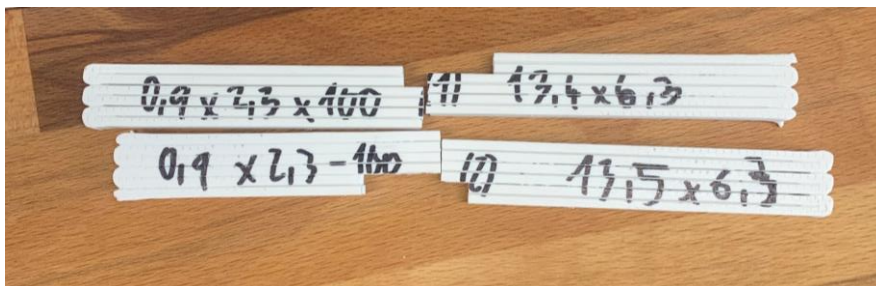
Každý zo vzoriek bol manuálne zovretý v zverákoch primeranou silou tak, aby nedošlo k tvorbe nežiadúcich vrubov na začiatku a konci testovanej dĺžky. Po uložení vzorky bol na ňu pripevnený extenzometer pomocou oblých hrotov prtláčaných pružinami. Pred začatím skúšky boli vzorky natiiahnuté silou $200N$ pre kontrolu správneho zovretia zverákov. Nasledovne sa zveráky od seba vzdäľovali konštantnou rýchlosťou $5mm/min$, až do deštrukcie, resp. pretrhnutia vzorky, čím došlo k uvoľneniu sily na prístroji. Pri ťahových skúškach je bežné pozorovať tzv. krčky, na obr. 4-7, po dosiahnutí medze pevnosti, ide o zúženie priemeru v dôsledku plastických deformácií. Pre pomerne krehký materiál, akým je PLA, formácia krčkov nebola očakávaná, predpokladaný bol krehký lom vzorky.



Obr. 4-7 Tvorba krčku na ťahovej vzorke [23]

5 VÝSLEDKY

Po dokončení ťahových skúšok prebehla vizuálna inšpekcia natrhaných vzoriek. Na prvý pohľad bolo možné zhodnotiť chýbajúcu súdržnosť materiálu pri vzorkách s menším prietokom. Vzorky s nízkou výškou vrstvy a vzdialenosťou medzi rastrami boli náchylné k lomu po jednotlivých vláknach alebo vrstvách. Tento jav, viditeľný na obrázku 5-1 je pri ťahovej skúške nepriaznivý, znižuje medzu pevnosti.



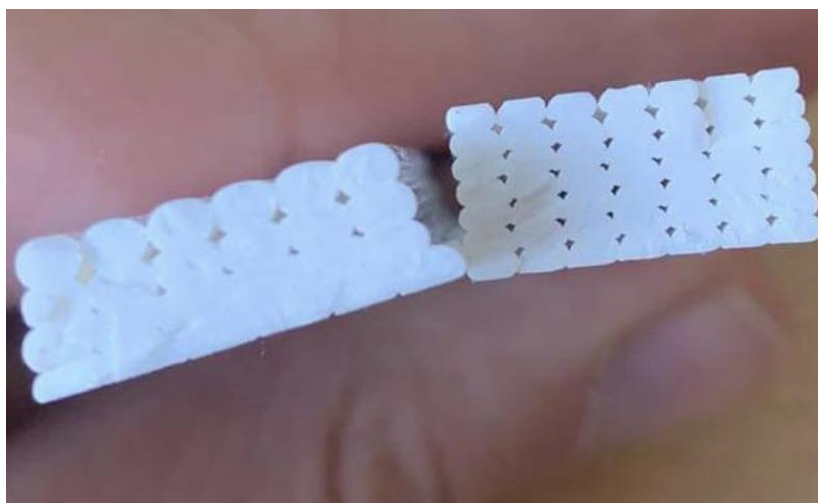
Obr. 5-1 Natrhané vzorky s nízkou výškou vrstvy

Naopak vzorky s výškou vrstvy 1,5 mm a zvýšeným prietokom zlyhávali vo viacerých rovinách naraz, ukážka na obrázku 5-2. To môže poukazovať na jednotnosť a symetriu materiálu.



Obr. 5-2 Vzorka pretrhnutá na dvoch miestach súčasne

Medzi-rastrové kavity vo vzorkách s vyšším počtom rastrov boli menšie, no s násobne vyšším výskytom. Na obrázku 5-3 je porovnanie priečného rezu v mieste lomu vzorku s nízkym počtom rastrov a s vysokým počtom rastrov, na ktorom je viditeľný značný rozdiel v počte kavít rovnako ako mierny rozdiel v ich veľkosti



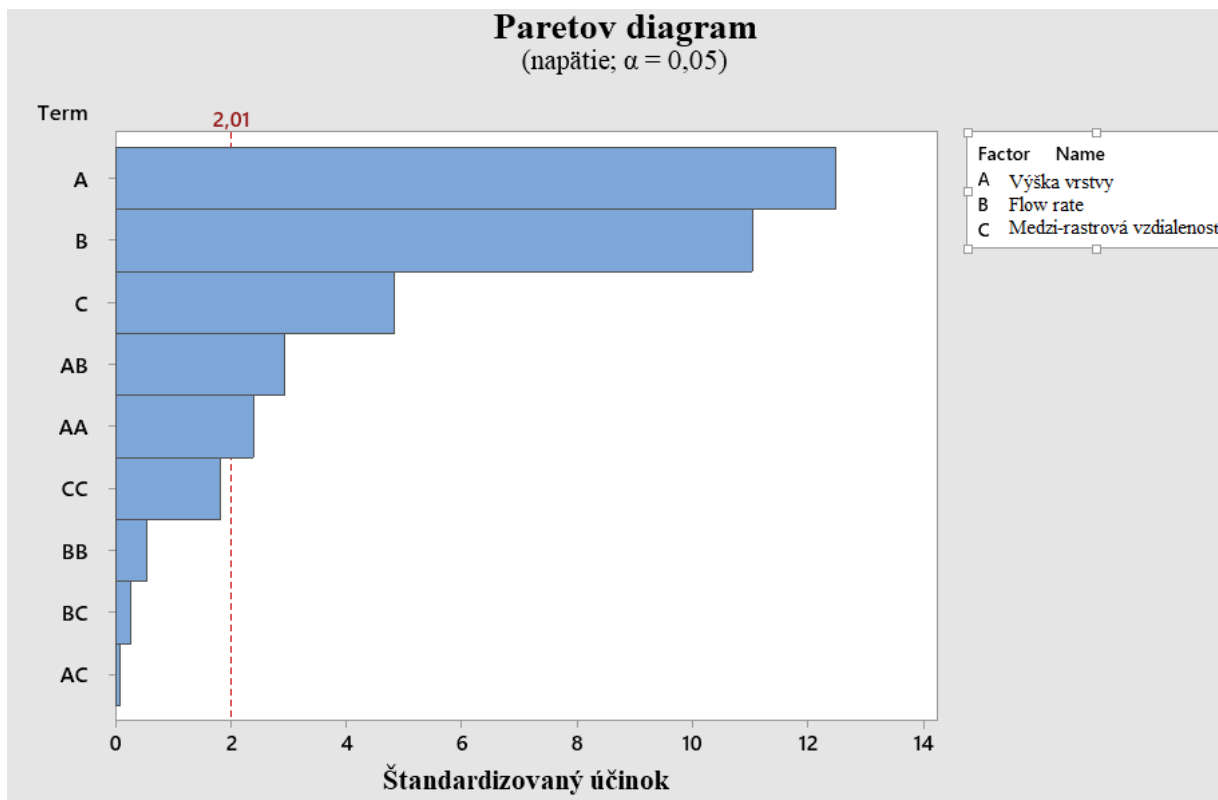
Obr. 5-3 Porovnanie priečných rezov v mieste lomu

Najvyššiu pevnosť v ťahu mali vzorky s označením 1,5x2,3-110, čiže vysokým súčiniteľom extrúzie, najvyššou výškou vrstvy a vzdialenosťou medzi vrstvami, dosiahli priemernú medzu pevnosti 67,55 MPa. Výsledky analýzy experimentu pre jednotlivé vlastnosti na obrázku 5-4 ukazujú jednoznačný trend poklesu medze pevnosti s rastúcim počtom rastrov.



Obr. 5-4 Interpolácia závislosti medze pevnosti [MPa] na jednotlivých parametroch

Ďalším výstupom analýzy je Pareto diagram účinkov parametrov a ich kombinácií na obrázku 5-5. Znárodňuje mieru účinku parametrov poprípade kombinácií parametrov na výslednú medzu pevnosti. Zo skúmaných parametrov má medzi-rastrová vzdialenosť minimálny vplyv. Na úrovni významnosti $\alpha = 0,05$ je väčšina kombinovaných zmien parametrov vyhodnotená ako bezvýznamná.



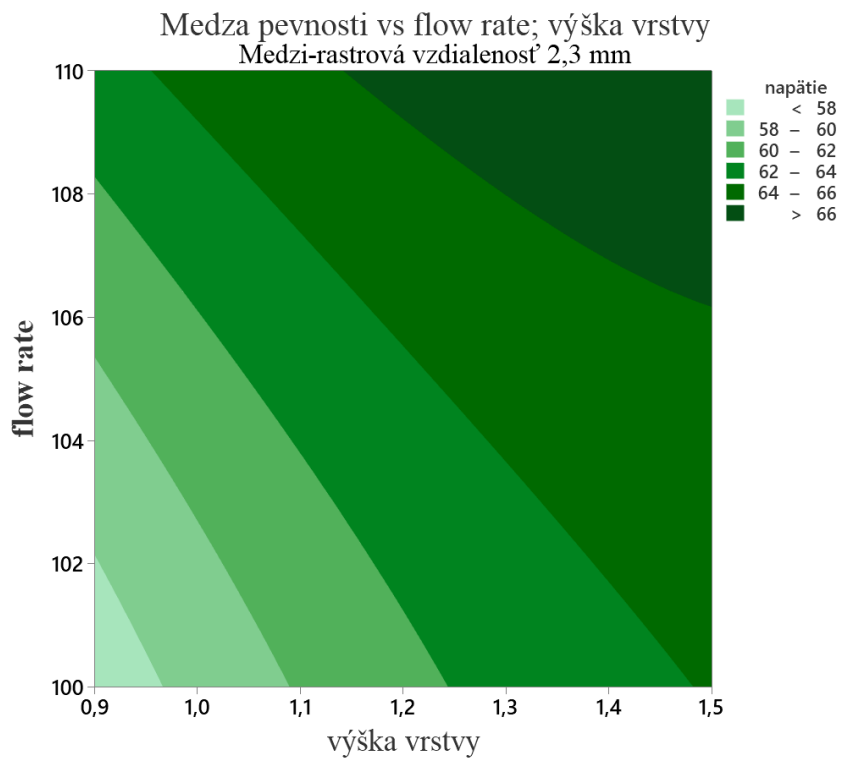
Obr. 5-5 Pareto diagram účinku

Regresná funkcia pre napätie podobne ako Pareto diagram znázorňuje účinky parametrov pomocou ich koeficientov.

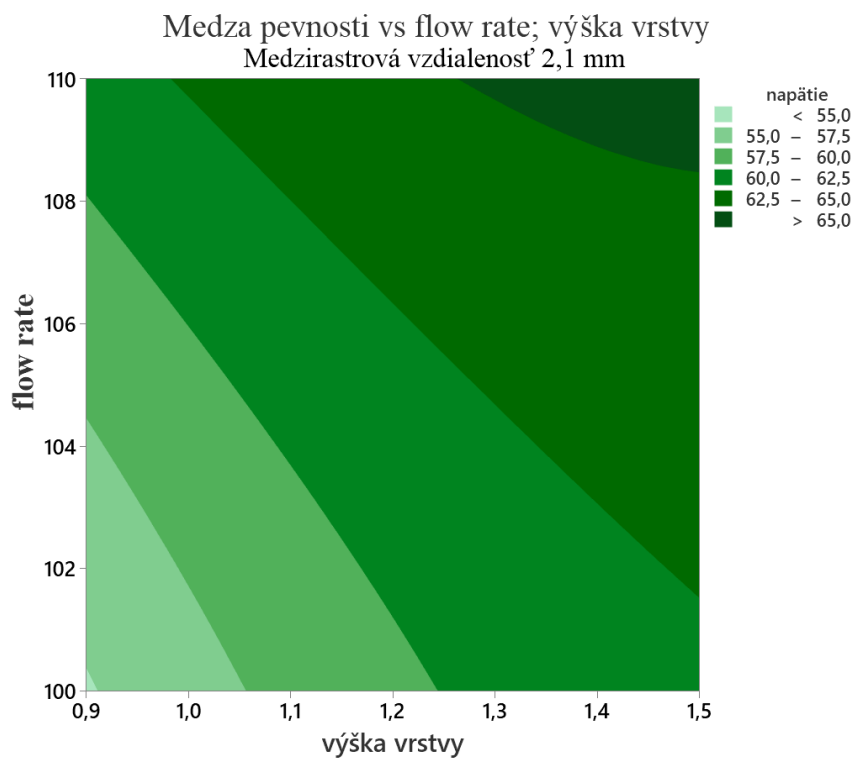
$$R_m [MPa] = 85 + 90,1H - 76 \cdot f - 72B - 11,74 \cdot H^2 + 96 \cdot f^2 + 20,1 \cdot B^2 - 50,5 \cdot H \cdot f + 0,35 \cdot H \cdot B - 6,9 \cdot f \cdot B$$

Kde H znázorňuje výšku vrstvy [mm], B označuje medzi-rastrovú vzdialenosť [mm] a f je flow rate [-]

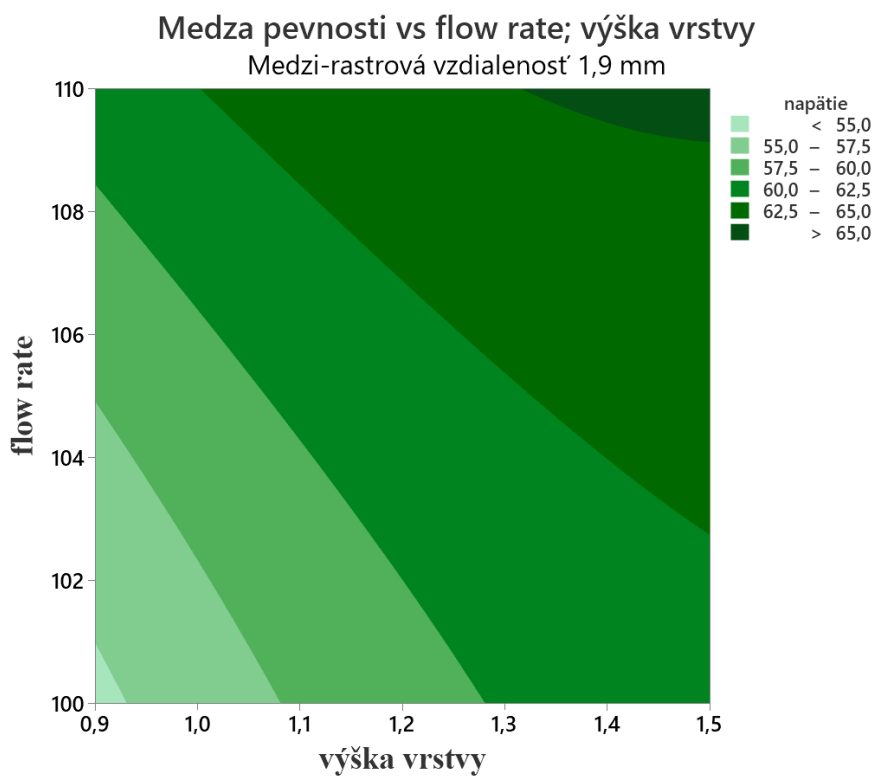
Regresný model má koeficient determinácie 86%. Do regresného modelu nezapadali dve vzorky s pomerne vysokou reziduálnou variabilitou.



Obr. 5-6 Graf medze pevnosti [MPa] pre vzorky s medzi-rastrovou vzdialenosťou 2,3mm



Obr. 5-7 Graf medze pevnosti [MPa] pre vzorky s medzi-rastrovou vzdialenosťou 2,1mm



Obr. 5-8 Graf medze pevnosti [MPa] pre vzorky s medzi-rastrovou vzdialenosťou 1,9 mm

Nasledujúca tabuľka obsahuje namerané priemerné medze pevnosti pre všetky sety vzoriek s ich smerodajnou odchýlkou. Ich označenia sú v tvare HxB-f (c) kde; H označuje výšku vrstvy [mm], B je použitá medzi-rastrová vzdialenosť [mm], f je označenie pre sto násobok koeficientu prítoku objemu materiálu [-] a c je počet testovaných vzoriek pre konkrétny set [-].

Tabuľka 5-1 Súhrn výsledkov ťahovej skúšky a tlače

Označenie setu	Priemerná medza pevnosti [MPa]	Smerodajná odchýlka [MPa]	Čas tlače jednej vzorky [min]
0,9x1,9-100 (3)	54,9119	0,9321	8,3
0,9x1,9-110 (3)	60,6373	0,5838	8,3
0,9x2,1-105 (3)	57,5241	0,9422	7,7
0,9x2,3-100 (3)	57,1639	0,4602	7,2
0,9x2,3-110 (3)	63,2261	0,8486	7,2
1,2x1,9-105 (3)	91,4152	0,4773	6,2
1,2x2,1-100 (3)	57,4839	0,9541	5,8
1,2x2,1-105 (18)	62,1405	1,3951	5,8
1,2x2,1-110 (3)	65,5550	1,0976	5,8
1,2x2,3-105 (3)	62,7829	1,6858	5,4
1,5x1,9-100 (3)	61,9435	0,8779	5,1
1,5x1,9-110 (3)	65,2525	0,7432	5,1
1,5x2,1-105 (3)	62,9526	0,5872	4,7
1,5x2,3-100 (3)	64,8918	0,7720	4,0
1,5x2,3-110 (3)	67,3130	0,9081	4,0

6 DISKUZE

6.1 Interpretácia výsledkov

Z výsledkov je možné usúdiť, že k zníženiu celkového množstva kavít nedošlo. Zvýšením počtu rastrov na jednotku plochy nastal práve opačný efekt, kavity boli síce menšie, no ich počet s počtom rastrov narástol. Počet medzi-rastrových väzieb taktiež logicky narástol, čo v konečnom dôsledku oslabilo vzorky. Vyšší flow rate vzápätí zlepšoval súdržnosť jednotlivých rastrov za cenu väčšieho množstva použitého materiálu. Nízke experimentálne rozmery rastrovania náramne predĺžili dobu tlače, zatiaľ čo flow rate na ňu logicky neovplyvňoval.

Medzi-rastrové väzby tak ostávajú achillovou päťou 3D tlače. Hypotéza, že zblíženie rastrovej siete vzoriek napomôže tvorbe kvalitnejších väzieb medzi vláknami, je týmto experimentom vyvrátená. Hypotéza vznikla z rešerše konvenčnej tlače, ktorá naznačovala mierny pokles medze pevnosti rastúcou výškou vrstvy, ako je možné pozorovať na obr. 2-8.

6.2 Nedostatky tlače

Pri tlači boli pozorované dva hlavné nedostatky, ktoré mohli mať vplyv na výsledky výskumnej časti, a to nerovnomerné ukladanie filamentu v dôsledku vibrácií na konštrukcii ramena, a rozmerové odchýlky v závislosti na polohe.

6.2.1 Vibrácie tlačovej hlavy

K vibráciám tlačovej hlavy dochádzalo najmä po zmene smeru na konci vzorky, roztrasená hlava tak pokračovala v tlači a ukladala filament s jemnými nerovnomernosťami približne do polovice vzorky, viditeľné na obrázku 6-1. Výsledkom sú miesta s jemným nedostatkom materiálu striedajúce sa s miestami s prebytkom. Tento jav mohol mať mierne nepriaznivý účinok na pevnosť v ťahu.



Obr. 6-1 Jav vibrácií tlačovej hlavy na vzorke

6.2.2 Poloha vzoriek

Vzorky boli tlačené v skupinách po troch vzorkách s rovnakými parametrami. Vzorky s označením 3 sa tlačili ako posledné, najďalej od počiatku súradnicového systému, resp. od základne robotického ramena. Pri meraní rozmerov vzoriek bol pozorovaný jemný pokles výšky, s ním nárast šírky, vzoriek tlačných v polohe 3. Podobne ako rozmerovo, vzorky sa líšia aj medzou pevnosti, ktorá je vo väčšine prípadov najvyššia.

7 ZÁVĚR

Cieľom práce bolo mechanické testovanie 3D tlačných dielov, návrh experimentu a metodiky, tlač testovacích telies, vyhodnotenie výsledkov a ich interpretácia. Všetky ciele boli v práci splnené. Hypotéza o zvýšení medze pevnosti pomocou zvýšenia počtu rastrov bola vyvrátená. Zároveň boli rozšírené poznatky účinkov rastrovania súčastí na ich medzu pevnosti. V práci je spracovaný značný počet vzoriek experimentom, ktorého výsledky majú pomerne vysokú váhu presnosti.

Keďže sa práca zaoberala znižovaním medzi-rastrových vzdialeností a výšky vrstvy, ktoré dokázateľne zhoršili mechanické vlastnosti vzoriek, bolo by vhodné previesť ďalšie testovanie, no s opačnou zmenou parametrov. Zvýšenie výšky vrstvy by mohlo priniesť pozitívne účinky nie len pre dobu tlače, ale aj pevnosť dielov, ako napovedá regresná analýza experimentu.

Snaha o optimalizáciu výsledkov by bola v tomto prípade zbytočná vzhľadom na to, že najpevnejšie vzorky ležali na krajných parametroch vstupu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] GIBSON, Ian; ROSEN, David a STUCKER, Brent. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Online. 2nd ed. New York, USA: Springer-Verlag New York, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>. [cit. 2024-01-25].
- [2] DIEGEL, Olaf; NORDIN, Axel a MOTTE, Damien. *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. Online. Singapore, Singapore: Springer Singapore, 2019. ISBN 978-981-13-8280-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8281-9>. [cit. 2023-12-19].
- [3] FILLAMENTUM. *Fillamenty*. Online. Dostupné z: <https://fillamentum.cz>. [cit. 2024-01-25].
- [4] *Ultimate 3D Printing Materials Guide*. Online. Simplify3D. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/>. [cit. 2024-01-05].
- [5] HARSHIT, K. Dave a DAVIM, J. Paulo (ed.). *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*. Online. Springer Cham, 2021. ISBN 978-3-030-68024-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-68024-4>. [cit. 2024-01-25].
- [6] AFONSO, João Araújo; ALVES, Jorge Lino; CALDAS, Gabriela; GOUVEIA, Barbara Perry; SANTANA, Leonardo et al. Influence of 3D printing process parameters on the mechanical properties and mass of PLA parts and predictive models. Online. *Rapid prototyping journal*. 2021, roč. 27, č. 3, s. 487-495. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2020-0043>. [cit. 2024-01-26].
- [7] BELLEHUMEUR, Céline; LI, Longmei; SUN, Qian a GU, Peihua. Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. Online. *Journal of manufacturing processes*. 2004, roč. 6, č. 2, s. 170-178. ISSN 1526-6125. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(04\)70071-7](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(04)70071-7). [cit. 2024-02-07].
- [8] KAVEH, Mahdi; BADROSSAMAY, Mohsen; FOROOZMEHR, Ehsan a HEMASIAN ETEFAGH, Ardeshir. Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes. Online. *Journal of materials processing technology*. 2015, roč. 226, s. 280-286. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.012>. [cit. 2024-02-07].
- [9] MENG, Fanrong; CUI, Haijun a WANG, Meng. Mechanical Properties and Forming Quality of PLA Based on Computer 3D Printing Parameters. Online. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023, roč. 2566, č. 1, s. 12076. ISSN 1742-6588. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2566/1/012076>. [cit. 2024-01-27].

- [10] JATTI, Vinaykumar S; JATTI, Savita V; PATEL, Akshaykumar P. a JATTI, Vijaykumar S. A Study On Effect Of Fused Deposition Modeling Process Parameters On Mechanical Properties. Online. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*. 2019, roč. 8, č. 11. ISSN 2277-8616. [cit. 2024-01-27].
- [11] GAO, Ge; XU, Fan; XU, Jiangmin; TANG, Guanghai a LIU, Zhenyu. A Survey of the Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts. Online. *Micromachines (Basel)*. 2022, roč. 13, č. 4, s. 553. ISSN 2072-666X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/mi13040553>. [cit. 2024-03-15].
- [12] SUN, Xiaochen; MAZUR, Maciej a CHENG, Chi-tsun. A review of void reduction strategies in material extrusion-based additive manufacturing. Online. *Additive manufacturing*. 2023, roč. 67, s. 103463. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103463>. [cit. 2024-02-07].
- [13] TAO, Yubo; KONG, Fangong; LI, Zelong; ZHANG, Jingfa; ZHAO, Xin et al. A review on voids of 3D printed parts by fused filament fabrication. Online. *Journal of materials research and technology*. 2021, roč. 15, s. 4860-4879. ISSN 2238-7854. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.108>. [cit. 2024-03-15].
- [14] AKHIL, V.M.; ARAVIND, S.L.; KIRAN, Ravi; S P, Sivapirakasam a MOHAN, Sreejith. Experimental investigations on the effect of infill patterns on PLA for structural applications. Online. *Materials Today: Proceedings*. 2023, roč. 76, s. 636-639. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.292>. [cit. 2024-01-27].
- [15] MOHAMED, Omar Ahmed; MASOOD, Syed Hasan; BHOWMIK, Jahar Lal; NIKZAD, Mostafa a AZADMANJIRI, Jalal. Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment. Online. *Journal of materials engineering and performance*. 2016, roč. 25, č. 7, s. 2922-2935. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2157-6>. [cit. 2024-01-28].
- [16] KOCH, Carsten; VAN HULLE, Luke a RUDOLPH, Natalie. Investigation of mechanical anisotropy of the fused filament fabrication process via customized tool path generation. Online. *Additive manufacturing*. 2017, roč. 16, s. 138-145. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.06.003>. [cit. 2024-02-07].
- [17] WENDT, C.; BATISTA, M.; MORENO, E.; VALERGA, A.P.; FERNÁNDEZ-VIDAL, S.R. et al. Preliminary Design and Analysis of Tensile Test Samples Developed by Additive Manufacturing. Online. In: *Procedia Engineering*. Elsevier, 2015, s. 132-139. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.489>. [cit. 2024-04-01].

- [18] SHAH, J.; SNIDER, B.; CLARKE, T.; KOZUTSKY, S.; LACKI, M. et al. Large-scale 3D printers for additive manufacturing: design considerations and challenges. Online. *International journal of advanced manufacturing technology*. 2019, roč. 104, č. 9-12, s. 3679-3693. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04074-6>. [cit. 2024-04-17].
- [19] NARESH, Dharavathu; RAJU, Ramesh a PARVEEN, Shekera. Design and development of alternate layer printing method to reduce the porosity in FDM printing process. Online. *International journal on interactive design and manufacturing*. 2023. ISSN 1955-2513. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01624-x>. [cit. 2024-02-07].
- [20] *Material in Mechanical Design Des Mach Elem Mech. Eng. Department Chulalongkorn University*. Online. Docplayer. 2019. Dostupné z: <https://docplayer.net/95031656-Material-in-mechanical-design-des-mach-elem-mech-eng-department-chulalongkorn-university.html>. [cit. 2024-05-17].
- [20] GORDELIER, Tessa Jane; THIES, Philipp Rudolf; TURNER, Louis a JOHANNING, Lars. Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review. Online. *Rapid prototyping journal*. 2019, roč. 25, č. 6, s. 953-971. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2018-0183>. [cit. 2024-04-15].
- [22] LETCHER, Todd; RANKOUHI, Behzad a JAVADPOUR, Sina. Experimental study of mechanical properties of additively manufactured abs plastic as a function of layer parameters. Online. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*. 2015. ISBN 0791857352. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/IMECE2015-52634>. [cit. 2024-04-15].
- [23] Necking & the Ultimate Tensile Strength. Online. Plastomex. 2021. Dostupné z: <https://plastometrex.com/blogs/necking-and-the-ultimate-tensile-strength>. [cit. 2024-05-17].
- [24] INSTRON. Tensile Testing - An Introduction. Online. INSTRON. 2024. Dostupné z: <https://www.instron.com/en/resources/test-types/tensile-test>. [cit. 2024-05-20].
- [25] ČSN EN ISO 527-2 (640604), Plasty - Stanovení tahových vlastností. 2012.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Zoznam použitých skratiek

ATV	Aditívna technológia výroby
FDM	Modelovanie metódou tavnej depozície
CAD	Počítačom podporované projektovanie
STL	Stereolitografia pre modelovanie
3DP	Trojdimenziálna tlač
PLA	Kyselina polylaktidová
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitril styren akrylát
PETG	Polyethylentereftalát
CPE	Kopolyester
SLS	Selektívne spékanie laserom
SLM	Selektívne spékanie kovov laserom
UV	Ultrafialové žiarenie

9.2 Zoznam použitých veličín

Veličina	Jednotka	Popis
$S_{\text{tlačé}}$	[mm ²]	Plocha prierezu uloženého vlákna filamentu
$V_{\text{tlačé}}$	[mm/min]	Rýchlosť tlačovej hlavy
$S_{\text{filamentu}}$	[mm ²]	Plocha prierezu struny filamentu
$V_{\text{filamentu}}$	[mm/min]	Prísuvná rýchlosť filamentu
H	[mm]	Výška vrstvy
B	[mm]	Šírka rastra
R	[mm]	Polomer zaoblenia uloženého filamentu
n	[min ⁻¹]	Otáčky podávacieho prístroja
$d_{\text{filamentu}}$	[mm]	Priemer struny filamentu
$R_{\text{podávača}}$	[mm]	Polomer podávacieho kolesa
ω	[rad/min]	Uhlová rýchlosť podávacieho kolesa
E	[Pa]	Youngov modul pružnosti
ε	[-]	Pomerné predĺženie
σ	[Pa]	Napätie
l	[mm]	Dĺžka vzorky
Δl	[mm]	Predĺženie vzorky
R_m	[Pa]	Medza pevnosti
$Q_{\text{tlačé}}$	[mm ³ /s]	Objemový prietok uloženého filamentu
$Q_{\text{filamentu}}$	[mm ³ /s]	Objemový prietok filamentu na vstupe

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Konverzia modelu na sieť trojuholníkov [1].....	12
Obr. 2-2 Schéma výroby pomocou FDM [2]	13
Obr. 2-3 Schéma výroby pomocou SLA [2]	14
Obr. 2-4 Schéma výroby pomocou SLS [2].....	14
Obr. 2-5 Schéma výroby pomocou technológie Binder jetting [2]	15
Obr. 2-6 Schématické konfigurácie tlačiarňí FDM (a) kartézska, (b) delta (c) polárna a (d) robotické rameno [5]	19
Obr. 2-7 Grafická závislosť hmotnosti a pevnosti v ťahu v závislosti na teplote extrudera (190-230°C) [6]	20
Obr. 2-8 porovnanie dvoch ťahových skúšok s variabilnou výškou vrstvy [9] [10].....	21
Obr. 2-9 Profily rastrov v priečnom reze pri rôznych výškach trysky o priemere 0,4mm [12]	21
Obr. 2-10 Bežné vzory výplne dostupné v slicer softwaroch (a) 2D vzory (b) 3D vzory [5]	22
Obr. 2-11 výsledky ťahovej skúšky (hore) a skúšky namáhania v ohybe (dole) s rôznymi vzormi výplne [14].....	23
Obr. 2-12 Vyobrazenie rôznych hodnôt hustoty výplne [5]	24
Obr. 2-13 Výsledky ťahovej skúšky s rôznymi hodnotami hustoty výplne [9].....	24
Obr. 2-14 Závislosť pevnosti v ťahu na rýchlosti tlače (30-90 mm/s) [6].....	25
Obr. 2-15 Mikro-defekty (a) uzavretá vzduchová bublina (b) spálený materiál (c) kontaminácia iným materiálom [17].....	26
Obr. 2-16 Plošné poruchy (a) nestály priemer a ohnutý filament (b) nedostatočné materiálne väzby [17].....	26
Obr. 2-17 Diagram druhov kavít (a) Medzi-rastrové (b) Pod-výplň (c) Vnútro-rastrové (d1) Schodovitý efekt (d2) Povrchové [12]	28
Obr. 2-18 Zníženie porozity pomocou metódy alternujúcich vrstiev pre vybrané výšky [19]	30
Obr. 2-19 Ťahové diagramy pre spektrum materiálov[20].....	31
Obr. 4-1 Testovacia vzorka pre ťahovú skúšku ISO 527-1A [25]	34
Obr. 4-2 Tvar testovacej vzorky	35

Obr. 4-3 KUKA KR8 R1620 pri tlači	36
Obr. 4-4 Extrudér pripevnený na robotickom ramene	36
Obr. 4-5 Hot end extrudéru	37
Obr. 4-6 Tvar extrudovaného filamentu	38
Obr. 4-7 Tvorba krčku na ťahovej vzorke [23]	40
Obr. 5-1 Natrhané vzorky s nízkou výškou vrstvy.....	41
Obr. 5-2 Vzorka pretrhnutá na dvoch miestach súčasne	41
Obr. 5-3 Porovnanie priečných rezov v mieste lomu	42
Obr. 5-4 Interpolácia závislosti medze pevnosti [MPa] na jednotlivých parametroch	42
Obr. 5-5 Pareto diagram účinku	43
Obr. 5-6 Graf medze pevnosti [MPa] pre vzorky s medzi-rastrovou vzdialenosťou 2,3mm	44
Obr. 5-7 Graf medze pevnosti [MPa] pre vzorky s medzi-rastrovou vzdialenosťou 2,1mm	44
Obr. 5-8 Graf medze pevnosti [MPa] pre vzorky s medzi-rastrovou vzdialenosťou 1,9 mm	45
Obr. 6-1 Jav vibrácií tlačovej hlavy na vzorke	48

11 SEZNAM TABULEK

Tabuľka 2-1 Súhrn vlastností materiálov	17
Tabuľka 4-1 Prehľad experimentálnych hodnôt parametrov.....	35
Tabuľka 5-1 Súhrn výsledkov ťahovej skúšky a tlač.....	46

12 SEZNAM PŘÍLOH

Príloha 1 – Laboratórny protokol ťahovej skúšky