

Návrh technologických podmínek pro 3D tisk za použití zařízení Creality CR-10

Bc. Jakub Nevřala

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Nevřala**
Osobní číslo: **T22634**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Návrh technologických podmínek pro 3D tisk za použití zařízení Creality CR 10**

Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Provedení výroby vzorků pro experiment
3. Měření mechanických vlastností
4. Zpracování a vyhodnocení získaných dat
5. Vyhodnocení experimentu

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

Seznam doporučené literatury:

DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0

KELLY, Brett E., et al. *Volumetric additive manufacturing via tomographic reconstruction*. *Sciens*, 2019, 363.6431: 1075-1079.

BORELL, David, et al. *Materials for additive manufacturing*. *CIRP annals*, 2017, 66.2: 659-681

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Knedlová, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 1. března 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá zkoumáním vlivu technologických podmínek na mechanické vlastnosti těles vyrobených na FDM 3D tiskárně Creality CR-10. Za rozdílných teplot trysky a rozdílných rychlostí tisku byla vytištěna zkušební tělesa na tahovou zkoušku a zkoušku vrubové houževnatosti těm byly následně měřeny vnější rozměry, a pak byly testovány jejich mechanické vlastnosti. Výsledná data byla použita pro návrh optimálních technologických podmínek pro tisk za použití zařízení Creality CR-10.

Klíčová slova: 3D tisk, mechanické zkoušky, teplota tisku, rychlost tisku

ABSTRACT

This thesis investigates the impact of technological conditions on the mechanical properties of objects produced on an FDM 3D printer, Creality CR-10. Samples were printed under varying nozzle temperatures and printing speeds. Subsequently, their external dimensions were measured, and they were tested for tensile strength and notch toughness. The resulting data were used to design optimal technological conditions for 3D printing using the Creality CR-10 device.

Keywords: 3D printing, mechanical testing, printing temperature, printing speed

Děkuji paní Ing. Janě Knedlové, Ph.D. za vedení, rady, připomínky, vstřícnost a ochotu během vypracovávání mé diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc s měřením v praktické části práce, také Ing. Jánovi Mildeovi, Ph.D. z Materiálově-technologické fakulty Slovenské technické univerzity v Trnavě (MTF STUBA) za provedení 3D měření.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 TISK 3D	11
1.1 HISTORIE	11
1.2 DĚLENÍ TECHNOLOGIÍ.....	12
1.2.1 Spékání nebo lepení prášku.....	12
1.2.2 Vytvrzování UV zářením	15
1.2.3 Lepení jednotlivých vrstev	18
1.2.4 Vytlačování	20
1.2.5 Spojování pomocí ultrazvuku.....	23
1.3 APLIKACE V PRŮMYSLU	24
1.4 MATERIÁLY PRO FDM	25
1.5 KONSTRUKCE TISKÁREN FDM	27
1.6 NEŽÁDOUCÍ JEVY A CHYBY PŘI TISKU.....	28
1.7 TISKÁRNA CREALITY CR-10.....	30
1.7.1 Parametry tisku.....	31
1.7.2 Části tiskárny.....	32
1.8 SOFTWARE CAD	34
1.9 SLICER.....	34
2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU	36
2.1 HISTORIE.....	36
2.2 ROZDĚLENÍ TECHNOLOGIÍ	36
2.2.1 Statické zkoušky.....	36
2.2.2 Dynamické zkoušky	37
3 MĚŘENÍ 3D	39
3.1 HISTORIE.....	39
3.2 DĚLENÍ TECHNOLOGIÍ.....	39
II PRAKTICKÁ ČÁST	41
4 CÍLE PRÁCE	42
5 TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY	43
6 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	44
7 NÁVRH PRACOVNÍCH PODMÍNEK	45
8 VÝROBA VZORKŮ	46
8.1 TVORBA MODELŮ	46
8.2 ROZVRSTVENÍ	46

8.3	TISK	54
8.3.1	Testovací tisk.....	54
8.3.2	Konečný tisk.....	54
8.3.3	Dočištění výtisků.....	55
9	MĚŘENÍ 3D.....	57
9.1	POSTUP.....	57
9.2	MĚŘENÍ.....	58
10	MĚŘENÍ POSUVNÝM MĚŘIDLEM.....	59
11	ZKOUŠKA TAHEM.....	60
11.1	PROVEDENÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY	61
11.2	VYHODNOCOVANÉ PARAMETRY	62
12	ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....	64
12.1	PROVEDENÍ ZKOUŠKY VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI	65
12.2	VYHODNOCOVANÉ PARAMETRY	66
13	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	67
13.1	VYHODNOCENÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY	67
13.2	VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....	70
13.3	VYHODNOCENÍ 3D MĚŘENÍ	73
13.4	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ POSUVNÝM MĚŘIDLEM.....	75
ZÁVĚR	86	
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	87	
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	89	
SEZNAM OBRÁZKŮ	91	
SEZNAM TABULEK.....	93	
SEZNAM PŘÍLOH.....	94	

ÚVOD

Technologie 3D tisku, založená na aditivní výrobě, se v posledních letech stala důležitým prvkem průmyslové inovace, což otevírá nové možnosti ve výrobě, zdravotnictví, architektuře a mnoha dalších oblastech. Díky schopnosti tisknout přesné a složité geometrické tvary přímo z digitálních modelů, nabízí 3D tisk značné výhody oproti tradičním výrobním metodám, jako jsou rychlost, efektivita a významná redukce materiálového odpadu. Flexibilita výběru materiálů umožňuje navíc vytvářet výrobky s přizpůsobenými vlastnostmi, které by jinak byly těžce realizovatelné.

Vzhledem k rostoucímu významu 3D tisku v různých průmyslových odvětvích se tato práce zaměřuje na hlubší pochopení a aplikaci této technologie. Cílem je provedení komplexní literární rešerše současných technologií a materiálů používaných v 3D tisku. Dále práce obsahuje experimentální část, v rámci které byly vyrobeny vzorky za různých technologických podmínek. Tyto vzorky byly následně podrobeny měření a analýze, aby byly posouzeny jejich mechanické a fyzikální vlastnosti. Na základě zpracovaných a vyhodnocených dat je hodnocena efektivita a aplikovatelnost jednotlivých technologických Celkově práce kombinuje teoretické poznatky s praktickým experimentem, což umožňuje ucelený pohled na problematiku FDM 3D tisku. Přínosem tohoto experimentu má být poskytnutí přehledu o současném stavu technologie a zjištění vlivu technologických podmínek na mechanické vlastnosti tištěných součástí. Experiment bude prováděn na 3D tiskárně Creality CR-10

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TISK 3D

Technologie aditivní výroby zvaná 3D Tisk, představuje inovativní technologii, která umožňuje vytváření třírozměrných objektů vrstva po vrstvě na základě digitálního modelu. Tato revoluční metoda se odlišuje od tradičních výrobních postupů, které často využívají odebírání materiálu či jeho formování. Ve 3D tisku je materiál postupně nanášen či svařován, což umožňuje detailní a složité tvary, které by jinak byly obtížně dosažitelné. Tato technologie nachází uplatnění v široké škále odvětví, od průmyslové výroby prototypů až po tvorbu uměleckých děl a zdravotnického vybavení. Díky schopnosti vytvářet objekty od základu a podle konkrétních potřeb uživatele získává 3D tisk stále větší popularitu a přispívá k inovacím v oblasti designu, průmyslu a medicíny. Všechny technologie 3D tisku jsou charakterizovány tím, že jsou numericky řízené a pracují na základě digitálního modelu objektu. Tato klíčová vlastnost umožňuje přesné a opakovatelné vytváření třírozměrných struktur v souladu s designem daným digitálním modelem. Proces začíná vytvořením digitálního modelu pomocí CAD (Computer-Aided Design) software, který popisuje tvar a geometrii objektu [1; 2; 3; 4]

1.1 Historie

Historie 3D tisku sahá do druhé poloviny 20. století, kdy byly položeny základy pro vývoj této revoluční technologie. V roce 1950 vytvořil francouzský vynálezce André Blondel první patent na metodu fotopolymerního tisku, který lze považovat za předchůdce moderního 3D tisku. Tato metoda využívala postupné nanášení tenkých vrstev fotosenzitivních materiálů, které byly vytvrzovány světlem, a tím se vytvářely třírozměrné objekty. I když Blondelova metoda nebyla v té době plně realizovatelná, položila základy pro budoucí vývoj 3D tisku.

Dalším významným milníkem v historii 3D tisku bylo v roce 1983 založení společnosti 3D Systems, kterou založil Chuck Hull, jenž je považován za otce 3D tisku, protože vymyslel a patentoval proces nazvaný stereolitografie (SLA). Tato metoda využívala laser k tuhnutí vrstvy fotopolymeru, čímž umožňovala postupné vytváření třírozměrných objektů. Stereolitografie se stala první komerčně dostupnou technologií a otevřela cestu pro další inovace v oboru.

V 90. letech 20. století začaly vznikat další technologie 3D tisku, jako je Fused Deposition Modeling (FDM) vynalezená Scottem Crumpem. FDM se stal populární díky své jednoduchosti a nízkým nákladům, což přispělo k rozšíření 3D tisku do průmyslu i širší veřejnosti. Od té doby proběhly desítky let intenzivního vývoje a inovací v oblasti 3D tisku,

což vedlo k širokému využití této technologie v průmyslu, vědě, zdravotnictví a mnoha dalších odvětvích.[1; 2; 5; 6; 3; 4]

1.2 Dělení technologií

Dělení 3D tisku podle technologie výroby součásti poskytuje pohled na pestrost postupů, které umožňují aditivní výrobu třírozměrných objektů. Každá z těchto technologií přináší unikátní přístup k vytváření objektů. Tato klasifikace umožňuje lépe porozumět jednotlivým technologiím a výhodám, které přinášejí v různých odvětvích. V následujícím popisu jsou jednotlivé technologie podrobněji rozebrány s důrazem na jejich charakteristické vlastnosti a praktické využití. [7; 3; 4]

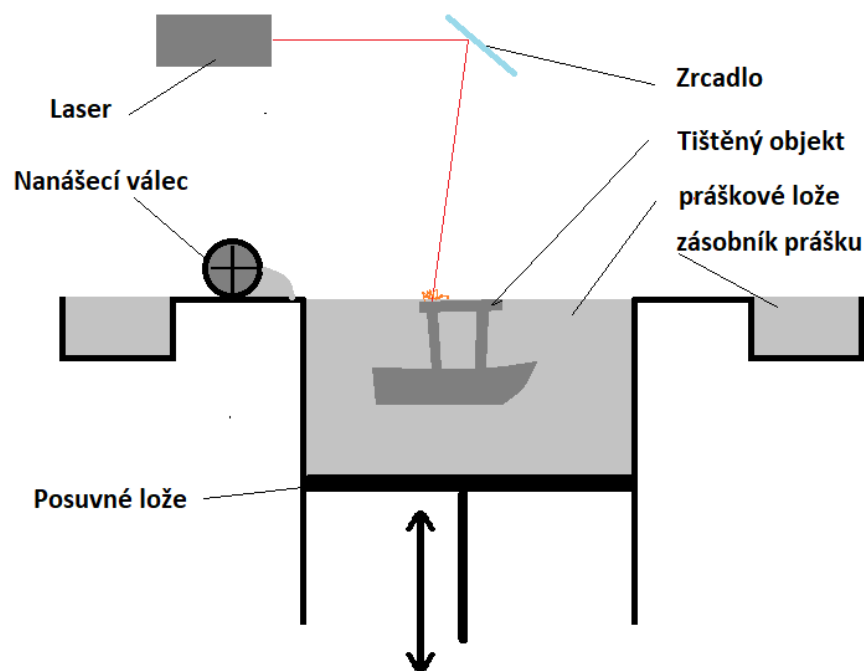
1.2.1 Spékání nebo lepení prášku

Technologie založené na spékání prášku jsou často součástí širší kategorie známé jako "Powder Bed Fusion" (PBF). Sem patří několik specifických metod 3D tisku, které využívají práškové materiály a postupné svařování nebo spékání vrstev.

Selective Laser Sintering (SLS) (Obr. 1, str. 13) patří mezi pokročilé metody aditivní výroby, která umožňuje vytvářet třírozměrné objekty vrstva po vrstvě pomocí svařování práškového materiálu. Princip fungování spočívá v postupném nanášení tenké vrstvy práškového materiálu na stavební podložku. Laser je pak přesně zaměřen na ty oblasti vrstvy, které odpovídají tvaru objektu dle digitálního 3D modelu. Laser zvyšuje teplotu práškového materiálu na bod svaření, což způsobí svaření nebo sinterování částic. Jakmile jedna vrstva je dokončena, stavební podložka klesá o jednu vrstvu a proces se opakuje, dokud není celý objekt kompletně vytvořen.

Existují široké možnosti použití v různých odvětvích. Jedním z hlavních benefitů této metody je schopnost tisknout komplexní geometrie a struktury bez potřeby podpůrných materiálů, které jsou často nutné u jiných technologií. To znamená, že SLS je ideální pro výrobu prototypů, funkčních dílů i malosériovou výrobu. V automobilovém průmyslu se využívá pro tisk komponent, v lékařství pro výrobu ortopedických implantátů a v architektuře pro tvorbu modelů a prototypů staveb.

SLS přináší flexibilitu a možnost vytvářet objekty z různých materiálů, včetně plastů, kovů a keramiky.[8]



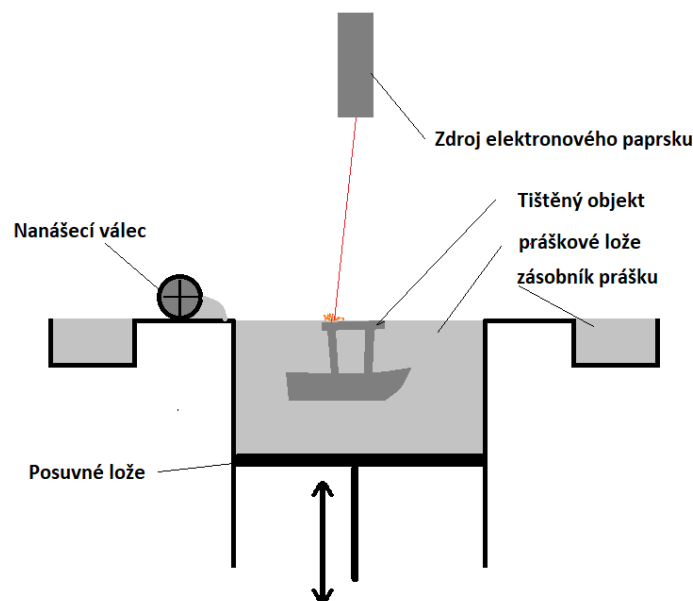
Obrázek 1 Metoda SLS

Selective Laser Melting (SLM) je vysoce pokročilou metodou aditivní výroby, která umožňuje vytvářet třírozměrné objekty z kovových materiálů. Princip fungování této technologie spočívá v postupném roztavení a svařování jemného práškového materiálu za pomoci laseru na základě digitálního 3D modelu. Proces začíná nanášením tenké vrstvy kovového prášku na stavební podložku. Laser poté přesně a selektivně zahřeje část práškové vrstvy na teplotu tání. Tímto způsobem dojde k úplnému roztavení materiálu, který následně tuhne a vytváří pevnou kovovou vrstvu. Postup se opakuje, vrstva po vrstvě, až je celý objekt dokončen.

Možnosti využití technologie *Selective Laser Melting* jsou rozmanité a nachází uplatnění v různých odvětvích. V oblasti průmyslové výroby se SLM často využívá pro výrobu složitých a vysoce přesných kovových dílů, zejména v letectví a automobilovém průmyslu. V lékařství umožňuje tato metoda vytvářet precizní ortopedické implantáty a chirurgické nástroje s optimalizovaným tvarem pro konkrétního pacienta. SLM nachází uplatnění také v oblasti výzkumu a vývoje, umožňuje tvorbu prototypů a inovativních designů. Tato technologie přináší výhody, jako je vysoká přesnost, možnost vytvářet složité struktury a schopnost pracovat s různými typy kovů.[7]

Electron Beam Melting (EBM) (Obr. 2) je specifická metoda aditivní výroby, která umožňuje vytvářet třírozměrné objekty z kovových materiálů. Princip fungování této technologie spočívá v používání elektronového paprsku namísto laseru, který roztavuje a svařuje práškový kovový materiál na základě digitálního 3D modelu. Práškový materiál je nanášen na stavební podložku a elektronový paprsek se přesně řídí podle digitálních instrukcí, což umožňuje postupné roztavení a spojování materiálu ve vrstvách.

Možnosti použití technologie Electron Beam Melting jsou široké a zahrnují různá odvětví průmyslu. Výhodou EBM je možnost tisknout objekty s vysokou pevností a odolností, což z ní činí vhodnou metodu pro výrobu komponent v odvětví leteckého a kosmického průmyslu, kde je klíčovým faktorem odolnost a lehkost materiálů. Díky schopnosti tisknout velmi tepelně odolné kovové materiály se EBM využívá také v energetice, zejména v oblasti výroby komponent pro tepelné generátory nebo turbíny. V lékařství se metoda EBM uplatňuje při výrobě chirurgických nástrojů nebo ortopedických implantátů. Tato technologie přináší výhody v podobě vysoké přesnosti, možnosti tisknout složité geometrie a schopnosti pracovat s různými druhy kovů. [7]



Obrázek 2 Metoda EBM

Binder Jetting je specifická technologie aditivní výroby, která umožňuje tisknout třírozměrné objekty postupným vázáním práškového materiálu pomocí kapaliny pojiva. Princip fungování této metody začíná nanášením tenké vrstvy práškového materiálu na

stavební podložku. Následně je aplikováno pojivo v místech, kde má dojít ke spojení částic. Tímto způsobem se vytváří postupné vrstvy spojené pojivem. Po dokončení tisku může být objekt podroben dodatečným procesům, jako je odstranění nepotřebného prášku nebo tepelné zpracování k dosažení požadovaných vlastností.

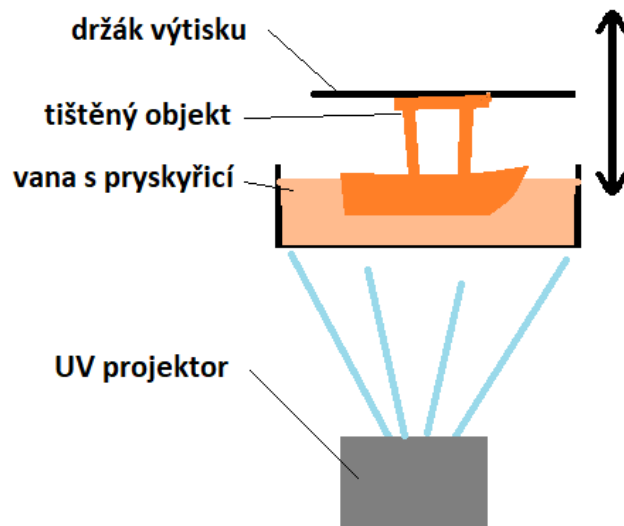
Uplatnění najde v různých odvětvích průmyslu. V oblasti výroby prototypů a funkčních dílů poskytuje tato metoda efektivní a nákladově přijatelný způsob vytváření objektů s relativně rychlým tiskem. Výhodou je také možnost tisknout objekty s různými materiály, včetně kovů, keramiky nebo plastů. V automobilovém průmyslu se Binder Jetting využívá k výrobě prototypů a komponent, které splňují požadavky na pevnost a odolnost. V lékařství může být tato metoda využita pro výrobu ortopedických implantátů nebo protéz. Binder Jetting nabízí flexibilitu a různorodost materiálů, což umožňuje přizpůsobení tisku konkrétním potřebám a specifikacím dané aplikace.[9]

1.2.2 Vytvrzování UV zářením

Stereolithography (SLA) (Obr. 3, str. 16) patří mezi první a stále široce využívané metody 3D tisku založené na vytvrzování UV zářením. Princip fungování SLA spočívá v postupném vytvrzování tenkých vrstev světelně tuhnutelné pryskyřice pomocí UV laseru. Proces začíná nanášením tenké vrstvy pryskyřice na stavební podložku. Následně je laser přesně řízen podle digitálního 3D modelu objektu, aby světelně tuhnutelnou pryskyřici postupně vytvrzoval v požadovaném tvaru. Po dokončení jedné vrstvy se stavební podložka pohybuje o úroveň níže a proces se opakuje, dokud není celý objekt vytvořen.

Možnosti použití technologie SLA jsou rozmanité a nacházejí uplatnění v různých odvětvích. V oblasti prototypování a designu umožňuje SLA rychlou a přesnou výrobu prototypů s hladkými povrchy a vysokým rozlišením. V architektuře a designu je SLA využívána k vytváření modelů a vizualizací. V lékařství se tato metoda používá pro výrobu chirurgických modelů a ortopedických implantátů s přesnými geometriemi. V průmyslovém sektoru SLA nachází využití v tvorbě dílů pro malosériovou výrobu a vytváření složitých konstrukčních částí.

Tato technologie je ceněna pro svou schopnost tisknout s vysokou přesností a reprodukovat detaily, což ji činí klíčovým nástrojem v oblasti aditivní výroby.[10; 11]



Obrázek 3 Metoda SLS

Digital Light Processing (DLP) představuje jednu z metod 3D tisku založenou na vytvrzování UV zářením. Princip fungování DLP spočívá v používání digitálního projektoru k vyzařování UV světla na celou vrstvu světelně tuhnutelné pryskyřice najednou. Tímto způsobem dochází k současnému vytvrzení celé vrstvy, což může zrychlit proces tisku ve srovnání s jinými technologiemi, jako je například Stereolithography (SLA).

Možnosti použití technologie DLP jsou rozsáhlé a nacházejí uplatnění v několika odvětvích. V oblasti výroby prototypů a designu umožňuje DLP rychlou a efektivní výrobu objektů s vysokým rozlišením a hladkými povrchy. V průmyslovém sektoru může být tato metoda využívána k vytváření komplexních dílů pro malosériovou výrobu. V odvětví zdravotnictví nachází DLP uplatnění při výrobě zubních modelů, chirurgických nástrojů nebo ortopedických implantátů. V architektuře a stavebnictví může být DLP používána pro vytváření modelů a prototypů staveb. Kombinace rychlosti a vysoké přesnosti DLP tisku činí tuto technologii atraktivní pro širokou škálu aplikací, kde je klíčová kvalita a detailní zpracování tisknutých objektů.[11]

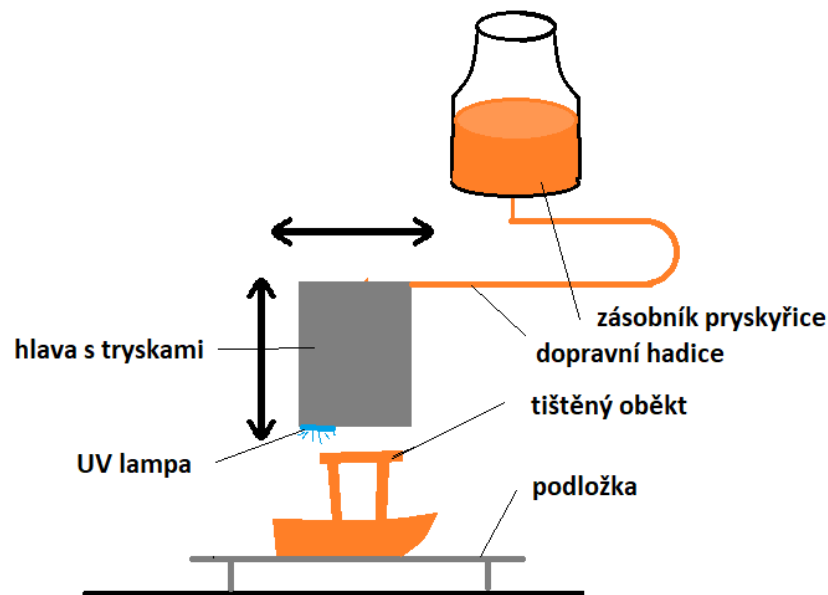
Continuous Liquid Interface Production (CLIP) je inovativní technologie aditivní výroby, která představuje pokrok v oblasti 3D tisku založeném na vytvrzování UV zářením. Oproti tradičním metodám používá kontinuálního pohybu stavební platformy a nepřetržitého vytvrzování světelně tuhnutelné pryskyřice za použití UV světla. Tento proces umožňuje vysoce rychlý tisk a efektivní vytváření složitých geometrií.

Tato technologie kombinuje digitální projekci obrazu s UV světlem a speciálními pryskyřicemi, které reagují na světlo. Při tisku je stavební platforma ponořena do nádoby s kapalnou pryskyřicí a digitální projektor vytváří kontinuální obraz tvaru objektu na hladině pryskyřice. UV světlo následně postupně tuhne pryskyřici a stavební platforma se pohybuje ven z nádoby, čímž umožňuje další vrstvu tisku.

Možnosti použití technologie CLIP jsou široké a nacházejí uplatnění v různých odvětvích. V oblasti průmyslu umožňuje rychlý a přesný tisk vytváření prototypů a funkčních dílů. CLIP se využívá i v lékařství pro výrobu ortopedických implantátů s komplexními tvary a strukturami. Díky schopnosti tisknout s vysokým rozlišením a rychlostí najde uplatnění také v oblasti designu a architektury pro tvorbu modelů a prototypů s vysokou detailností.[10]

PolyJet (Obr. 4, str. 18) je metoda aditivní výroby, která využívá nanášení tenkých vrstev světelně tuhnutelné pryskyřice. Proces tisku spočívá v postupném stříkání pryskyřice malými tryskami, kde každá tryska odpovídá jedné vrstvě digitálního 3D modelu. Současně s aplikací pryskyřice je aplikována i podpora, která umožňuje tisk složitých struktur a převislých prvků. Po nanesení jedné vrstvy je pryskyřice vystavena UV světlu, což způsobí její tuhnutí nebo vytvrzování.

Možnosti použití technologie jsou rozmanité a nacházejí se v různých odvětvích. V oblasti designu a vývoje umožňuje tisk vysoce detailních prototypů a konceptů s hladkými povrchy. V odvětví zdravotnictví se *PolyJet* využívá pro výrobu anatomických modelů, chirurgických šablon a ortopedických implantátů s přesnými geometriemi. V architektuře a stavebnictví umožňuje tisk modelů staveb s realistickými detaily a texturami. Tato metoda také nachází uplatnění v průmyslovém designu, kde umožňuje vytvářet díly s komplexními tvary a složitými strukturami.[10]



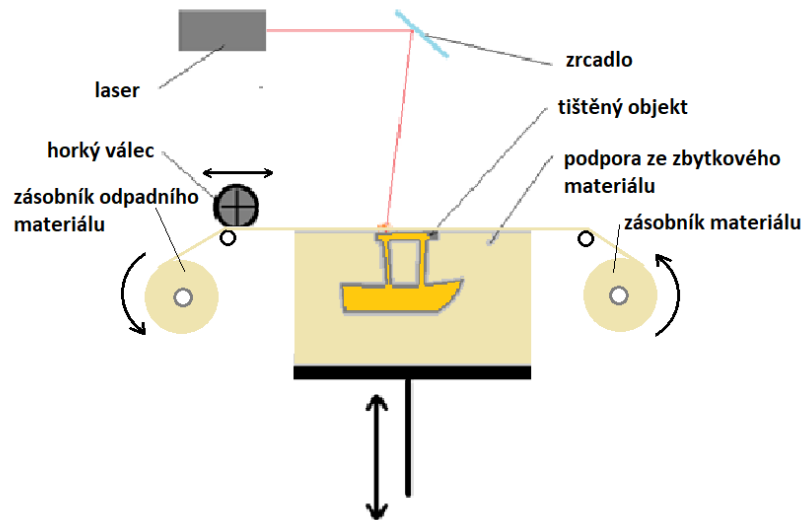
Obrázek 4 Metoda PolyJet

1.2.3 Lepení jednotlivých vrstev

Laminated Object Manufacturing (LOM) (Obr. 5, str. 19) je technologie 3D tisku, která využívá postupného lepení a řezání tenkých vrstev materiálu, obvykle papíru nebo plastových fólií, pro vytváření třírozměrných objektů. Proces začíná vrstvou materiálu, která je umístěna na stavební podložku. Následně laser nebo jiné řezací zařízení přesně vystříhne tvar objektu z této vrstvy. Po vystřížení je další vrstva materiálu přidána a postup se opakuje, dokud není celý objekt vytvořen. Na konci procesu může být tisknutý objekt odstřížen od přebytečného materiálu.

Možnosti použití technologie LOM jsou různorodé a nalézají uplatnění v několika odvětvích. V oblasti prototypování a vývoje umožňuje LOM rychlou výrobu prototypů s relativně nízkými náklady na materiály. Díky schopnosti pracovat s papírem nebo plastem může být tato metoda využita k tisku prototypů předmětů s podobnými vlastnostmi jako finální produkty. V architektuře a stavebnictví může LOM poskytovat efektivní způsob vytváření modelů a vizualizací.

Přestože tato metoda může mít omezenou přesnost a detailnost ve srovnání s jinými technologiemi, nabízí výhody v jednoduchosti a nízkých nákladech na provoz.



Obrázek 5 Metoda LOM

Sheet Lamination (SL) je technologie 3D tisku, která se zakládá na postupném lepení nebo spojování tenkých vrstev materiálu pro vytváření třírozměrných objektů. Tato metoda může zahrnovat různé materiály, včetně papíru, plastu nebo kovových fólií. Proces začíná vrstvou materiálu, která je aplikována na stavební podložku. Následně je nanášeno pojivo nebo prováděno tepelné spojování na určených místech podle digitálního modelu. Postupným lepením nebo spojováním vrstev se vytváří pevný třírozměrný objekt.

Možnosti použití technologie *Sheet Lamination* jsou různorodé a nacházejí uplatnění v několika odvětvích. V oblasti výroby prototypů a modelování umožňuje SL rychlou a nákladově efektivní výrobu třírozměrných objektů. Díky schopnosti pracovat s různými materiály může být tato metoda využita k vytváření prototypů s různými vlastnostmi, včetně pevnosti, pružnosti nebo dokonce elektrické vodivosti.

V průmyslovém sektoru může být *Sheet Lamination* využívána pro výrobu jednoduchých dílů, šablon nebo komponent, zejména tam, kde jsou požadovány nižší náklady na tisk a kde není kladen důraz na vysokou přesnost nebo složité detaily. Navíc může být tato metoda uplatněna v architektuře pro vytváření modelů staveb nebo v designu pro tisk prototypů a konceptů s různými materiály a vlastnostmi.[12]

Rozdíly Laminated Object Manufacturing (LOM) a Sheet Lamination (SL) jsou to dvě metody 3D tisku, které sdílí podobný princip postupného lepení tenkých vrstev materiálu pro vytváření třírozměrných objektů. Nicméně, existují některé klíčové rozdíly mezi těmito dvěma technologiemi. LOM používá papír nebo plastové fólie jako hlavní stavební materiál. Proces zahrnuje řezání laserem, aby byly vystřiženy tvarované vrstvy, které jsou následně lepeny na sebe. Po dokončení tisku může být odstraněn přebytečný materiál a tisknutý objekt zůstane. Naopak, technologie Sheet Lamination může zahrnovat různé materiály, včetně papíru, plastu nebo kovových fólií. V této metodě je materiál buď lepen nebo spojován na určených místech podle digitálního modelu. Postupným lepením nebo spojováním vrstev se vytváří konečný objekt.

Zásadním rozdílem je tedy ve způsobu spojování vrstev. LOM využívá laser pro vystřihování a následné lepení, zatímco Sheet Lamination může využívat různé metody, včetně lepení nebo tepelného spojování. Dalším rozdílem může být v používaných materiálech a v konkrétních technických parametrech každé metody.

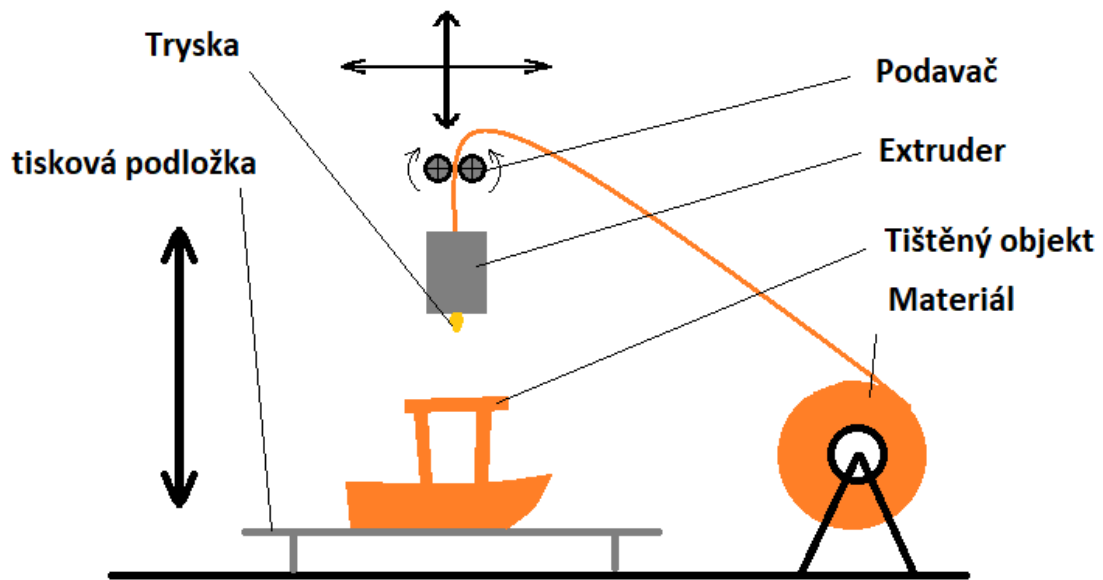
1.2.4 Vytlačování

Fused Deposition Modeling (FDM) (Obr. 6, str. 21) nebo jiným názvem *Fused Filament Fabrication* (FFF) představuje jednu z nejrozšířenějších technologií 3D tisku založenou na vytlačování. Tato metoda využívá termoplastický filament, který je zahříván ve tiskací hlavě a následně vytlačován skrz trysku vrstva po vrstvě na stavební podložku. Jakmile je jedna vrstva tisknutého materiálu vytlačena, stavební podložka klesne, umožňující další nanášení vrstvy. Tento proces se opakuje, až je celý objekt vytisknutý.

Možnosti použití technologie FDM jsou rozmanité a nalézají uplatnění v různých odvětvích. V oblasti prototypování a vývoje umožňuje FDM rychlou a nákladově efektivní výrobu prototypů a funkčních dílů. Díky široké škále dostupných materiálů, včetně různých plastů a kompozitů, lze tisknout objekty s různými vlastnostmi, jako jsou pevnost, pružnost nebo tepelná odolnost.

FDM tisk se často využívá v průmyslovém designu pro výrobu různých komponent, od plastových dílů až po nástroje. V oblasti zdravotnictví se tato metoda využívá pro tisk modelů orgánů pro chirurgickou přípravu nebo pro výrobu ortopedických pomůcek.

Vzdělávací instituce také využívají FDM pro výuku 3D tisku, protože je to přístupná a relativně jednoduchá technologie. FDM tiskárnou lze tvořit různé objekty od domácích vylepšení až po umělecká díla, což tuto technologii činí široce přístupnou a praktickou.[10; 6]



Obrázek 6 Metoda FDM

Pellet Extrusion je varianta technologie Fused Deposition Modeling (FDM), která se liší v použití plastových granulí (pellet) namísto standardního filamentu jako základního materiálu pro tisk. Tato metoda zahrnuje proces, kde jsou plastové granule převedeny do vytlačovací hlavy, zahřáty na teplotu tavení a následně vytlačovány skrz trysku na stavební podložku. Postupným nanášením vrstev se vytváří třírozměrný objekt.

Pellet Extrusion přináší několik výhod. Jednou z nich je možnost využití levnějších plastových granulí ve srovnání s tradičním filamentem, což může být ekonomicky výhodné. Tato technologie také poskytuje možnost přizpůsobení tisku pomocí různých typů granulí a směsí, což umožňuje tisknout objekty s různými vlastnostmi a barevnými kombinacemi.

Pellet Extrusion nachází uplatnění v průmyslovém designu, výrobě prototypů a vytváření funkcionalit v odvětvích, kde je kladen důraz na materiálové vlastnosti. Tato metoda může být využívána pro tisk různých komponentů, od pevných dílů až po prototypy se specifickými materiálovými charakteristikami.

Syringe Extrusion představuje specifickou technologii 3D tisku, která využívá princip extruze pomocí tiskací hlavy podobné injekční stříkačce. Tato metoda umožňuje přesné dávkování a vytlačování viskózních materiálů, jako jsou hydrogely, bioinky nebo speciální polymerní směsi, vrstva po vrstvě na stavební podložku. Syringe Extrusion je často využívána v oblasti bio-tisku, kde se tisknou biologické struktury nebo orgány.

Tento proces začíná naplněním tiskací stříkačky vybraným materiálem. Tiskací hlava se pak pohybuje podle digitálního modelu, přičemž vytlačuje přesně definované množství materiálu na správná místa. Postupným nanášením vrstev a jejich tuhnutím nebo polymerizací vytváří tato metoda třírozměrný objekt.

Syringe Extrusion má klíčové uplatnění v biomedicíně, kde může být využívána pro výrobu modelů orgánů pro lékařské výzkumy nebo dokonce pro tisk funkčních tkání a orgánů. Díky schopnosti pracovat s biokompatibilními materiály může Syringe Extrusion také sloužit k vývoji personalizovaných léčebných metod a regenerativní medicíně. Tato technologie poskytuje přesnost a kontrolu při tisku viskózních materiálů, což ji činí vhodnou volbou pro aplikace v oblasti biotisku a pokročilého lékařského výzkumu.

Ceramic Extrusion představuje inovativní technologii 3D tisku zaměřenou na vytváření keramických objektů. Tato metoda využívá procesu extruze, kde keramický materiál, obvykle ve formě prášku nebo granulí, je smíchán s pojivem a následně vytlačován skrz trysku na stavební podložku. Jakmile je vrstva materiálu vytlačena, postupně tuhne nebo prochází procesem sinterace, což vytváří pevný a odolný keramický objekt.

Tato technologie poskytuje možnost vytvářet složité a precizní keramické struktury s vysokou tepelnou a chemickou odolností. Ceramic Extrusion může být využívána pro tisk různých keramických materiálů, včetně oxidů, karbidů a nitridů, což rozšiřuje spektrum možných aplikací.

V průmyslovém odvětví nachází Ceramic Extrusion uplatnění například v oblasti výroby odolných komponent, keramických filtračních prvků nebo dokonce v oblasti elektroniky pro výrobu keramických substrátů. Výhody této metody spočívají v možnosti pracovat s rozmanitými keramickými materiály a vytvářet objekty s vysokou přesností a odolností. Tato technologie přináší nové perspektivy v oblasti keramické výroby s využitím moderních postupů 3D tisku.

Concrete Extrusion představuje pokročilou technologii 3D tisku, která se specializuje na tisk betonu. Tato metoda využívá extruzního procesu, kde směs cementu, písku, vody a dalších

případných přísad je vytlačována skrz tiskací hlavu na stavební podložku. Extrudovaný materiál tvrdne nebo se vystavuje postupnému procesu tuhnutí, což vytváří vrstvu po vrstvě kompaktní a odolnou betonovou strukturu.

Concrete Extrusion je široce využívána v oblasti stavebnictví pro tisk různých stavebních prvků, od zdí a panelů až po celé domy nebo mosty. Tato technologie umožňuje rychlejší a efektivnější výstavbu ve srovnání s tradičními metodami, a zároveň poskytuje možnost vytvářet unikátní a složité architektonické tvary.

V průmyslovém odvětví nachází Concrete Extrusion uplatnění také v produkci speciálních betonových komponentů pro infrastrukturní projekty, jako jsou opěrné zdi, kanalizační trubky nebo ochranné bariéry. Tato technologie přináší inovace v oblasti stavebního průmyslu a otevírá cestu k udržitelnějším a efektivnějším metodám výstavby pomocí 3D tisku betonu.

Food Extrusion je specifická technologie 3D tisku, která se specializuje na tisk potravinářských materiálů. Tato metoda využívá podobný princip extruze jako v jiných extruzních technologiích, ale s důrazem na materiály, které jsou bezpečné pro konzumaci. Potravinářské suroviny jsou převedeny do tiskací hlavy a následně vytlačovány na stavební podložku či do speciální formy, tvořící potravinový produkt.

Food Extrusion nachází uplatnění především v oblasti gastronomie a potravinářského průmyslu. Tato technologie umožňuje tisk různých druhů potravin, včetně těstovin, dezertů, čokolády nebo výrobu jedinečných stravovacích konceptů. S ohledem na bezpečnost a kvalitu potravin je kladen důraz na výběr kvalitních surovin a dodržování přísných hygienických norem.

Food Extrusion není pouze o tvarování potravin do různých forem, ale také umožňuje kreativní experimentování s texturami a kombinacemi ingrediencí. V gastronomickém světě může tato technologie inspirovat kuchaře k vytváření jedinečných pokrmů a prezentaci jídel. Navíc může být využívána k personalizaci stravy pro jednotlivce s ohledem na jejich nutriční potřeby a preference. Food Extrusion představuje inovativní přístup k přípravě potravin, přinášející nové možnosti a zážitky do oblasti kulinářství.[13]

1.2.5 Spojování pomocí ultrazvuku

Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) představuje pokročilou technologii aditivní výroby, která využívá ultrazvukové energie k procesu spojování kovových vrstev. Princip

fungování UAM začíná s tenkými kovovými fóliemi, které jsou uloženy na sebe. Následně je aplikována ultrazvuková energie a tlak, což vede k lokálnímu zahřátí materiálu a vytvoření pevného spoje. Tento postup je opakován vrstva po vrstvě, čímž se vytváří třírozměrný kovový objekt.

Možnosti použití technologie Ultrasonic Additive Manufacturing jsou různorodé a nalézají uplatnění v širokém spektru odvětví. V oblasti leteckého průmyslu může být UAM využívána pro výrobu lehkých a pevných kovových dílů. V automobilovém průmyslu se tato metoda uplatňuje při výrobě složitých struktur a dílů s optimální pevností. Díky schopnosti spojovat různé kovy UAM nachází uplatnění také v oblasti výroby multifunkčních a kompozitních materiálů. V energetickém sektoru může být UAM využívána pro výrobu teple odolných a pevných komponent pro energetické generátory.

UAM se vyznačuje schopností pracovat s různými kovy a vytvářet objekty s vysokou pevností a dobrou tepelnou vodivostí. Tato technologie otevírá nové možnosti v oblasti aditivní výroby kovových komponentů s ohledem na efektivitu, pevnost a složitost designu.[13][14]

1.3 Aplikace v průmyslu

Aplikace 3D tisku v průmyslu se stala klíčovým prvkem pro dosažení efektivnější výroby, inovací a snížení nákladů. Jednou z hlavních oblastí využití je v oblasti prototypování a vývoje nových produktů. Díky 3D tisku mohou inženýři a designéři rychle vytvářet fyzické prototypy, což urychluje vývojový cyklus a umožňuje rychlé testování nápadů a konceptů.

Další klíčovou oblastí aplikace 3D tisku v průmyslu je výroba komplexních geometrických struktur a částí, které by bylo obtížné nebo nemožné vyrobit tradičními metodami. Technologie, jako je Selective Laser Sintering (SLS) nebo Fused Deposition Modeling (FDM), umožňují tisknout detailní a složité objekty s vysokou přesností. To se hodí zejména v leteckém průmyslu pro výrobu lehkých, ale odolných komponent nebo v automobilovém průmyslu pro vytváření specifických dílů s optimalizovanými vlastnostmi.

Navíc 3D tisk nachází uplatnění v oblasti personalizované výroby a servisních činností. Průmyslové odvětví může využít tuto technologii k vytváření náhradních dílů na zakázku, což snižuje skladovací náklady a umožňuje rychlé reakce na potřeby zákazníků. Celkově lze říci, že 3D tisk přináší průmyslu flexibilitu, rychlost a možnost inovací, což ho činí klíčovým hráčem v moderním průmyslu. [1; 2; 5]

1.4 Materiály pro FDM

PLA (Polyactic Acid)

PLA je biologicky odbouratelný materiál vyrobený z obnovitelných zdrojů, jako je kukuřičný škrob. Má nízkou toxicitu a je ideální pro tisky s nízkými teplotami. PLA se často používá pro prototypování a tvorbu dekorativních předmětů.



Obrázek 7 Materiál PLA [15]

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

ABS je tradiční termoplastický materiál známý pro svou pevnost a odolnost. Je vhodný pro inženýrské aplikace a tisk objektů, které vyžadují vyšší tepelnou odolnost. ABS vyžaduje vysoce vyhřívané tiskací lůžko a dobrou ventilaci během tisku.

PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol)

PETG kombinuje vlastnosti PLA a ABS, nabízí vysokou pevnost, pružnost a odolnost vůči UV záření. Tento materiál je transparentní a odolný vůči chemikáliím, což ho činí vhodným pro některé průmyslové aplikace.

TPU (Thermoplastic Polyurethane)

TPU je elastický a flexibilní materiál ideální pro tisk pružných objektů, jako jsou těsnění, podložky a modely potahované gumou. Je odolný vůči opotřebení a funguje dobře s pohybujícími se částmi.

Nylon

Nylon nabízí vysokou pevnost, odolnost a flexibilitu. Je vhodný pro tisk struktur vyžadujících odolnost proti opotřebení, jako jsou převody nebo součásti zátěže. Nylon také absorbuje vlhkost, což je třeba vzít v úvahu při skladování.

Polycarbonate (PC)

Polycarbonát je odolný materiál s vysokou tepelnou odolností. Používá se pro tisk odolných průhledných nebo odolných průmyslových součástí. Tento plast se vyznačuje vysokou odolností vůči nárazům.

ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate)

ASA je materiál s vlastnostmi podobnými ABS, ale s lepší odolností vůči UV záření, což ho činí vhodným pro venkovní aplikace. ASA kombinuje trvanlivost s odolností vůči povětrnostním podmínkám.

HIPS (High-Impact Polystyrene)

HIPS je lehký a odolný materiál vhodný pro tisk podpurných struktur, které lze následně snadno odstranit rozpouštědlem. Tento materiál se používá ve spojení s ABS při dvoumateriálovém tisku.

PVA (Polyvinyl Alcohol)

PVA je rozpustný materiál používaný pro tisk podpurných struktur při tisku s více materiály. Snadno se rozpouští ve vodě, což umožňuje odstranění podpory bez poškození hlavního materiálu.

PET (Polyethylene Terephthalate)

PET je odolný a transparentní materiál s vysokou odolností proti chemikáliím a teple. Je vhodný pro tisk průhledných objektů nebo modelů s vyšší odolností.

PEEK (Polyether Ether Ketone)

PEEK je vysokoteplotní materiál s vynikající mechanickou a chemickou odolností. Používá se v průmyslu, kde je vyžadována extrémní teplotní výdrž.

PEI (Polyetherimide)

PEI je odolný materiál s vysokou tepelnou odolností a odolností vůči chemikáliím. Je vhodný pro tisk součástí v extrémních podmínkách, například v leteckém nebo lékařském průmyslu.

PMMA (Polymethyl Methacrylate)

PMMA, známý též jako akrylát nebo plexisklo, je transparentní materiál často používaný pro tisk průhledných nebo dekorativních objektů. Je lehký a odolný.

Woodfill (Dřevěné plnivo)

Woodfill je kompozitní materiál, který kombinuje PLA s dřevěnými částicemi. Tento materiál poskytuje příjemnou dřevěnou texturu a vzhled, což je ideální pro tisk dekorativních a uměleckých předmětů.

Metal-filled Filaments (Naplněné kovem)

Filamenty s naplněním kovem jsou kompozitní materiály, které obsahují mikroskopické částice kovu, jako je mosaz, bronzu nebo nerezová ocel. Tento typ filamentu poskytuje tisknutelné objekty s metalickým vzhledem a vlastnostmi.

Flexible Filaments (Flexibilní filamenty)

Flexibilní filamenty, často založené na TPU, umožňují tisknout elastické a pružné objekty. Jsou vhodné pro vytváření těsnění, obalů nebo modelů, které vyžadují flexibilitu.

Carbon Fiber Filaments (Filamenty s uhlíkovými vlákny)

Filamenty s uhlíkovými vlákny kombinují plast s uhlíkovými vlákny, což vytváří materiál s vysokou pevností a odolností. Jsou ideální pro vytváření lehkých a odolných součástí.

Glass Fiber Filaments (Filamenty se skelnými vlákny)

Filamenty s obsahem skleněných vláken zvyšují pevnost a stabilitu materiálu. Tyto filamenty jsou často využívány v průmyslu pro tisk struktur vyžadujících vysokou odolnost.

Conductive Filaments (Vodivé filamenty)

Vodivé filamenty obsahují materiály, které umožňují průchod elektrického proudu. Jsou používány pro vytváření elektricky vodivých součástí, jako jsou vodiče nebo antény. [16; 1; 2; 5]

1.5 Konstrukce tiskáren FDM

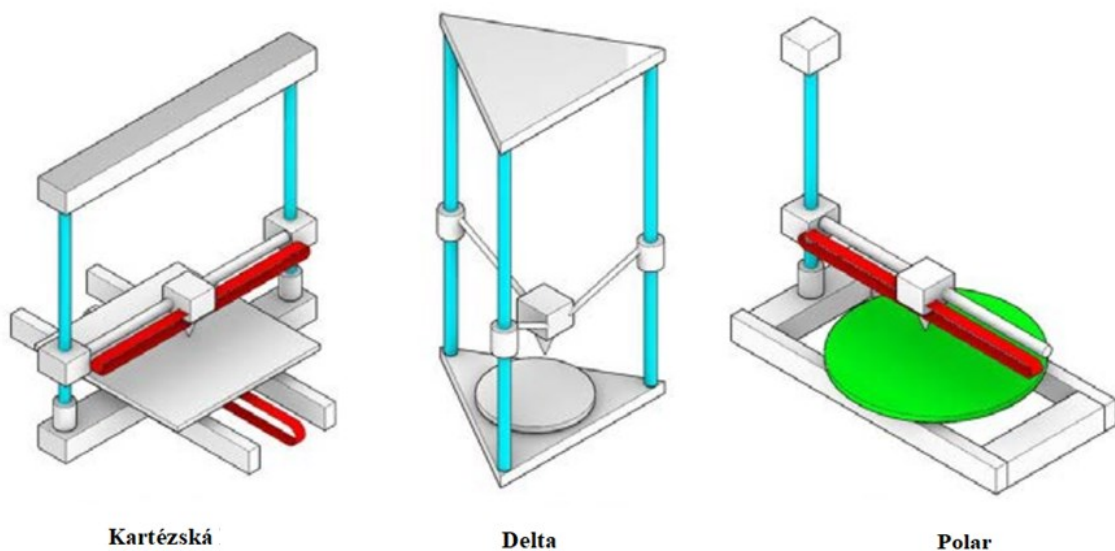
Existují různé druhy konstrukcí FDM (Fused Deposition Modeling) 3D tiskáren (Obr. 8, str. 28), které se liší uspořádáním pohyblivých částí a tím, jak dosahují pohybu tiskací hlavy.

Kartézská konstrukce je nejběžnějším typem konstrukce FDM 3D tiskáren. Tato konstrukce vychází z tradičního kartézského souřadnicového systému, kde se vytlačovací hlava pohybuje ve třech na sebe kolmých osách X, Y a Z.

Delta konstrukce je alternativním uspořádání, kde jsou tiskací hlavy umístěny na pohyblivých ramenech navzájem tvořících tvar trojúhelníku. Tři pohyblivé tyče nebo lineární pohony jsou umístěny na vrcholu tiskárny a spojují se na vytlačovací hlavě. Tyto tyče se pohybují nahoru a dolů, což umožňuje tiskací hlavě pohyb ve všech třech směrech. Delta tiskárny jsou známé pro svou rychlost a plynulý pohyb tiskací hlavy.

Polar konstrukce používá polární souřadnicový systém. Tiskací hlava se pohybuje po obloukové dráze a tiskárna může mít podobu rotačního stolu nebo rotačního ramene. Polar konstrukce jsou spíše experimentální, ale mohou nabízet zajímavé možnosti pro tisk netradičních tvarů.

Scara konstrukce užívá seriální čtyřúhelníkový robotický systém (SCARA) se využívá v průmyslových robotických aplikacích, ale byly vyvinuty i některé 3D tiskárny této konstrukce. Pohyblivá vytlačovací hlava se pohybuje podél dvou rotačních os, což umožňuje rychlé a přesné pohyby.[17]



Obrázek 8 Konstrukce tiskáren[17]

1.6 Nežádoucí jevy a chyby při tisku

Při 3D tisku technologií FDM mohou vznikat nežádoucí jevy, které negativně ovlivňují kvalitu výtisku. Tyto chyby lze eliminovat změnou technologických podmínek tisku nebo následnou úpravou výtisků.

Nežádoucí jevy a chyby FDM 3D tisku:

Warping je deformace výtisku, která se nejčastěji projevuje odlepováním rohů nebo okrajů modelu od tiskové podložky. Tento jev je způsoben nerovnoměrným chladnutím materiálu, který se při ochlazování smršťuje. Problém může být částečně řešen použitím vyhřívané tiskové podložky, lepší adhezí nebo změnou materiálu.

Layer Shifting nastává, když se vrstvy modelu neskládají přesně jedna na druhou, ale místo toho jsou posunuty. Může to být způsobeno volnými pohony, nadměrnou rychlostí tisku nebo vibracemi tiskárny. Správné nastavení a udržování tiskárny může pomoci tomuto jevu předcházet.

Under-Extrusion znamená, že tisková hlava vytlačuje méně materiálu, než je potřeba, což vede k nepřesnostem a slabším spojením vrstev. Tento problém může být způsoben ucpanou tryskou, nesprávným nastavením tiskárny nebo problémy s podáváním filamentu.

Over-Extrusion je opakem under-extrusion a znamená, že tisková hlava vytlačuje příliš mnoho materiálu. To vede k nevhledným přebytečným množstvím plastu na výtisku, ztrátě detailů a nepravidelným hranám. Řešením je správné kalibrování množství materiálu a tiskové rychlosti.

Oozing se projevuje vytékáním materiálu z tiskové hlavy i v době, kdy by měla být neaktivní. To může způsobit nepřesnosti a nechtěné spoje mezi částmi modelu. Efektivní nastavení retrakce a teploty tisku může pomoci tento problém minimalizovat.

Poor Adhesion znamená špatnou přilnavost k tiskové podložce, což může vést k odlepení modelu během tisku. Tento problém je možné částečně vyřešit použitím lepících sprejů, lepších tiskových podložek nebo optimalizací teplotních podmínek.

Nozzle Clogging je ucpaní trysky materiálem, které způsobuje přerušování nebo úplné zastavení tisku. Čištění trysky a použití kvalitního materiálu může pomoci předejít tomuto problému.

Elephant Foot je rozšíření spodních vrstev výtisku, které vzniká kvůli přílišnému tlaku na tyto vrstvy. Tento efekt může být minimalizován správným nastavením první vrstvy a pečlivou kalibrací tiskové podložky.

Print Delamination je oddělování vrstev od sebe, což znamená špatnou adhezi mezi vrstvami a vede ke křehkosti výtisku. Tento problém může být způsoben špatným nastavením tiskové teploty nebo použitím nevhodného materiálu.

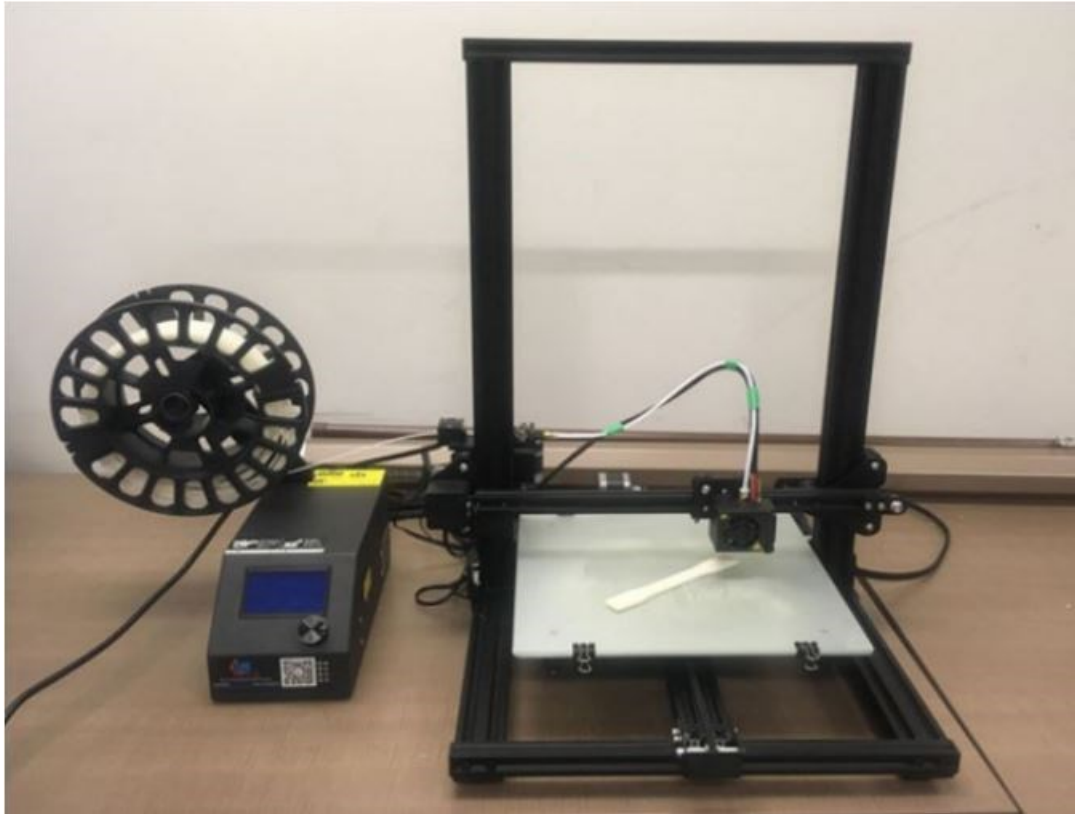
Stringing je tvorba vláken nebo jemných "pavučin" mezi oddělenými částmi modelu, které vznikají, když materiál nechtěně vytéká z trysky při pohybu tiskové hlavy nad tiskovou plochou. To může být způsobeno příliš vysokou teplotou tisku, nedostatečnou retrakcí nebo rychlými pohyby hlavy.[18]

1.7 Tiskárna Creality CR-10

Creality CR-10 (Obr. 9) je populární FDM (Fused Deposition Modeling) 3D tiskárna, která si získala širokou oblibu mezi uživateli, zejména mezi nadšenci 3D tisku. Tato tiskárna je známá pro svou robustní konstrukci, velký tiskový objem a relativně dostupnou cenu.

CR 10 nabízí velký tiskový objem, což umožňuje uživatelům vytvářet větší a komplexnější modely. Tiskárna je vybavena vyhřívaným tiskacím stolem, což napomáhá lepší adhezi materiálu k povrchu a minimalizuje riziko deformací během tisku. Tato tiskárna je kompatibilní s různými materiály, včetně PLA, ABS, PETG a dalšími, což poskytuje uživatelům širokou škálu možností.

Důležitým prvkem CR-10 je také jeho open-source povaha, což znamená, že uživatelé mají možnost upravit a vylepšovat tiskárnu podle svých potřeb. Tato flexibilita je atraktivní pro tvůrce a experimentátory, kteří si přejí přizpůsobit svou tiskárnu podle konkrétních požadavků a vytvářet vlastní inovace v oblasti 3D tisku.



Obrázek 9 Tiskárna Creality CR-10 [19]

1.7.1 Parametry tisku

Creality CR-10 nabízí velký tiskový objem, což je jedna z jeho výrazných vlastností. Typicky může vytisknout objekty s maximálními rozměry kolem 300 x 300 x 400 mm. Tento rozsáhlý tiskový objem umožňuje uživatelům vytvářet velké a rozmanité tiskové projekty.

Co se teplot týče, tiskárna je vybavena vyhřívaným tiskacím stolem, což usnadňuje tisk s různými materiály a minimalizuje riziko deformací během tisku. Teplotní rozmezí tisku se liší v závislosti na materiálu, který se používá. Obecně platí, že CR-10 může pracovat s teplotami tiskového stolu a trysky v rozmezí běžných teplot pro materiály, jako jsou PLA, ABS, PETG a další. Například tiskový stůl může dosahovat teplot od 60 do 100 °C a tryska od 200 do 250 °C.

Rychlosti tisku mohou být v rozmezí od 30 mm/s do 60 mm/s pro detailnější tisky a od 60 mm/s do 100 mm/s pro tisky s nižší kvalitou povrchu. Rychlosti mohou být nastaveny v tiskovém software.

1.7.2 Části tiskárny

Tiskárna Creality CR-10 se skládá z komplexní sestavy součástí, které lze sdružit do následujících celků (Obr. 10).

Rám tiskárny představuje základní kostru, která poskytuje strukturální stabilitu a podporu pro celý tiskový mechanismus. V případě Creality CR-10 je rám tvořen sešroubovaný mými hliníkovými profily. Některé z nich tvoří lineární vedení pro pohyb v jednotlivých osách. Což přispívá k minimalizaci vibrací a zajišťuje tak přesné a stabilní výtisky. Kvalitní konstrukce rámu je klíčovým faktorem pro zachování přesnosti při pohybu tiskárny.

Extruder je odpovědný za vytlačování housenky taveného plastu. Extruder tiskárny Creality CR-10 se skládá z následujících součástí

Motor extruderu: Tento motor zajišťuje přísun filamentu do trysky. Je zodpovědný za přesné podávání materiálu ve správné rychlosti.

Podavač filamentu: Tato část extruderu je převádí rotační energii motoru do posuvu filamentu. Podavač filamentu obsahuje ozubená kola, která se otáčejí díky motoru a tím tlačím filament směrem k hotendu.

Hotend je místo, kde dochází k roztavení filamentu. Skládá se z topného bloku, trysky a tepelného rozvodu. Tryska určuje tloušťku tiskového vlákna. Tloušťka trysky má výrazný vliv na kvalitu tisku.

Chladič, ve formě malého ventilátoru, pomáhá udržovat správnou teplotu v hotendu a zabraňuje přehřívání.

Mechanismus pro nastavení napětí: Tento mechanismus umožňuje nastavit sílu, s jakou je filament tlačěn do hotendu, což je důležité pro konzistentní a spolehlivý tisk.

Vedení filamentu: Jedná se teflonovou o trubku, která vede filament z podavače do hotendu.

Tiskové lože představuje podložku, na které se výtisk vytváří. U Creality CR-10 může tiskové lože být vyhříváné, což napomáhá lepší přilnavosti a minimalizaci deformací během tisku. Správná kalibrace a údržba tiskového lože jsou klíčové pro zajištění optimální kvality tisku. Důležité je zejména vyrovnaní v rovině z tak aby byla 1 vrstva tištěného objektu ve všech místech stejně tlustá.

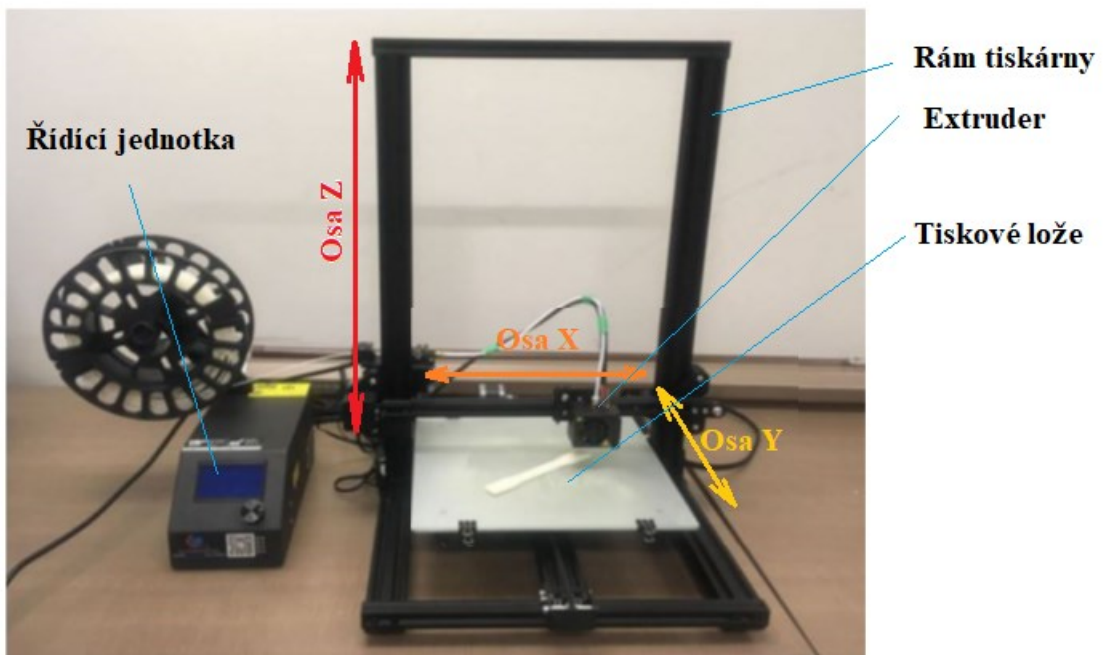
Osa x umožňuje pohyb vytlačovací hlavy ve vodorovném směru. Na ose x se pohybuje tisková hlava. U Creality CR-10 je tato osa tvořena hliníkovým profilem, po kterém se na

plastových kolečkách pohybuje jezdec vytlačovací hlavy. Kolečka jezdce jsou upevněna na excentrických šroubech, díky nimž lze vymezit vůli jezdce. Pohyb jezdce je zajištěn pomocí ozubeného řemene krokovým motorem.

Osa y je odpovědná za pohyb ve vodorovném směru kolmo na osu x. Na ose y se pohybuje tiskové lože. Tato osa je tvořena dvojitém hliníkovým profilem, na kterém se stejně jako u osy x pohybuje jezdec vyhřívaného tiskového lože. Pohyb jezdce je zajištěn pomocí ozubeného řemene krokovým motorem.

Osa z řídí vertikální pohyb tiskárny, což umožňuje postupné vrstvení taveného plastu a vytváření třírozměrných modelů. Celá osa x se pohybuje oproti ose y nahoru a dolů, což vytváří pohyb v ose z. Osu z tvoří samotný rám tiskárny, na němž se ve vertikálním směru pohybuje osa x. Pohyb osy je zajišťován krokovým motorem, jenž svou rotační energii převádí na pohybovou pomocí dvouchodého trapézového šroubu.

Řídicí jednotka je nervovým centrem 3D tiskárny Creality CR-10, koordinujícím pohyby tiskové hlavy a lože. Tato elektronická jednotka s mikroprocesorem interpretuje příkazy z uživatelského rozhraní, řídí krokové motory na osách x, y a z a udržuje optimální teplotu tiskového lože a hlavy. Její přesné řízení a optimalizační algoritmy přispívají k vytváření kvalitních tisků s minimálními chybami. [15]



Obrázek 10 Části tiskárny [19]

1.8 Software CAD

Computer-Aided Design (CAD) software hraje důležitou roli v procesu 3D tisku tím, že umožňuje uživatelům vytvářet a upravovat digitální modely, které jsou následně tisknuty v trojrozměrné podobě. Tato softwarová technologie je nezbytným prvkem v celém životním cyklu 3D tisku od návrhu až po vytváření finálního tištěného objektu.

Software umožňuje uživatelům vytvářet podrobné 3D modely, které přesně definují každý aspekt tištěného objektu. Tato digitální reprezentace je poté připravena pro přenos do sliceru, kde jsou definovány vrstvy a parametry pro fyzický tisk. CAD nástroje umožňují designérům a inženýrům vytvářet složité geometrie, optimalizovat struktury a experimentovat s různými tvary.

Populární CAD programy jako AutoCAD, Solid Edge, SolidWorks nebo Fusion 360 poskytují nástroje speciálně navržené pro podporu 3D tisku. Tyto programy často integrují funkce pro analýzy a simulace, což umožňuje uživatelům před tiskem zkoumat chování materiálu a struktury v digitálním prostoru. Díky CAD software mohou tvůrci snadno přizpůsobovat a optimalizovat své návrhy pro optimální výsledky při 3D tisku.[20; 21; 22]

1.9 Slicer

Slicer představuje klíčový software v oblasti 3D tisku, který má zásadní vliv na kvalitu a úspěch tisku. Jeho hlavním účelem je transformovat digitální 3D model do formy, kterou může 3D tiskárna interpretovat a postupně vytvářet. Tento proces zahrnuje rozdělení modelu do vrstev, které jsou následně převedeny do souboru, jemuž rozumí tiskárna.

Slicer poskytuje uživatelům možnost konfigurace různých parametrů, jako je tloušťka vrstvy, podpora pro výčnělky, výplň a další. Tím umožňuje uživatelům přizpůsobit nastavení tisku podle konkrétních požadavků, od rychlých prototypů až po detailní modely. V současné době existuje široká škála slicerů od různých výrobců, každý s vlastními funkcemi a možnostmi.

PrusaSlicer je vytvořen českou firmou Prusa Research a vyniká předpřipravenými tiskovými profily pro tiskárny Průša a materiály od této společnosti. Tato užitečná funkce usnadňuje začátečnickům proces nastavení, zatímco pokročilí uživatelé mohou stále upravovat všechny parametry pro vlastní potřeby.[23]

Cura, patřící k firmě Ultimaker, je jedním z nejpoužívanějších slicerů. Obsahuje profily pro většinu 3D tiskáren, je k dispozici v češtině a nabízí jednoduché nastavení parametrů. Díky vysoké míře rozšíření tohoto sliceru bylo vytvořeno mnoho rozsáhlých návodů na internetu.

Simplify3D je profesionální slicer, který umožňuje detailní nastavení každého parametru tisku. I přesto, že poskytuje efektivní výstupy souborů pro 3D tisk, je placený, což může odradit některé uživatele.

KISSlicer, což je zkratka pro "Keep It Simple Slicer," je jednoduchý slicer vhodný pro začátečníky. I když podporuje mnoho tiskáren, někteří uživatelé mohou preferovat jiné slicery.

IceSL není pouze slicer, ale také umožňuje modelování a přímou úpravu meshe v Lua kódu, což je atraktivní pro zkušenější uživatele.

Netfabb od AUTODESK je specializovaný software pro opravu a optimalizaci MESH souborů. Kromě toho obsahuje propracovaný slicer se simulací pro různé technologie tisku.

ChiTuBox je ideální pro uživatele SLA nebo DLP tiskáren s intuitivním prostředím pro snadné používání.[24]

2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU

2.1 Historie

Historie mechanických zkoušek materiálů sahá do starověku, kdy civilizace jako Římané a Egypťané využívaly empirické metody pro výběr materiálů na základě jejich pozorovatelných vlastností, jako je tvrdost a mechanická odolnost. V období renesance začaly první vědecké instituce systematicky zkoumat materiály, což položilo základy pro moderní testovací metody.

Rozvoj průmyslu v 18. a 19. století vyžadoval standardizované mechanické zkoušky pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti produktů, vedoucí k vývoji tahových zkoušek, zkoušek tvrdosti a zkoušek únavy materiálu. Ve 20. století technologický pokrok umožnil zlepšení a rozšíření zkoušek, včetně využití difrakce rentgenových paprsků a dynamické mechanické analýzy. Vznik mezinárodních standardů, jako jsou normy ISO a ASTM, zjednodušil procedury a zlepšil porovnatelnost výsledků.

Dnešní mechanické zkoušky využívají pokročilé technologie, jako jsou počítačové simulace a mikroskopie atomárních sil, pro přesné předpovědi chování materiálů a design materiálů s cílenými vlastnostmi. Tento vývoj od jednoduchých empirických metod po sofistikované techniky je klíčový pro inovace a bezpečnost v mnoha odvětvích.[25; 26]

2.2 Rozdělení technologií

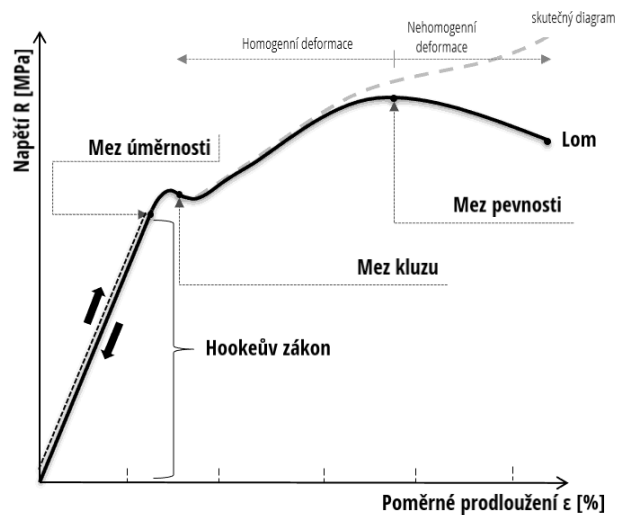
Mechanické zkoušky materiálů lze rozdělit do několika základních kategorií na základě typu aplikovaného zatížení a zkoumaných vlastností materiálu. Statické zkoušky hodnotí chování materiálů pod konstantním nebo pomalu rostoucím zatížením. Dynamické zkoušky zkoumají odpověď materiálů na rychle se měnící nebo cyklická zatížení. Tyto testy společně poskytují komplexní přehled o mechanických vlastnostech materiálů, což je klíčové pro jejich výběr a použití ve specifických aplikacích.

2.2.1 Statické zkoušky

Statické zkoušky materiálů jsou základním typem mechanických zkoušek, které se zaměřují na zjištění vlastností materiálu při pomalém nebo žádném dynamickém zatížení. Tyto zkoušky poskytují důležité informace o chování materiálu pod různými druhy zatížení, včetně jeho pevnosti, pružnosti a plastických vlastností. Mezi nejběžnější statické zkoušky patří:

Tahová zkouška určuje tahovou pevnost, mez kluzu, prodloužení a úžlabí materiálu tím, že materiál je pomalu roztahován až do jeho lomu.

Tlaková zkouška měří chování materiálu při stlačování, podobně jako tahová zkouška, ale zatížení je aplikováno opačným směrem.



Obrázek 11 Diagram zkoušky tahem [27]

Ohybová zkouška testuje odolnost materiálu proti ohybu, čímž se zjišťují jeho ohybová pevnost a pružnost.

Smyková zkouška zkoumá pevnost materiálu proti smykovému napětí, které působí rovnoběžně s plochou materiálu.

Kroucení (torzní) zkouška určuje torzní pevnost, pružnost a tuhost materiálu tím, že se materiál zkouší kroutit do jeho lomu.

Zkouška tvrdosti měří odpor materiálu proti trvalému vniknutí jiného tělesa. Běžné metody zahrnují Brinellovu, Rockwellovu, Vickersovu a Mohsovu zkoušku tvrdosti.

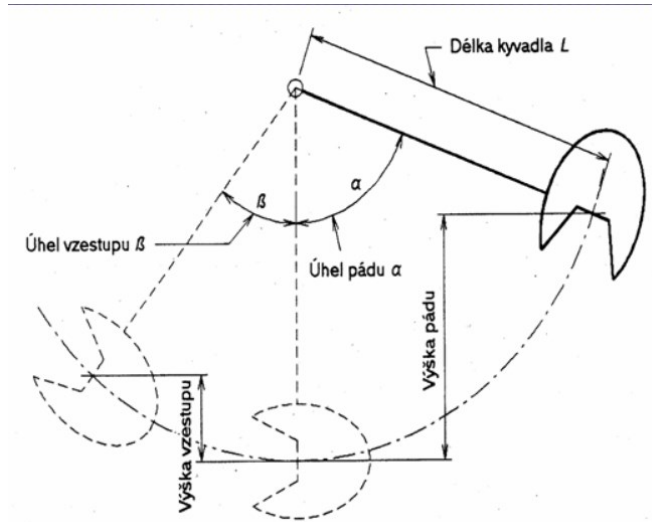
Modul pružnosti často určovaný běžnými tahovými, tlakovými nebo ohybovými zkouškami, udává míru pružnosti materiálu pod zatížením.

2.2.2 Dynamické zkoušky

Dynamické zkoušky materiálů se zaměřují na chování materiálů pod vlivem rychle se měnících nebo cyklicky opakujících se zatížení. Tyto zkoušky jsou klíčové pro pochopení

vlastností materiálů, jako je odolnost proti únavě, houževnatost při nárazu a dynamická pevnost. Dynamické zkoušky zahrnují:

Nárazové zkoušky určují schopnost materiálu absorbovat energii při nárazu. Příklady zahrnují Charpyho a Izodovu nárazovou zkoušku.



Obrázek 12 Charpyho zkouška [28]

Únavové zkoušky sledují chování materiálu při dlouhodobém opakovaném zatěžování, což pomáhá určit jeho únavovou pevnost a životnost při cyklickém zatížení.

Zkoušky cyklického zatěžování podobné únavovým zkouškám, ale mohou být provedeny s různými amplitudami a frekvencemi pro simulaci různých provozních podmínek.

Vysokorychlostní tahové zkoušky provádějí se při vysokých rychlostech deformace a jsou důležité pro hodnocení chování materiálů při dynamických událostech.

Kreepové zkoušky i když jsou často považovány za zkoušky statické, mohou být zahrnuty do dynamických testů v případě, že se zkoumá chování materiálu pod dlouhodobým zatížením při vysokých teplotách, což je relevantní pro aplikace v energetice nebo leteckém průmyslu.

Zkoušky viskoelasticity hodnotí časově závislé deformace materiálů, jako jsou polymery, při dynamickém zatížení. Dynamická mechanická analýza (DMA) je příkladem techniky používané k těmto účelům.[26]

3 MĚŘENÍ 3D

3.1 Historie

Historie 3D měření se vyvíjela paralelně s pokrokem v technologii. V raných fázích, před digitální érou, spočívalo 3D měření ve fyzických modelech a matematických výpočtech, což bylo časově náročné a vyžadovalo specializované znalosti. Digitalizace v 60. a 70. letech 20. století, zvláště s rozvojem počítačově podporovaného designu (CAD), revolucionizovala 3D měření tím, že umožnila rychlejší a přesnější práci s digitálními modely.

Ve 80. a 90. letech přinesly technologie 3D skenování a fotogrammetrie schopnost efektivně převádět fyzické objekty do digitálních modelů, což rozšířilo možnosti využití 3D měření. Po roce 2000 laserové skenování a 3D tisk zvýšily přesnost a efektivitu vytváření prototypů a finálních produktů z 3D modelů.

Dnes 3D měřicí technologie pokračují ve vývoji díky aplikacím umělé inteligence a strojového učení, virtuální a rozšířené reality, což zlepšuje jejich přesnost a otevírá nové možnosti využití. 3D měření je klíčové v mnoha oblastech, včetně výroby, stavebnictví, zdravotnictví a zábavy, a jeho význam bude i nadále růst s dalším technologickým vývojem.[29]

3.2 Dělení technologií

Laserové skenování je jednou z nejpresnějších technologií v 3D měření, která používá laserové paprsky pro zaznamenání vzdálenosti mezi skenerem a objektem. Tato metoda je schopná zachytit velmi detailní geometrii objektů a je ideální pro aplikace vyžadující vysokou míru přesnosti, jako je průmyslové měření, dokumentace kulturních památek, nebo vytváření digitálních dvojčat staveb.

Fotogrammetrie vytváří 3D modely z fotografických snímků pořízených z různých úhlů. Tato technika je vhodná pro měření velkých objektů a terénů, umožňující efektivní dokumentaci a analýzu archeologických nalezišť, krajinných útvarů, nebo i celých městských částí.

Structured-light skenování využívá projekci známých vzorů světla na objekt a následně analyzuje, jak se tyto vzory deformují po dopadu na objekt. Tato metoda umožňuje rychlé a přesné získávání informací o tvaru a rozměrech objektů a je často využívána v průmyslovém designu a kvalitní kontrole.

CT skenování neboli počítačová tomografie, známé především ze zdravotnictví, nachází uplatnění i v průmyslu díky své schopnosti poskytovat detailní průřezové obrazy vnitřní struktury objektu. Tato technologie je cenná pro analýzu materiálů, detekci vad uvnitř komplexních komponent, nebo pro výzkum v oblasti biologie a materiálového inženýrství.

Technologie time-of-flight (ToF) měří dobu, za kterou světlo vystřelené z emitoru dorazí zpět k senzoru po odrazu od objektu. (ToF) je užitečná pro rychlé získávání 3D dat o velkých prostorech, jako jsou interiéry budov nebo urbanistické scény, a nachází využití v oblastech jako jsou robotika, bezpečnost a plánování měst.[29]

V praktické části práce je popsán provedený experiment měření mechanických vlastností vytištěných vzorků. K experimentu byly použity znalosti popsané v teoretické části.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRÁCE

Cílem práce bylo realizovat sérii experimentálních tisků testovacích těles na 3D tiskárně Creality CR-10 za proměnlivých technologických podmínek, specificky se zaměřením na modifikaci rychlosti a teploty tisku. Cílem je nejen identifikovat, jakou maximální rychlost tisku je daná tiskárna schopna efektivně dosáhnout, ale také analyzovat, jak tyto změny ovlivňují mechanické vlastnosti finálních výtisků. Jedná se o kritickou analýzu, která umožní pochopit korelace mezi rychlostí tisku, teplotními nastaveními a kvalitou tisku v kontextu mechanické odolnosti, tuhosti a dalších relevantních parametrů materiálu.

Cíle práce:

- Výroba vzorků
- Měření 3D
- Měření posuvným měřítkem
- Zkouška tahem
- Zkouška vrubové houževnatosti
- Vyhodnocení naměřených dat

5 TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY

Přesné určení technologických podmínek pro testování na 3D tiskárně Creality CR-10 je zásadním krokem k dosažení objektivního hodnocení vlivu těchto podmínek na kvalitu a mechanické vlastnosti tisknutých objektů. Při výběru technologických podmínek je třeba zvážit širokou škálu faktorů, které ovlivňují tisk, včetně teploty tiskové hlavy a podložky, rychlosti tisku, typu a průměru tiskové struny (filamentu), výplně, tloušťky stěn, výšky vrstvy a strategií podpory.

Pro účely této studie byly jako klíčové parametry vybrány teplota a rychlost tisku. Důvodem výběru těchto dvou podmínek je jejich výrazný dopad na finální vlastnosti tisknutých objektů, jako je pevnost, přesnost a celková kvalita povrchu. Teplota tiskové hlavy a podložky přímo ovlivňuje fluiditu tiskového materiálu, což má za následek lepší adhezi mezi vrstvami a ovlivňuje tak pevnost a strukturální integritu výtisku. Optimální nastavení teploty také minimalizuje problémy, jako jsou deformace nebo vrstvení materiálu.

Rychlost tisku je rovněž kritickým faktorem, protože ovlivňuje čas tisku a může mít významný dopad na přesnost tisknutých objektů. Vyšší rychlosti tisku mohou vést k nižší kvalitě detailů a většímu riziku chyb v tisku z důvodu nedostatečné adheze mezi vrstvami. Na druhou stranu, optimalizace rychlosti tisku pro konkrétní materiál a objekt může výrazně zlepšit efektivitu tisku bez kompromisu v kvalitě.

Tyto faktory byly vybrány pro testování na základě jejich značného vlivu na kvalitu a vlastnosti výtisků, což umožní analýzu možností tiskárny a identifikaci optimálních podmínek pro různé typy tiskových úloh.

6 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Pro zkoumání vlivu tiskové teploty a rychlosti na vlastnosti tištěných objektů z 3D tiskárny byly provedeny mechanické zkoušky, aby bylo možné zhodnotit materiálové charakteristiky a vlastnosti výtisku. K dispozici jsou různé typy testů, včetně zkoušky tahem, zkoušky ohybem, zkoušky tvrdosti, zkoušky odolnosti proti nárazu a zkoušky vrubové houževnatosti.

Pro tento experiment byla zvolena zkouška tahem v ose z. Tento test je zásadní pro posouzení přilnavosti vrstev, která je klíčovým faktorem pro strukturální integritu tištěných objektů. Přilnavost vrstev je obzvláště citlivá na změny tiskové teploty a rychlosti; vyšší teploty mohou zlepšit přilnavost vrstev díky lepšímu tavení materiálu, zatímco vyšší rychlosti tisku mohou tento efekt snižovat kvůli zkrácenému času pro adekvátní tavení. Výsledky této zkoušky poskytnou cenné informace o tom, jak se mění mechanické vlastnosti v závislosti na změnách tiskových parametrů.

Druhým vybraným testem je zkouška vrubové houževnatosti. Tento test je zaměřen na posouzení, jak materiál reaguje na zatížení při přítomnosti vrubu nebo výřezu, což je důležité pro hodnocení materiálové odolnosti proti lomu. V kontextu 3D tisku tento test slouží pro zjištění, zda delší pobyt materiálu v trysce při vyšší teplotě nevede k degradaci materiálu.

Kromě těchto mechanických testů budou u všech testovacích těles změřeny rozměry, aby se posoudil vliv změn tiskových podmínek na geometrickou přesnost a rozměrovou stabilitu. Jeden z testovacích vzorků bude také zkoumán pomocí 3D měřicího zařízení, což umožní detailněji analyzovat, jak přesně je tiskárna schopna reprodukovat složité geometrické tvary. Tato komplexní sada testů a měření poskytne ucelený pohled na to, jak parametry tisku ovlivňují jak materiálové vlastnosti, tak přesnost tisku.

7 NÁVRH PRACOVNÍCH PODMÍNEK

Pro studium vlivu teploty a rychlosti tisku na vlastnosti 3D tištěných objektů byla navržena experimentální metodika, která systematicky zkoumá tyto parametry. Experiment byl započat tiskem při doporučené teplotě, přičemž se postupně testují čtyři různé rychlosti tisku, tento krok umožňuje posoudit, jak rychlost tisku ovlivňuje kvalitu a integritu vrstev.

Následně se teplota zvýší o 20 °C a tisk se opakuje při stejných rychlostech jako v první fázi. Tento druhý krok poskytuje možnost porovnat, jak vyšší teplota ovlivňuje materiál při stejných rychlostech.

V rámci studie vlivu teploty a rychlosti tisku na vlastnosti 3D tisku byla nastavena experimentální metodika, v níž pro každou teplotní a rychlostní kombinaci bylo vytištěno pět tahových a deset vrubových testovacích vzorků. Po každém tiskovém cyklu se mění teplota nebo rychlost, což umožňuje detailní analýzu vlivu těchto faktorů na kvalitu a mechanické vlastnosti materiálů, a také přináší cenné údaje pro optimalizaci 3D tiskových procesů. Kombinace rychlostí a teplot jsou zobrazeny v tabulce (Tab. 1). Rychlost tisku je udávána v procentech, protože se v rámci jedné vrstvy tiskárna může pohybovat více rychlostmi (Tab. 2, str. 51). Například pro nastavení rychlosti na 100 % je rychlost tisku vnějších zdí 25 mm·s⁻¹.

Tabulka 1 Kombinace rychlostí a teplot

Teplota (°C)	Rychlost (%)
200 °C	100 %
	200 %
	300 %
	400 %
220 °C	100 %
	200 %
	300 %
	400 %

Výběr této metodiky umožňuje jasně oddělit vliv jednotlivých proměnných a zároveň poskytuje komplexní data pro analýzu. Tímto postupem se zvyšuje přesnost a spolehlivost zjištění o tom, jak teplota a rychlost tisku společně ovlivňují vlastnosti 3D tištěných objektů.

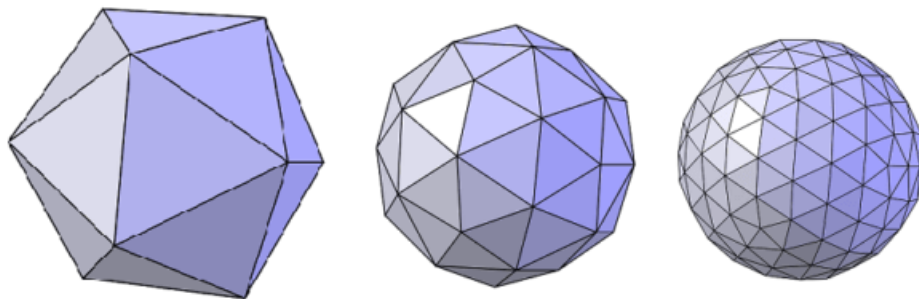
8 VÝROBA VZORKŮ

Proces vytisknutí testovacích těles zahrnuje čtyři základní kroky: modelování, slicování, tisk a čištění. Nejprve se pomocí CAD softwaru vytvoří digitální model tělesa, následně slicovací software převede model na instrukce pro tiskárnu, rozdělí ho na vrstvy a nastaví parametry tisku. Poté se postupně vytváří těleso vrstvu po vrstvě za pomoci tiskárny Creality CR-10. Po dokončení tisku se z výrobku odstraní veškeré podpurné materiály a těleso se dočistí.

8.1 Tvorba modelů

Začíná se výběrem odpovídajícího CAD softwaru, následuje modelování testovacích těles a vytváření technických výkresů. Poté se modely konvertují do STL formátu.

Geometrie modelovaných těles je popsána v další části práce viz (11 Zkouška tahem). Tato tělesa byla vytvořena pomocí softwaru Solid Edge, kde bylo použito sekvenčního modelování pro jejich návrh. Během tohoto procesu byl také vytvořen výrobní výkres, který slouží jako podklad pro další zpracování. Nakonec byly modely převedeny do formátu STL (Obr. 13), což je standardní formát pro 3D tisk, umožňující jejich snadné použití. [22]



Obrázek 13 Zobrazení koule ve formátu STL s různou hustotou sítě

8.2 Rozvrstvení

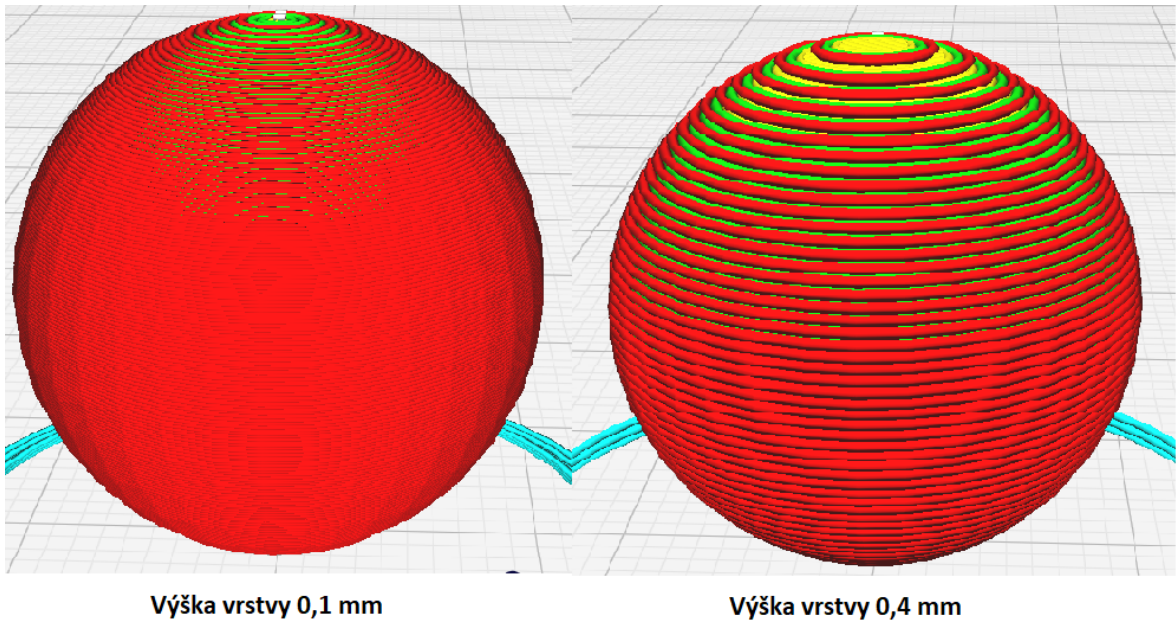
Pojem rozvrstvení se vztahuje k způsobu, jakým 3D tiskárna vytváří objekty. Během tiskového procesu tiskárna postupně ukládá materiál ve vrstvách, které se skládají na sebe od základny směrem nahoru. Každá vrstva odpovídá přesnému průřezu konečného objektu podle digitálního modelu. Rozvrstvení probíhá ve sliceru. Jeho výstupem je G-kód, podle kterého tiskárna vykonává jednotlivé pohyby.

Po pečlivém zvážení byl pro účely této práce vybrán slicer Cura. Důvodem výběru byla jeho široká podpora tiskáren, bohatá online podpora a komunita, bezplatná dostupnost a multijazyčné rozhraní včetně češtiny.

Nastavení ve sliceru

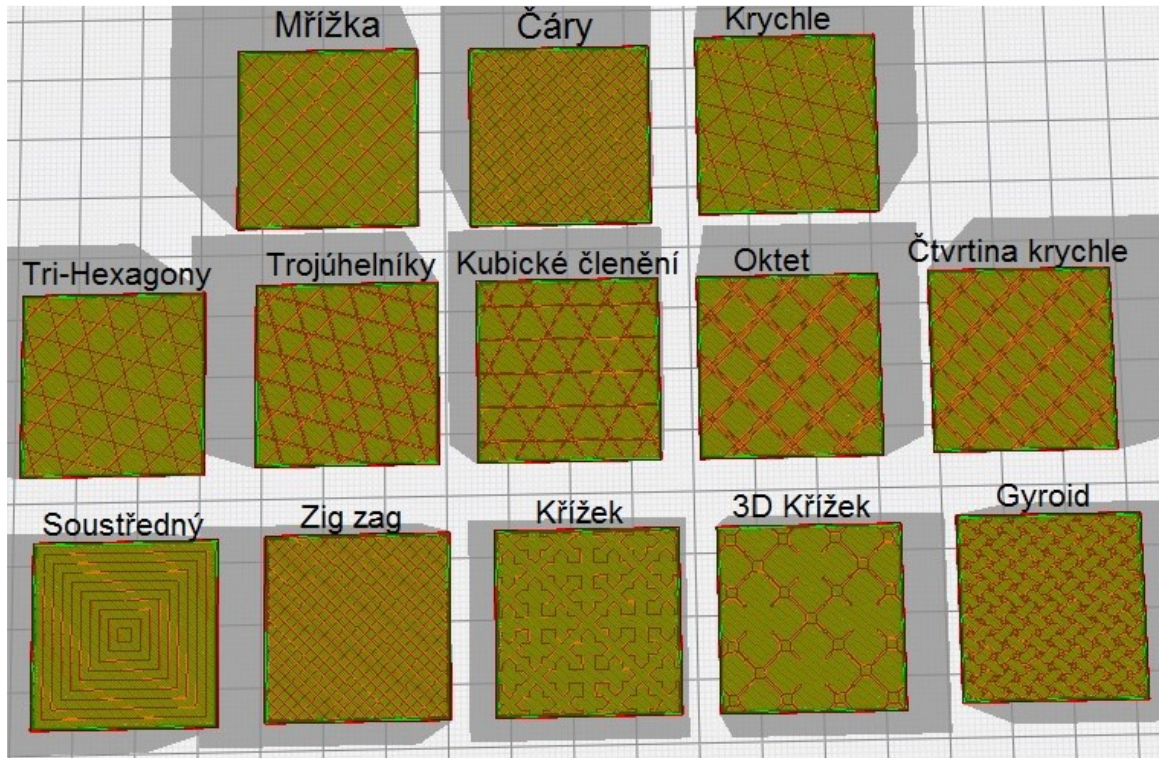
Slicer Cura nabízí tyto hlavní skupiny nastavení:

- „**Kvalita**“ řeší rozlišení vrstev (Obr. 14), uživatelé mohou volit mezi vyšší kvalitou s tenčími vrstvami pro jemnější detaily a nižší kvalitou s tlustšími vrstvami pro rychlejší tisk



Obrázek 14 Nastavení vrstev pro kouli o průměru 20 mm

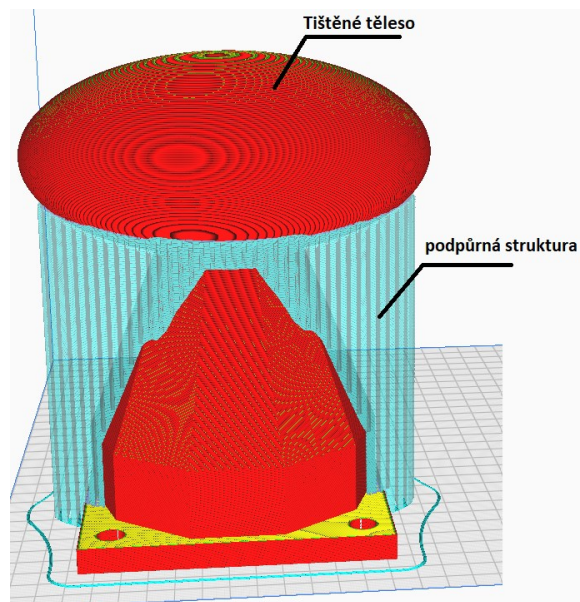
- „**stěny**“ určuje nastavení tloušťky stěn, to znamená, jak robustní budou vnější stěny objektu, tlustší stěny znamenají vyšší pevnost, ale i vyšší spotřebu materiálu a delší tiskový čas
- „**vrch a spodek**“ určuje tloušťku vrchních a spodních vrstev tisknutého objektu, což může ovlivnit jeho pevnost a vzhled povrchu, více vrstev zlepšuje vzhled a minimální počet vrstev zvyšuje riziko průhlednosti u tenkých objektů
- „**výplň**“ umožňuje volit hustotu a vzor výplně (Obr. 15, str. 48), což ovlivňuje pevnost a hmotnost objektu, nižší hustota snižuje materiál a čas tisku, zatímco vyšší hustota zvyšuje pevnost, vzory jako mřížka nebo gyroid nabízejí rozdílné mechanické vlastnosti



Obrázek 15 Vzory výplní s hustotou 30 %

- „**materiál**“ určuje nastavení teploty trysky a podložky, rychlost tisku a retrakci specifické pro každý typ materiálu, jako je PLA, ABS, PETG
- „**rychlost**“ toto nastavení ovládá rychlost, s jakou tisková hlava pohybuje, vyšší rychlost může snížit čas tisku, ale může také negativně ovlivnit kvalitu a přesnost tisku
- „**pohyb**“ nastavení související s rychlostí pohybu tiskové hlavy mezi tiskovými operacemi, což může mít vliv na celkovou efektivitu a kvalitu tisku
- „**chlazení**“ spravuje rychlost a intenzitu chlazení během tisku, efektivní chlazení je klíčové pro dosažení ostřejších detailů a prevenci deformací, zvláště u převisů a jemných struktur

- „**podpora**“ umožňuje generování podpůrných struktur (Obr. 16) pro tisk složitějších geometrií, nastavení zahrnuje typ, hustotu a snadnost odstranění podpory



Obrázek 16 Podpůrná struktura

- „**adheze topné podložky**“ toto nastavení zlepšuje přilnavost první vrstvy k podložce, vytváří přídatnou strukturu kolem, nebo pod tištěným objektem
- „**dvojitá extruze**“ nastavení, které upravuje množství materiálu extrudovaného během tisku, což ovlivňuje kvalitu vyplnění a pevnost objektu
- „**opraví síti**“ funkce, která automaticky detekuje a opravuje problémy s 3d modely, jako jsou díry ve strukturách nebo nekonzistence ve vrstvách
- „**speciální módy**“ umožňuje uživatelům přizpůsobit tisk pro speciální aplikace, jako je tisk více materiály, tisk s gradienty barev nebo pokročilé infill vzory
- „**experimentální**“ sekce v Cura, kde jsou dostupné nejnovější a často neotestované funkce, které mohou uživatelům poskytnout nové možnosti, ale mohou být méně stabilní nebo vyžadovat dodatečné ladění

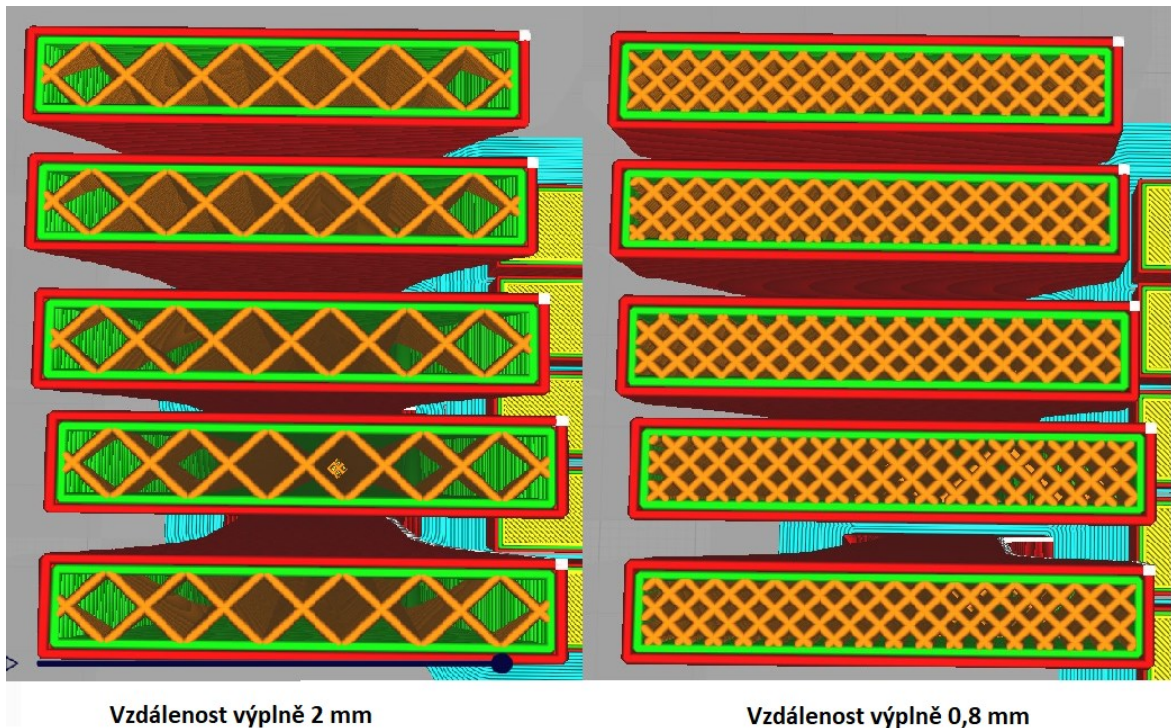
Ve sliceru byla pro všechna zkušební tělesa a vzorky nastaveny stejné technologické podmínky, což zrychlilo přípravu tisku, protože nebylo potřeba vytvářet samostatný G-kód pro každé z nastavení. U specifických vzorků pak byla teplota trysky a rychlost tisku upravena před tiskem přímo na tiskárně, což umožnilo efektivní přizpůsobení specifickým požadavkům těchto vzorků.

Nastavení ve sliceru pro zkušební tělesa a vzorky je uvedeno v tabulce (Tab. 2, str. 50).

Tabulka 2 Nastavení pro zkušební tělesa a vzorky

Kvalita	
výška vrstvy	0,2 mm
šířka čáry	0,4 mm
Stěny	
tloušťka stěny	0,8 mm
počet z čar zdí	2
Vrch a spodek	
vrchní/spodní tloušťka	0,8 mm
vrchní vrstvy	4
spodní vrstvy	4
Výplň	
výplňový vzor	Mřížka
vzdálenost výplně	2 mm
hustota výplně	20 %
vzdálenost výplně (uchycení)	0,8 mm
hustota výplně (uchycení)	50 %
Materiál	
teplota při tisku	200 °C
teplota podložky	50 °C
Rychlost	
rychlost tisku výplně	50 mm·s ⁻¹
rychlost tisku zdí	25 mm·s ⁻¹
Rychlost tisku prvotní vrstvy	20 mm·s ⁻¹
Pohyb	
povolit retrakci	Ano
délka zatažení	5 mm
Chlazení	
rychlost ventilátoru	100 %,
počáteční rychlost ventilátoru	0 %
Podpora	
generovat podpory	Ne
Adheze topné podložky	
typ přilnavosti podložky	Límec
šířka límce	8 mm
počet linek pro límec	20
Opravit síti	
nepoužito	
Speciální módy	
nepoužito	
Experimentální	
nepoužito	

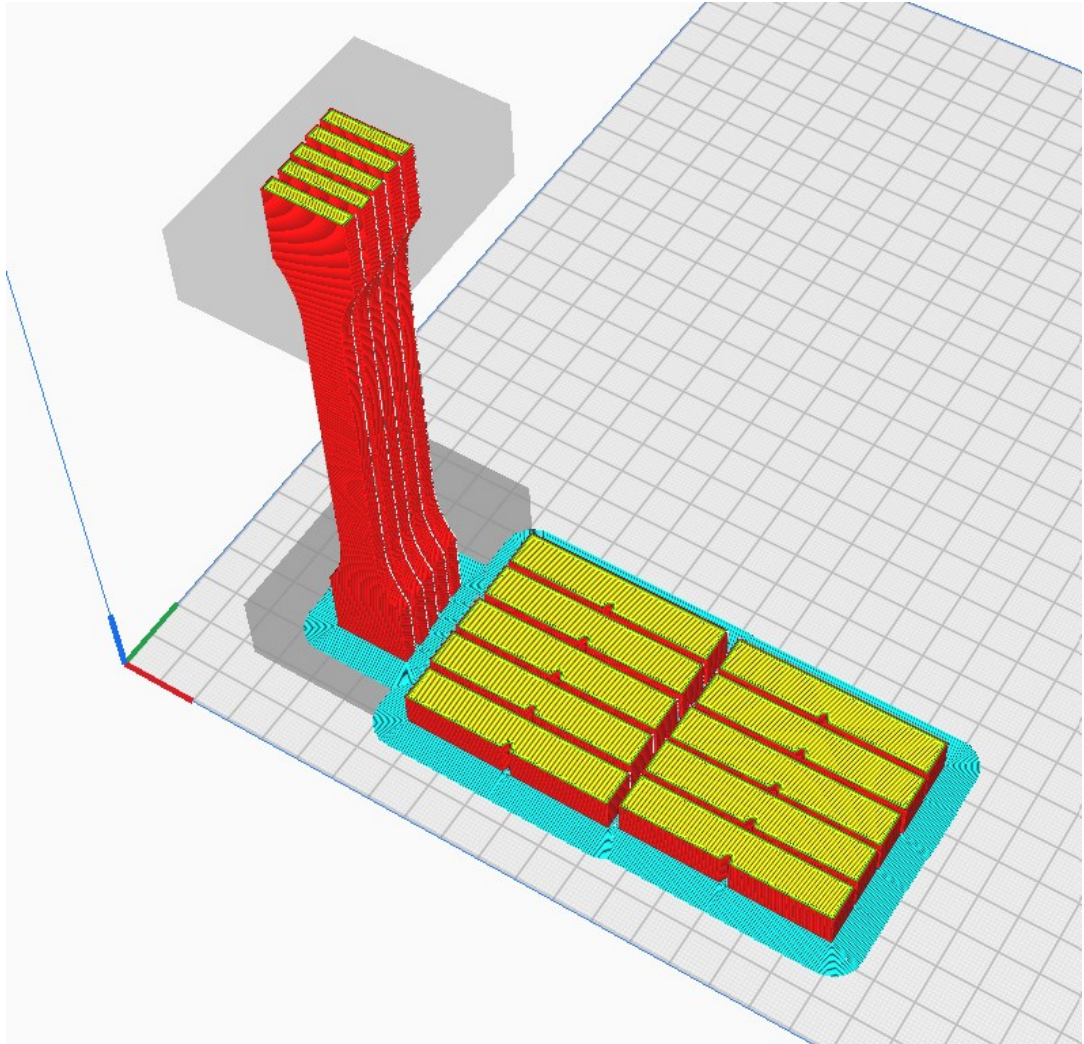
Nastavení výplně bylo lokálně změněno v uchycovacích bodech zkušebních tělísek pro tah, viz Obr. 17.



Obrázek 17 Nastavení výplně

Celá sada testovacích těles a vzorků s jednotným nastavením byla tisknuta najednou (Obr. 18, str. 52), což výrazně zefektivnilo celý tiskový proces. Tento přístup umožnil nejen výraznou úsporu času, ale i energie, protože se minimalizovalo množství zahřívacích cyklů a přestávek mezi jednotlivými tisky. Nevýhodou tisku více těles najednou je jev zvaný stringing, kdy dochází k tvorbě nežádoucích vláken mezi objekty v důsledku přesunů tiskové hlavy. Při tisku jednoho tělesa, kde ve vrstvě nejsou volné přejezdy, tento problém obvykle nenastává, protože nedochází k pohybům hlavy mimo objekt, které by mohly vést k vytékání materiálu.

Změna teploty a rychlosti byla u jednotlivých těles zadána přímo do řídicí jednotky tiskárny. Zvýšení rychlosti bylo do tiskárny zadáváno v procentech například nastavení rychlosti na 200 % znamená že všechny nastavené rychlosti zadané ve sliceru se zdvojnásobí.



Obrázek 18 Rozložení součástí

Nastavení parametrů pro objekt určený k 3D měření je zobrazeno v tabulce (Tab. 3, str. 53).

Tabulka 3 Nastavení pro objekt k 3D měření

Kvalita	
výška vrstvy	0,2 mm
šířka čáry	0,4 mm
Stěny	
tloušťka stěny	0,8 mm
počet z čar zdi	2
Vrch a spodek	
vrchní/spodní tloušťka	0,6 mm
vrchní vrstvy	3
spodní vrstvy	3
Výplň	
výplňový vzor	Mřížka
vzdálenost výplně	3 mm
hustota výplně	13 %
Materiál	
teplota při tisku	200 °C
teplota podložky	50 °C
Rychlost	
rychlost tisku výplně	50 mm·s ⁻¹
rychlost tisku zdi	25 mm·s ⁻¹
Rychlost tisku prvotní vrstvy	20 mm·s ⁻¹
Pohyb	
povolit retrakci	Ne
Chlazení	
rychlost ventilátoru	100 %,
počáteční rychlost ventilátoru	0 %
Podpora	
generovat podpory	Ne
Adheze topné podložky	
typ přilnavosti podložky	bez struktury pro zvýšení přilnavosti
Opravi síti	
nepoužito	
Speciální módy	
nepoužito	
Experimentální	
nepoužito	

Po nastavení potřebných parametrů ve sliceru byly generovány G-kódy, což jsou soubory s instrukcemi pro 3D tiskárnu. Tyto G-kódy poté byly pomocí SD karty přeneseny do tiskárny. Tento proces umožňuje vytvořit G-kódy pro více tiskových úloh zároveň a pak v menu tiskárny vybrat jednu z nich.

8.3 Tisk

Před zahájením tisku je třeba připravit povrch tiskové podložky, což může zahrnovat čištění nebo aplikaci adheziv. Následně se provede zkušební tisk pro kontrolu správných nastavení. Pokud výsledky neodpovídají očekáváním, je nutné upravit parametry tisku. Po dokončení tisku se modely sundají z podložky, odstraní se podpěry, struktury pro zvýšení adheze a provede se doladění povrchu tištěných vzorků.

Příprava tiskové podložky je důležitá pro úspěšný tisk, zvláště u tiskárny jako je Creality CR-10, která je vybavena skleněnou podložkou. Začínáme s čistou, dokonale vyrovnanou podložkou, aby se zajistilo, zda první vrstva přilne správně, pokud počáteční tisk ukáže problémy s adhezí, aplikují se adheziva jako lepidlo Kores nebo maskovací páska, protože se tiskne vrstvou o tloušťce 0,2 mm, je důležité, aby nedošlo k vykřivení podložky. I odchýlení o 0,1 mm, může výrazně ovlivnit finální kvalitu tisku. Přilnavost může také zlepšit zvýšení teploty podložky, to ale současně zvyšuje energetickou náročnost, což je třeba vzít v úvahu při nastavování tiskárny.

8.3.1 Testovací tisk

Během testovacího tisku se již u první vrstvy objevily problémy s nedostatečnou adhezí, což mělo za následek, že jednotlivé "housenky" materiálu na tiskové podložce nedržely dostatečně, aby byl tento problém odstraněn, byla na podložku nanášena tenká vrstva lepidla Kores. Tento krok zlepšil přilnavost materiálu k podložce, a tisk poté probíhal hladce bez dalších komplikací.

8.3.2 Konečný tisk

Testovací tělesa, vzorky a objekt pro 3D měření byly úspěšně vytištěny z materiálu PLA pomocí 3D tiskárny. Pro tisk objektu na 3D měření bylo spotřebováno 141 gramů materiálu a celkový čas tisku činil 16 hodin a 46 minut. Tento objekt byl pečlivě navržen tak, aby poskytl komplexní data pro analýzu geometrické přesnosti tiskárny. Co se týče testovacích

vzorků a těles, bylo k tisku každého z nich použito 83 gramů materiálu, přičemž bylo vytištěno celkem osm těchto jednotek. Každá z nich obsahovala 5 testovacích těles pro zkoušku tahem a 10 vzorků pro zkoušku vrubové houževnatosti. Časy tisku pro tyto vzorky se lišily v závislosti na různých testovaných rychlostech tisku. Detailní informace o časech tisku pro každou rychlost jsou popsány v tabulce.

Tabulka 4 Časy tisku

Rychlost tisku (%)	Čas tisku (h)
100 %	11,35
200 %	6,3
300 %	4,7
400 %	4,1

Časy tisku nejsou přímo úměrné rychlosti tisku, protože v software tiskárny je nastaveno maximální zrychlení, kterým se může dostat na danou rychlost.

8.3.3 Dočištění výtisků

Po dokončení tisku byly výtisky dočištěny za účelem zlepšení kvality povrchu a přesnosti měření. Struktury navržené k zvýšení adheze vrstev byly precizně odstraněny pomocí vysouvacího nože, aby se eliminovaly přebytečné materiály, které by mohly ovlivnit výsledky mechanických testů. Dále byly výtisky krátce ošetřeny malým plynovým hořákem. Tento proces zahrnoval rychlé ožehnutí povrchu, což pomohlo odstranit drobná vlákna a vyhladit mírné nerovnosti způsobené tiskovým procesem. Tato finální úprava zajistila lepší estetiku.



Po ožehnutí

Před ožehnutím

Obrázek 19 Odstranění nežádoucích vláken

9 MĚŘENÍ 3D

Měření 3D objektů bylo provedeno pomocí přesného 3D skenovacího zařízení GOM ATOS II TripleScan MV 320. Tento skener poskytuje detailní digitalizaci vnějších i vnitřních rozměrů tištěných objektů, což umožňuje získat přesné geometrické údaje o kvalitě a přesnosti tisku. Výsledky získané z tohoto zařízení byly použity k vyhodnocení, jak se tištěné rozměry shodují s navrženými parametry.



Obrázek 20 Zařízení GOM ATOS II TripleScan MV 320

9.1 Postup

Měření 3D objektů na zařízení GOM ATOS II TripleScan MV 320 zahrnuje několik kroků zaměřených na zajištění přesných a spolehlivých dat o geometrických vlastnostech tištěných objektů. Inicializace měření začíná pevným umístěním objektu na měřicí stůl zařízení, aby se zajistila stabilita během skenování a eliminovala jakákoli pohybová chyba.

Po umístění objektu provádí skener ATOS II TripleScan několik postupných skenů pomocí modrého světla, které detailně mapuje povrch objektu. Modré světlo je vybráno pro svou schopnost poskytovat vysokou přesnost a minimalizovat zkreslení způsobené světelným odrazem. Data z těchto skenů jsou poté digitálně zpracována softwarem GOM Professional.

Softwarové zpracování zahrnuje porovnání 3D skenovaných dat s původními CAD modely. Analýza se provádí generováním barevných map odchylek, kde každá barva indikuje stupeň odchylky od originálního designu. Tato vizualizace umožňuje rychlou identifikaci oblastí s významnými geometrickými rozdíly.

Výsledná zpráva obsahuje podrobné informace o měřených rozměrech a odchylkách v osách X, Y a Z. Tento proces umožňuje přesné hodnocení kvality a přesnosti 3D tisku, což může sloužit k další optimalizaci tiskových procesů.[29]

9.2 Měření

Měření 3D objektů bylo provedeno na Materiálově-technologické fakultě Slovenské technické univerzity v Trnavě. Měření bylo provedeno Ing. Jánem Mildem, Ph.D.

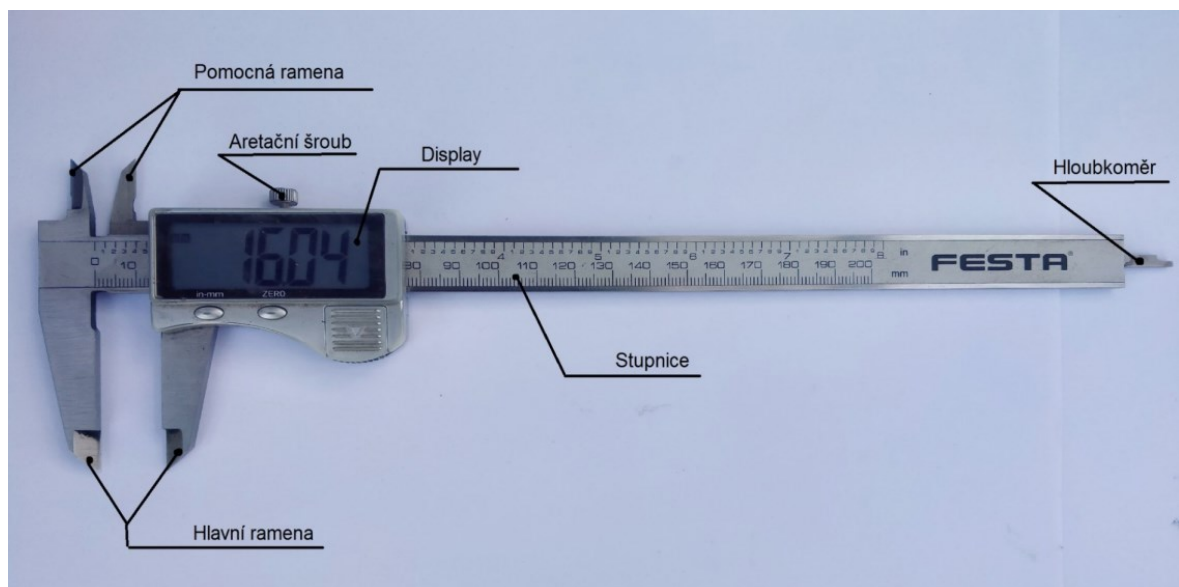
Všechny výsledky a detailní analýzy včetně barevných map odchylek a porovnání s původním CAD modelem jsou součástí zprávy, která je přiložena v přílohách (PŘÍLOHA P IV). Tato zpráva poskytuje ucelený přehled o přesnosti a kvalitě tištěného objektu.

10 MĚŘENÍ POSUVNÝM MĚŘIDLEM

Testovací tělesa použitá pro tahové zkoušky i pro zkoušky vrubové houževnatosti byla změřena digitálním posuvným měřidlem Festa s rozsahem měření 0 až 200 mm a přesností 0,01 mm.

Měření proběhlo tak, že byly změřeny všechny vnější rozměry testovacích těles na okrajích i v jejich středu, aby se zjistilo, došlo-li k deformacím nebo smrštění materiálu, které mohou nastat v důsledku výrobního procesu, jako je tisk. U těles určených pro tahovou zkoušku, zvláště těch tištěných ve svislé orientaci, byly změřeny rozměry jak na vrchní, tak na spodní straně, což umožnilo zaznamenat jakoukoliv nekonzistenci v rozměrech způsobenou odtlačeními tištěného tělesa tryskou.

Posuvné měřidlo Festa s LCD displejem (Obr. 21), které poskytuje možnost šroubkové aretace naměřených hodnot a umožňuje přepínání mezi milimetry a palci, představuje spolehlivý nástroj pro tento účel.



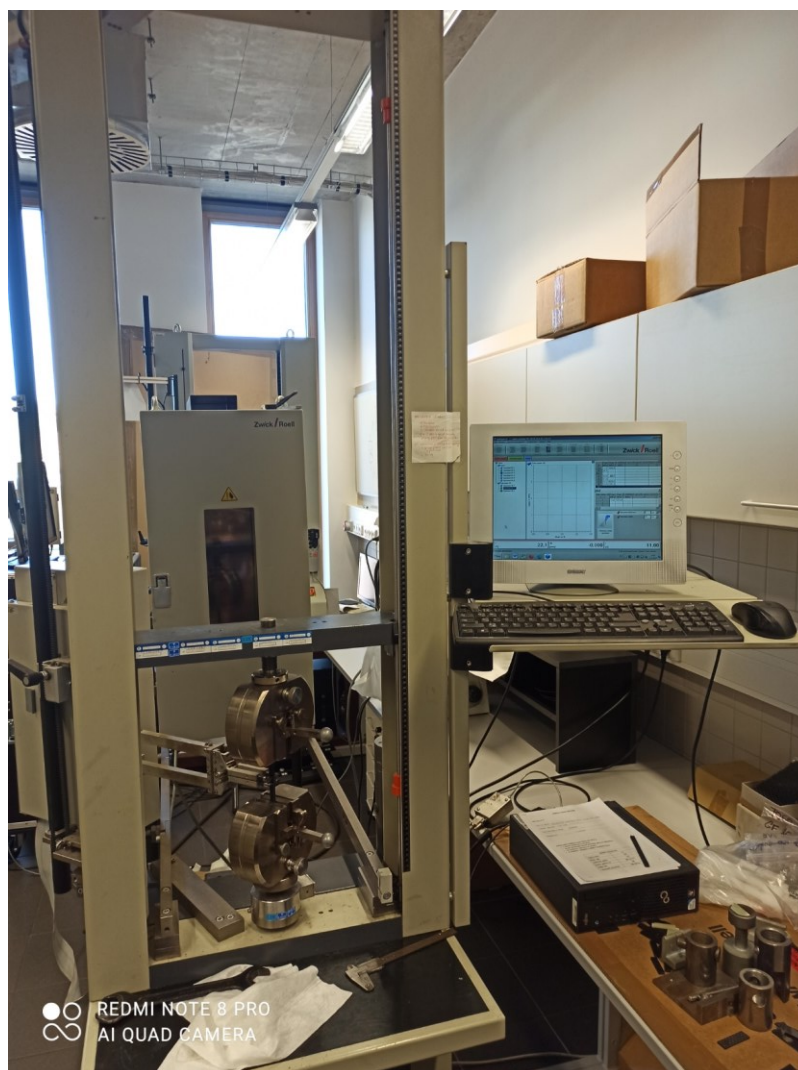
Obrázek 21 Posuvné měřidlo

Měření rozměrů 3D tištěných těles bylo provedeno pro pochopení vlivu tiskových podmínek na výslednou přesnost a rozměrovou stabilitu. Tento proces zahrnuje nejen zjištění konečných rozměrů, ale také posouzení, jak teplota a rychlost tisku mohou ovlivnit smrštění nebo roztažení materiálu. Měřeními v různých částech těles, včetně středu a okrajů těles, lze identifikovat oblasti, kde dochází k největším odchylkám od požadovaných specifikací, což poskytuje přesnější přehled o rozměrové stabilitě materiálu po vychladnutí.

11 ZKOUŠKA TAHEM

Tahové zkoušky plastů jsou regulovány normou ČSN EN ISO 527-1, která se zabývá určením tahových charakteristik plastů.[30]

Zařízení Zwick Materialprüfung 1456 (Obr. 22) je univerzální stroj sloužící k provedení tahových, ohybových a tlakových zkoušek. Experiment byl realizován pomocí statického zatížení, ale zařízení umožňuje také cyklické zatěžování.



Obrázek 22 Zařízení Zwick Materialprüfung 1456

Tabulka 5 Parametry zařízení Zwick Materialprüfung 1456

Zwick Materialprüfung 1456	
Pracovní výška	1 284 mm
Pracovní šířka	420 mm
Celková výška zařízení	2 012 mm
Šířka zařízení	630 mm
Snímače zatěžující síly	2,5 a 20 KN
Maximální rychlost posuvu příčnicku	800 mm·min ⁻¹
Možnosti zatěžování	statické a cyklické

11.1 Provedení tahové zkoušky

Základem tahové zkoušky je protahování zkušební vzorku v jeho podélné ose s konstantní rychlostí až do bodu, kdy dojde k jeho poškození nebo dosažení předem určených hodnot (napětí ve formě zatížení nebo deformace ve formě prodloužení).

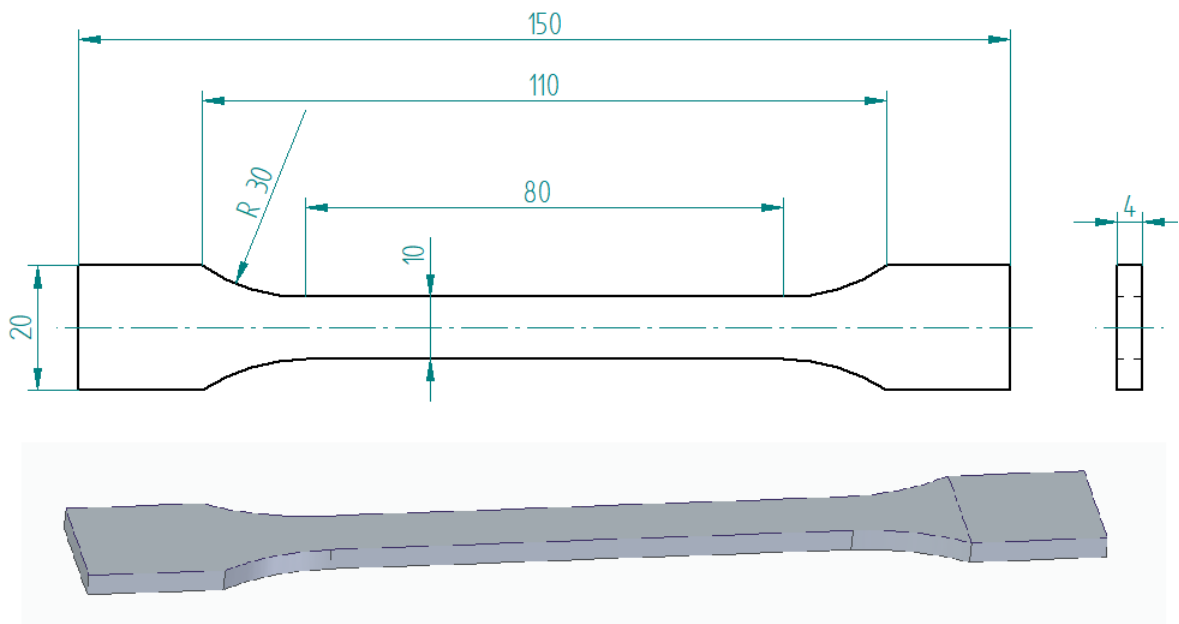
Rychlost oddalování čelistí byla nastavena na 1 (mm·min⁻¹) pro měření modulu pružnosti v tahu E_t a poté na 10 (mm·min⁻¹) až do ukončení zkoušky. Extenzometr byl nastaven na upínací vzdálenost 50 (mm).

V prvním kroku každého testovacího cyklu byly změřeny rozměry zkušební vzorku. Tyto údaje byly zapsány do výpočetního programu TestExpertII, který zajišťuje komunikaci mezi trhacím strojem Zwick a počítačem.

Následně byl vzorek umístěn a uchycen do čelistí stroje tak, aby jeho osa byla v souladu s tahovou osou zařízení. Čelisti byly pevně utaženy, aby během zkoušky nedošlo k proklouznutí vzorku, ale současně bylo dbáno na to, aby nedošlo k mechanickým poškozením vlivem silného stisku. Horní i dolní čelist byly zajištěny mechanicky.

Po upevnění vzorku bylo možné provést samotnou zkoušku. V průběhu zkoušky byly zaznamenávány grafy a výsledky, které byly prezentovány v softwaru TestExpertII. Tato měření byla provedena na tištěných tělískách v ose z, aby byla otestována přilnavost jednotlivých vrstev.

Vzorky byly vyrobeny podle normy ČSN EN ISO 527-2, viz Obr. 23



Obrázek 23 Testovací těleso na zkoušku tahem

11.2 Vyhodnocované parametry

Pro hodnocení výsledků tahové zkoušky byly stanoveny následující výpočetní parametry.

Tabulka 6 Výpočetní parametry

Modul pružnosti v tahu	E_t (MPa)
Maximální síla	F_{\max} (N)
Relativní prodloužení při maximální síle	ΔF_{\max} (%)
Mez pevnosti v tahu	σ_{mt} (MPa)

Modul pružnosti v tahu, značený jako E_t a vyjádřený v megapascalch (MPa), určuje schopnost materiálu odolat plastické deformaci. Tento parametr se graficky určuje jako sklon lineární části zatěžovacího diagramu, kde je poměrné prodloužení úměrné aplikovanému napětí. Modul pružnosti se vypočítá jako změna napětí dělená změnou prodloužení.

$$E_t = tg\alpha = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta F}{S_0}}{\frac{\Delta(\Delta L)}{L_0}} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

Maximální síla, značená jako F_{\max} a vyjádřená v newtonech (N), odpovídá nejvyšší síle zaznamenané během zkoušky až do bodu, kdy dojde k první plastické deformaci, známé jako mez kluzu.

Dalším sledovaným parametrem je relativní prodloužení při maximální síle, značené ΔF_{\max} a vyjádřené v procentech, které indikuje míru prodloužení vzorku pod vlivem tahových napětí. To se vyjadřuje jako poměr změny délky vzorku k jeho původní délce.

$$\Delta F_{\max} = \frac{\Delta L}{L_0} (\%) \quad (2)$$

Mez pevnosti v tahu, značená jako σ_{mt} a vyjádřená v (MPa), ukazuje maximální napětí, které materiál může vydržet před selháním, a vypočítává se jako maximální dosažená síla dělená průřezovou plochou vzorku.

$$\sigma_{mt} = \frac{F_{\max}}{S_0} (\text{MPa}) \quad (3)$$

12 ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI

Zkouška vrubové houževnatosti plastů je definována normami ISO 179-1 a ISO 179-2, které popisují metody pro stanovení rázové houževnatosti plastů. Tato zkouška se provádí na zařízení Zwick Roell HIT25P. [30]



Obrázek 24 Zařízení Zwick Roell HIT25P

Tabulka 7 Technické parametry zařízení Zwick Roell HIT25P

Zwick Roell HIT25P	
Pracovní výška	1080 mm
Pracovní šířka	1170 mm
Výška zařízení	500 mm
Hmotnost zařízení cca	258 kg
Maximální potenciální energie	25 J

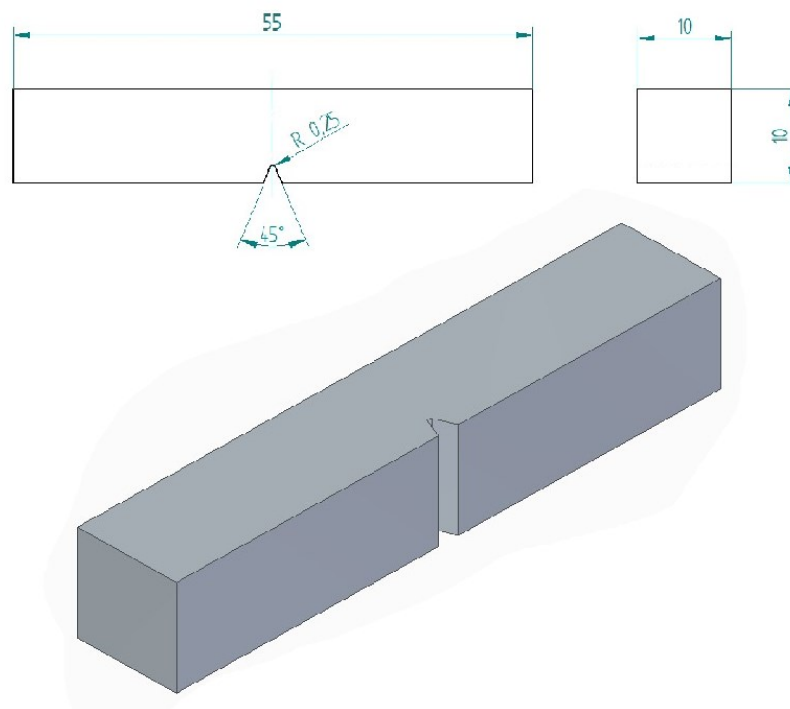
12.1 Provedení zkoušky vrubové houževnatosti

Hlavní částí zkoušky je aplikace rázového zatížení na vzorek s vrubem, aby bylo možné posoudit jeho houževnatost. Vzorek je umístěn ve stroji, kde je přesně vycentrován vůči kyvadlu, které na něj udeří. Po úderu je měřena výška kam až se kladivo vyhoupne. Poté se vypočítá, kolik kinetické energie kladivo ztratilo při úderu. V průběhu testu je zaznamenáván graf, který ilustruje chování materiálu pod nárazem a energetickou absorpci vzorku.

Začátek každého testovacího cyklu zahrnuje přípravu a umístění vzorku do stroje. Dále se nastaví parametry rázu podle specifikace normy ISO 179. Po provedení testu jsou výsledky zobrazeny a analyzovány v softwaru, který umožňuje detailní vyhodnocení rázové houževnatosti.

Tato zkouška byla zvolena za účelem ověření, zda materiál nevykazuje známky degradace v důsledku dlouhodobého působení vysokých teplot během zpracování v extruderu.

Pro experiment nebyla použita normalizovaná zkušební tělíska, ale byly použity zkušební vzorky s rozměry podobnými tělesům, která budou tištěna v budoucnu, viz Obr. 25.



Obrázek 25 Vzorek pro zkoušku vrubové houževnatosti

12.2 Vyhodnocované parametry

Software zařízení Zwick Roell HIT25P zapisuje následující parametry.

Úhel vzestupu ($^\circ$) indikuje změnu polohy kyvadla po dopadu na vzorek.

Nominální pracovní kapacita (J) je teoretická hodnota energie, kterou má kyvadlo k dispozici před uvolněním.

Pracovní kapacita (J) reflektuje skutečnou energii spotřebovanou na překonání odporu vzorku.

Typ selhání označuje způsob, jakým došlo k lomu materiálu – zda byl lom křehký nebo houževnatý, což je důležité pro posouzení chování materiálu při nárazu.

W (%) je procentuální vyjádření spotřebované energie vzhledem k nominální pracovní kapacitě a poskytuje představu o efektivitě absorpce energie materiálem.

W_{Friction} (J) označuje množství energie, které bylo spotřebováno kvůli tření, což může být důležitý parametr při hodnocení přesnosti testu.

Vyhodnocován je parametr A_K , vyjádřený v ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$), představuje absorbovanou energii na jednotku plochy a umožňuje srovnání mezi různými materiály nebo různými typy vrubů.

$$A_K = \frac{W}{b \cdot h_K} \quad (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (4)$$

13 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

V následujících kapitolách je vyhodnocení naměřených dat zkoušky tahem, zkoušky vrubové houževnatosti, 3D měření a měření posuvným měřidlem. Naměřené hodnoty jsou vyjádřeny pomocí několika statistických metrik. Průměrná hodnota \bar{x} poskytuje centrální tendenci dat, zatímco směrodatná odchylka s a nejistota typu A u_A ukazují na variabilitu a míru nejistoty měření. Dále je využita metrika MADT (Mean Absolute Deviation from the Trend), která představuje průměrnou absolutní odchylku od nominální hodnoty a poskytuje další vhled do rozptylu dat. Kompletní tabulky se všemi naměřenými hodnotami jsou v příloze práce.

13.1 Vyhodnocení tahové zkoušky

V tabulce (Tab. 8) jsou vyhodnocená data tahové zkoušky testovacích těles, která byla vytištěna při teplotě 200 °C.

Tabulka 8 Výsledky tahové zkoušky pro teplotu 200 °C

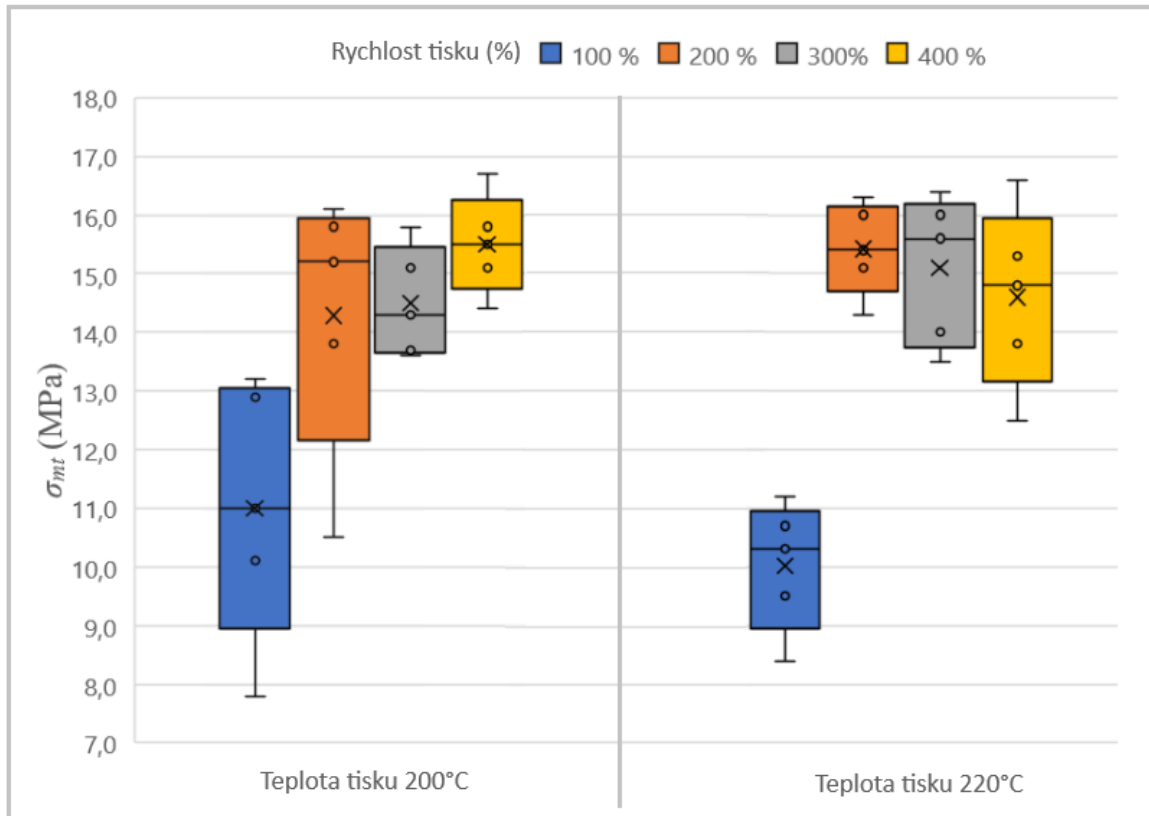
Teplota 200 °C				
Rychlost 100 %				
	σ_{mt} (MPa)	E_t (MPa)	F_{max} (N)	ΔF_{max} (%)
\bar{x}	11,00	927,07	440,20	2,50
s	1,975	595,733	79,896	0,486
u_A	0,883	266,420	35,731	0,217
Rychlost 200 %				
	σ_{mt} (MPa)	E_t (MPa)	F_{max} (N)	ΔF_{max} (%)
\bar{x}	14,28	1338,77	578,13	3,50
s	2,049	700,580	85,267	0,302
u_A	0,916	313,309	38,133	0,135
Rychlost 300 %				
	σ_{mt} (MPa)	E_t (MPa)	F_{max} (N)	ΔF_{max} (%)
\bar{x}	14,50	1728,10	587,20	3,34
s	0,841	876,056	34,783	0,178
u_A	0,376	391,784	15,556	0,080
Rychlost 400 %				
	σ_{mt} (MPa)	E_t (MPa)	F_{max} (N)	ΔF_{max} (%)
\bar{x}	15,50	1332,60	622,83	3,51
s	0,762	268,242	30,947	0,172
u_A	0,341	119,962	13,840	0,077

V tabulce (Tab. 9) jsou vyhodnocená data tahové zkoušky testovacích těles, která byla vytištěna při teplotě 200 °C.

Tabulka 9 Výsledky tahové zkoušky pro teplotu 220 °C

Teplota 220 °C				
Rychlost 100 %				
	σ_{mt} (MPa)	E_t (MPa)	F_{max} (N)	ΔF_{max} (%)
\bar{x}	10,02	1339,90	406,06	2,19
s	0,983	721,414	43,039	0,249
u_A	0,439	322,626	19,248	0,111
Rychlost 200 %				
	σ_{mt} (MPa)	E_t (MPa)	F_{max} (N)	ΔF_{max} (%)
\bar{x}	15,42	1708,85	622,78	3,50
s	0,703	716,816	26,688	0,205
u_A	0,314	320,570	11,935	0,092
Rychlost 300 %				
	σ_{mt} (MPa)	E_t (MPa)	F_{max} (N)	ΔF_{max} (%)
\bar{x}	15,10	1451,53	610,57	3,40
s	1,142	666,377	46,877	0,234
u_A	0,511	298,013	20,964	0,105
Rychlost 400 %				
	σ_{mt} (MPa)	E_t (MPa)	F_{max} (N)	ΔF_{max} (%)
\bar{x}	14,60	1393,25	583,90	3,39
s	1,384	603,446	45,843	0,460
u_A	0,619	269,869	20,502	0,206

Následující graf znázorňuje krabicové zobrazení maximálního napětí, v závislosti na teplotě a rychlosti tisku naměřeného při tahové zkoušce (Obr. 26).



Obrázek 26 Závislost σ_{mt} na rychlosti a teplotě tisku

Z výsledků měření tahové zkoušky vyplývá, že se maximální napětí zvyšuje se zvyšující se rychlostí tisku. K největšímu navýšení dochází mezi hodnotami 100 % až 200 %. Zvýšení teploty vede ke snížení pevnosti při nejpomalejším tisku, naopak při hodnotách 200 % a výše se hodnota mírně zvýšila. Nejvyšší hodnoty maximální napětí dosáhlo při teplotě 220 °C a rychlosti 300 %.

Experiment byl navržen tak, aby byly jednotlivé vrstvy trhány jedna od druhé. Z toho vyplývá, že adheze jednotlivých vrstev roste s maximálním napětím. Největší adheze mezi vrstvami tedy byla zaznamenána při teplotě 220 °C a rychlosti 300 %.

13.2 Vyhodnocení zkoušky vrubové houževnatosti

V následující tabulce (Tab. 10) jsou vyhodnocená data zkoušky vrubové houževnatosti vzorků, které byly tištěny při teplotě 200 °C. Tabulka je doložena grafy (Obr. 27), (Obr. 28).

Tabulka 10 Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro teplotu 200 °C

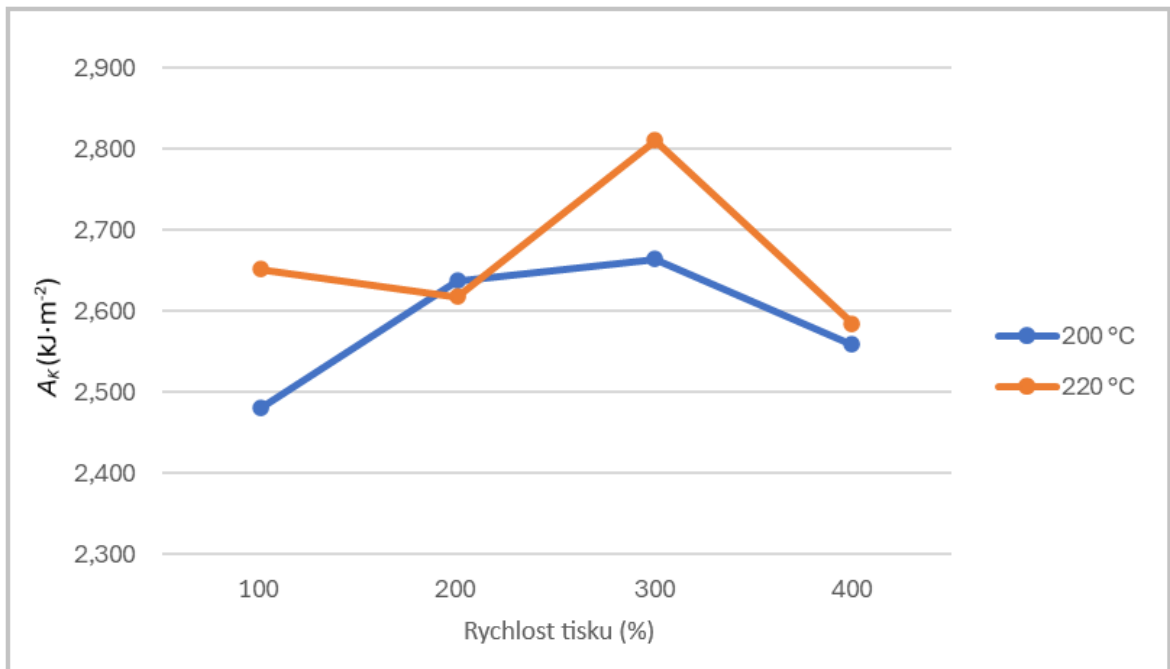
Teplota 200 °C					
Rychlost 100 %					
	Úhel vzestupu (°)	W (J)	W (%)	W_{Friction} (J)	A_K (kJ·m ⁻²)
\bar{x}	142,760	0,199	2,650	0,010	2,481
s	0,461	0,020	0,273	0,000	0,239
u_A	0,146	0,006	0,086	0,000	0,076
Rychlost 200 %					
	Úhel vzestupu (°)	W (J)	W (%)	W_{Friction} (J)	A_K (kJ·m ⁻²)
\bar{x}	142,470	0,211	2,826	0,010	2,638
s	0,283	0,012	0,164	0,000	0,148
u_A	0,089	0,004	0,052	0,000	0,047
Rychlost 300 %					
	Úhel vzestupu (°)	W (J)	W (%)	W_{Friction} (J)	A_K (kJ·m ⁻²)
\bar{x}	142,410	0,213	2,850	0,010	2,665
s	0,409	0,018	0,231	0,000	0,211
u_A	0,129	0,006	0,073	0,000	0,067
Rychlost 400 %					
	Úhel vzestupu (°)	W (J)	W (%)	W_{Friction} (J)	A_K (kJ·m ⁻²)
\bar{x}	142,610	0,204	2,742	0,010	2,559
s	0,554	0,023	0,319	0,000	0,287
u_A	0,175	0,007	0,101	0,000	0,091

V následující tabulce (Tab. 11) jsou vyhodnocená data zkoušky vrubové houževnatosti vzorků, které byly tištěny při teplotě 220 °C. Tabulka je doložena grafy (Obr. 27), (Obr. 28).

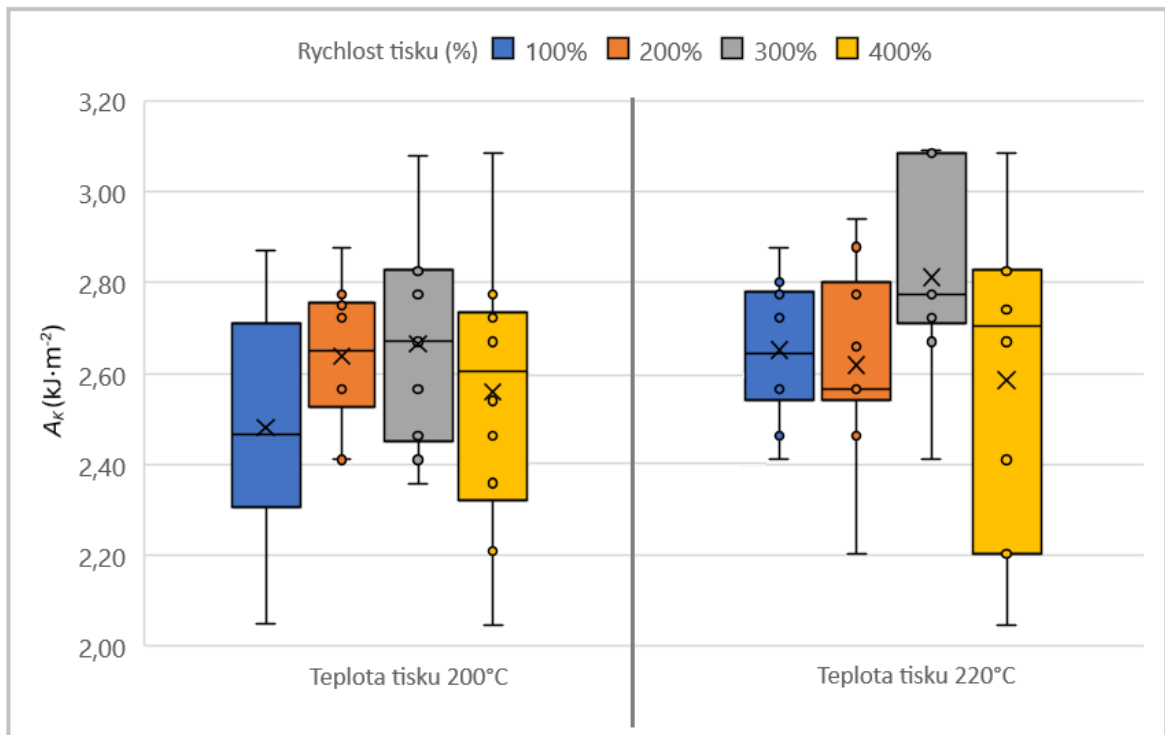
Tabulka 11 Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro teplotu 220 °C

Teplota 220 °C					
Rychlost 100 %					
	Úhel vzestupu (°)	W (J)	W (%)	W_{Friction} (J)	A_K (kJ·m ⁻²)
\bar{x}	142,440	0,211	2,842	0,010	2,652
s	0,284	0,012	0,169	0,000	0,150
u_A	0,090	0,004	0,053	0,000	0,047
Rychlost 200 %					
	Úhel vzestupu (°)	W (J)	W (%)	W_{Friction} (J)	A_K (kJ·m ⁻²)
\bar{x}	142,500	0,209	2,793	0,010	2,618
s	0,385	0,017	0,217	0,000	0,201
u_A	0,122	0,005	0,069	0,000	0,064
Rychlost 300 %					
	Úhel vzestupu (°)	W (J)	W (%)	W_{Friction} (J)	A_K (kJ·m ⁻²)
\bar{x}	142,130	0,224	3,021	0,010	2,811
s	0,398	0,017	0,229	0,000	0,207
u_A	0,126	0,005	0,073	0,000	0,065
Rychlost 400 %					
	Úhel vzestupu (°)	W (J)	W (%)	W_{Friction} (J)	A_K (kJ·m ⁻²)
\bar{x}	142,570	0,206	2,757	0,010	2,585
s	0,628	0,027	0,366	0,000	0,328
u_A	0,199	0,009	0,116	0,000	0,104

Následující grafy zobrazují absorbovanou energii v závislosti na rychlosti a teplotě tisku



Obrázek 27 Absorbovaná energie v závislosti na rychlosti tisku



Obrázek 28 Absorbovaná energie v závislosti na rychlosti a teplotě tisku

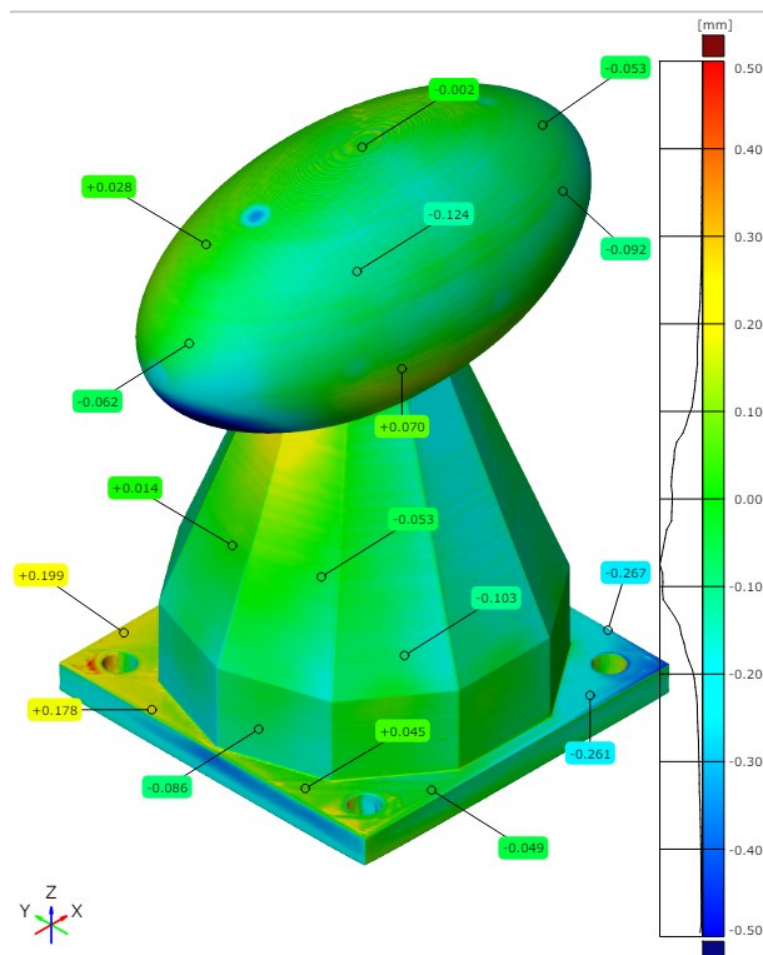
Z výsledků měření zkoušky vrubové houževnatosti vyplývá, že nejvyšších hodnot absorbované energie bylo dosaženo při rychlosti 300 %. U rychlostí 100 % a 300 % byl

zaznamenán výrazný nárůst hodnoty absorbované energie se zvýšením teploty. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo při teplotě 220 °C a rychlosti 300 %.

Degradace materiálu PLA vlivem delšího vystavení vyšší teplotě nebyla prokázána.

13.3 Vyhodnocení 3D měření

Výsledky měření 3D objektu zpracované na skenovacím zařízení GOM ATOS II TripleScan MV 320 odhalily několik zjištění ohledně přesnosti a kvality tisku. Největší odchylka byla zaznamenána na převisu modelu, kde dosáhla hodnoty -1.789 mm. Tato značná odchylka byla způsobena smršťováním materiálu během tisku, což je častý jev u termoplastů používaných v 3D tisku. Problém se smrštěním může být částečně překonán použitím materiálů s nižším koeficientem teplotní roztažnosti, optimalizací teploty tiskového prostředí, nebo zvýšením intenzity chlazení při tisku.



Obrázek 29 Ukázka z měřicího reportu

Další výrazná odchylka byla identifikována na podstavě modelu, kde byla příčinou kombinace smršťování materiálu a nedostatečné adheze k podložce tiskárny. Tento problém lze potenciálně řešit přidáním adhezní struktury, která by zlepšila přilnavost první vrstvy k tiskové podložce a tím snížila riziko deformací způsobených nedostatečnou adhezí.

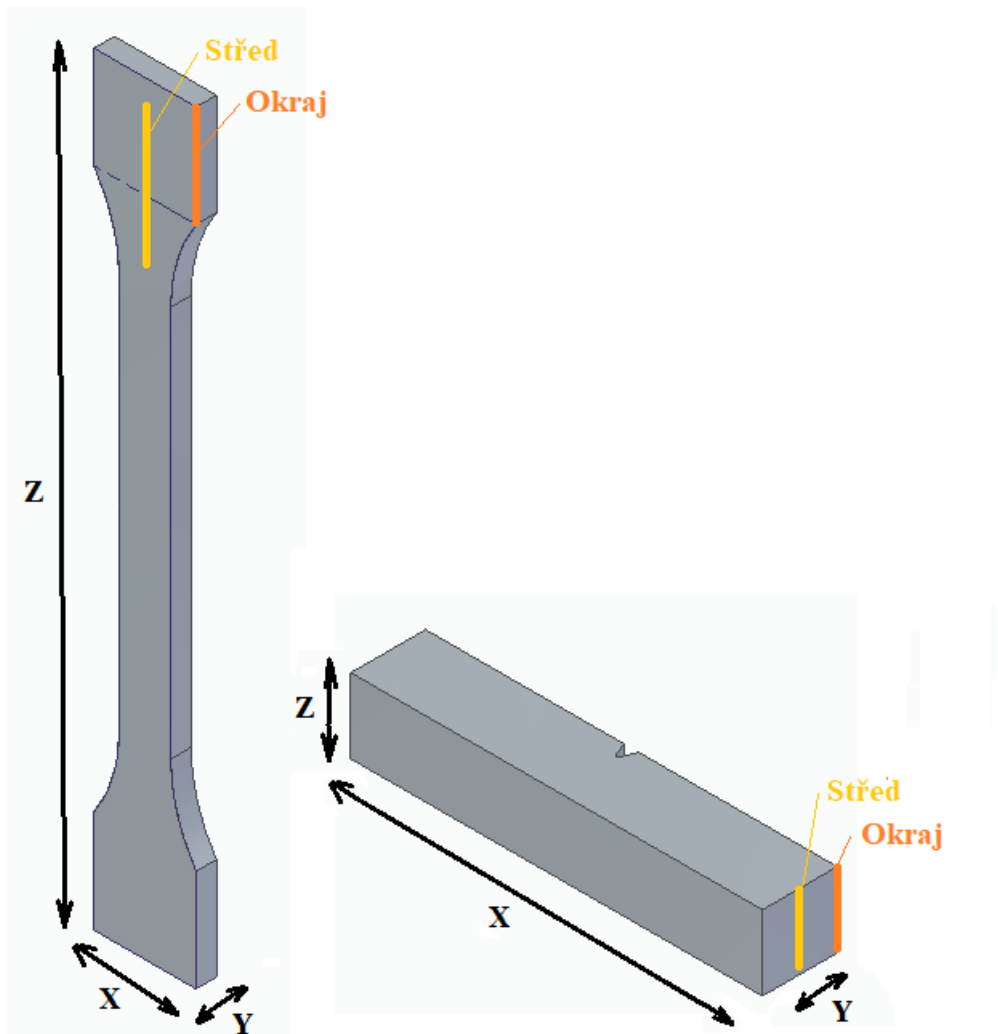
Pozitivním zjištěním bylo, že úhly na výtisku byly v rámci specifikací, což naznačuje, že osy tiskárny jsou dobře kalibrovány a zachovávají pravé úhly. Toto je důležité pro zajištění, že všechny roviny tisku jsou správně orientovány a že tiskárna je schopna přesně reprodukovat navržené geometrie.

Další zkoumané aspekty, jako jsou rovinnost a symetrie, byly také v rámci očekávaných tolerancí. To ukazuje, že tiskárna dobře zvládá udržet konzistentní výšku vrstvy a rovnoměrně distribuuje materiál během tisku.

Celková přesnost tiskárny se pohybuje v rozmezí od -0.002 mm do $+0.199$ mm pro většinu měřených rozměrů, což je přijatelné pro mnoho aplikací. Nicméně, tiskárna má tendenci mít problémy s tiskem složitějších tvarů, jako jsou tenké převisy a složité křivky, kde dochází k větším odchylkám z důvodu přetížení materiálu nebo nedostatečné podpory během tisku. Optimalizace podpurných struktur a přizpůsobení tiskových parametrů pro konkrétní materiály by mohly tyto slabiny zlepšit.

13.4 Vyhodnocení měření posuvným měřidlem

Měřené rozměry byly pojmenovány podle orientace os 3D tiskárny jimiž byly tištěny. To znamená že měřený rozměr X byl tištěn osou X. Orientace těles při tisku je zobrazena na obrázku 30. Kvůli rozdílným rozměrům na okrajích a ve středech stěn tištěných objektů byly v každé ose změřeny dva rozměry „střed“ a „okraj“, viz Obr. 30.



Obrázek 30 Měření rozměrů

V následujících tabulkách je využita metrika MADT (Mean Absolute Deviation from the Trend), která představuje průměrnou absolutní odchylku od nominální hodnoty

V tabulce (Tab. 12) jsou vyhodnocená data měření testovacích vzorků pro vrubovou houževnatost tištěných s teplotou trysky 200 °C. Měření proběhlo pomocí posuvného měřidla.

Tabulka 12 Měření posuvným měřidlem vzorky na vrubovou houževnatost

Testovací vzorky na vrubovou houževnatost						
Teplota 200 °C						
	Osa Z		Osa X		Osa Y	
	Okraj	Střed	Okraj	Střed	Okraj	Střed
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
	Nominální hodnota					
	10,00	10,00	55,00	55,00	10,00	10,00
	Rychlost 100 %					
\bar{x}	9,945	9,825	54,922	54,853	10,036	9,981
s	0,007	0,005	0,039	0,016	0,030	0,021
u_A	0,0021	0,0016	0,0122	0,0049	0,0095	0,0065
MADT	-0,055	-0,175	-0,078	-0,147	0,036	-0,019
	Rychlost 200 %					
\bar{x}	10,076	9,98	55,078	54,794	10,227	10,018
s	0,012	0,015	0,021	0,067	0,053	0,038
u_A	0,0038	0,0047	0,0066	0,0213	0,0166	0,0121
MADT	0,076	-0,020	0,078	-0,206	0,227	0,018
	Rychlost 300 %					
\bar{x}	10,089	9,876	55,241	54,902	10,372	9,997
s	0,014	0,025	0,040	0,055	0,027	0,023
u_A	0,0043	0,0078	0,0126	0,0175	0,0086	0,0072
MADT	0,089	-0,124	0,241	-0,098	0,372	-0,003
	Rychlost 400 %					
\bar{x}	10,203	10,036	55,356	55,051	10,42	10,097
s	0,233	0,022	0,030	0,028	0,031	0,272
u_A	0,0738	0,0068	0,0094	0,0088	0,0098	0,0860
MADT	0,203	0,036	0,356	0,051	0,420	0,097

V následující (Tab. 13) tabulce jsou vyhodnocená data měření testovacích vzorků pro vrubovou houževnatost tištěných s teplotou trysky 220 °C. Měření proběhlo pomocí posuvného měřidla.

Tabulka 13 Měření posuvným měřidlem vzorky na vrubovou houževnatost

Testovací vzorky na vrubovou houževnatost						
Teplota 220 °C						
	Osa Z		Osa X		Osa Y	
	Okraj (mm)	Střed (mm)	Okraj (mm)	Střed (mm)	Okraj (mm)	Střed (mm)
Nominální hodnota						
	10,00	10,00	55,00	55,00	10,00	10,00
Rychlost 100 %						
\bar{x}	9,971	9,864	55	54,942	10,143	10,02
s	0,019	0,014	0,020	0,026	0,019	0,015
u_A	0,0061	0,0045	0,0065	0,0083	0,0060	0,0049
MADT	-0,029	-0,136	0,000	-0,058	0,143	0,020
Rychlost 200 %						
\bar{x}	10,063	9,997	55,201	54,848	10,302	9,985
s	0,021	0,013	0,016	0,026	0,026	0,015
u_A	0,0065	0,0043	0,0050	0,0082	0,0083	0,0047
MADT	0,063	-0,003	0,201	-0,152	0,302	-0,015
Rychlost 300 %						
\bar{x}	9,991	9,853	55,253	54,931	10,403	9,963
s	0,018	0,026	0,026	0,028	0,134	0,025
u_A	0,0056	0,0083	0,0084	0,0090	0,0425	0,0080
MADT	-0,009	-0,147	0,253	-0,069	0,403	-0,037
Rychlost 400 %						
\bar{x}	10,148	9,847	55,268	54,998	10,424	9,953
s	0,220	0,011	0,037	0,024	0,015	0,025
u_A	0,0696	0,0035	0,0116	0,0077	0,0047	0,0080
MADT	0,148	-0,153	0,268	-0,002	0,424	-0,047

V následující tabulce (Tab. 14) jsou vyhodnocená data měření testovacích vzorků pro zkoušku tahem tištěných s teplotou trysky 200 °C. Měření proběhlo pomocí posuvného měřidla.

Tabulka 14 Měření posuvným měřidlem tělíska pro zkoušku tahem

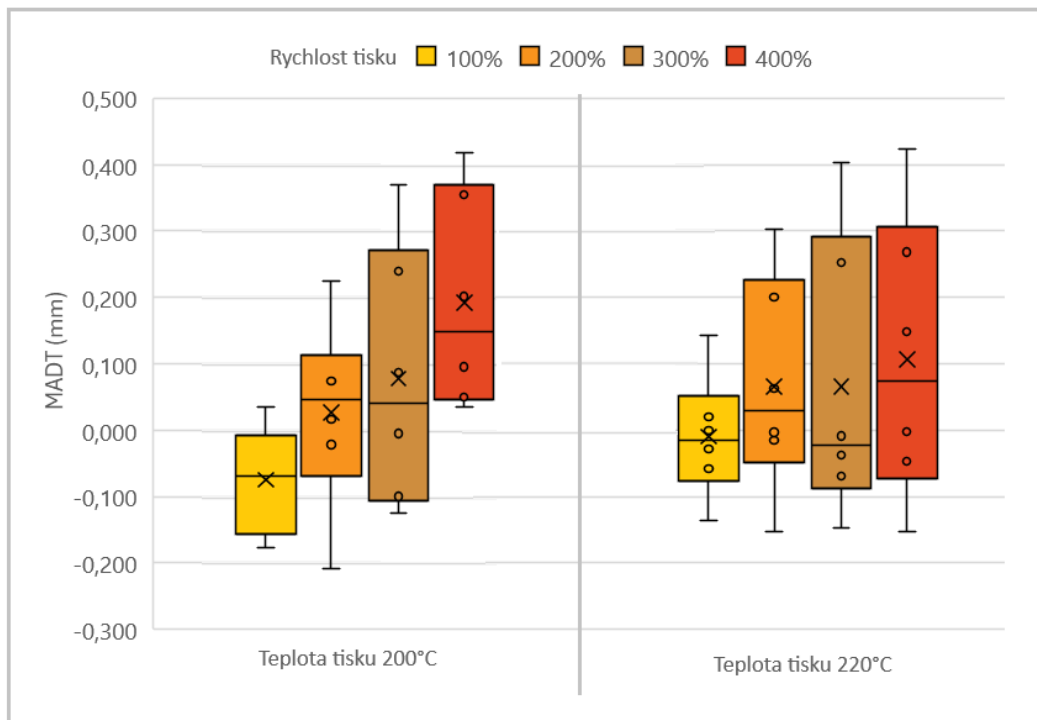
Testovací tělesa na tah										
Teplota 200 °C										
Číslo měření	Osa Z		„U podložky“				„Nahoře“			
			Osa X		Osa Y		Osa X		Osa Y	
	Okraj	Střed	Okraj	Střed	Okraj	Střed	Okraj	Střed	Okraj	Střed
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
	Nominální hodnota									
	150,00	150,00	20,00	20,00	4,00	4,00	20,00	20,00	4,00	4,00
Rychlost 100 %										
\bar{x}	150,032	149,896	20,038	20,010	4,196	4,040	20,198	20,180	4,618	4,356
s	0,091	0,039	0,020	0,024	0,107	0,013	0,138	0,117	0,078	0,081
u_A	0,0405	0,0176	0,0091	0,0106	0,0479	0,0057	0,0618	0,0525	0,0350	0,0361
MADT	0,032	-0,104	0,038	0,010	0,196	0,040	0,198	0,180	0,618	0,356
Rychlost 200 %										
\bar{x}	150,098	149,876	20,324	20,170	4,368	4,244	20,344	20,212	4,636	4,440
s	0,157	0,021	0,077	0,028	0,043	0,035	0,034	0,026	0,082	0,087
u_A	0,0702	0,0092	0,0342	0,0126	0,0191	0,0156	0,0151	0,0118	0,0366	0,0391
MADT	0,098	-0,124	0,324	0,170	0,368	0,244	0,344	0,212	0,636	0,440
Rychlost 300 %										
\bar{x}	150,066	149,864	20,344	20,280	4,406	4,260	20,632	20,368	4,728	4,470
s	0,010	0,083	0,024	0,024	0,042	0,030	0,066	0,104	0,087	0,143
u_A	0,0046	0,0369	0,0108	0,0106	0,0189	0,0136	0,0296	0,0465	0,0391	0,0639
MADT	0,066	-0,136	0,344	0,280	0,406	0,260	0,632	0,368	0,728	0,470
Rychlost 400 %										
\bar{x}	150,024	149,924	20,414	20,236	4,412	4,188	20,480	20,340	4,784	4,530
s	0,014	0,034	0,030	0,034	0,031	0,021	0,046	0,086	0,120	0,121
u_A	0,0061	0,0154	0,0134	0,0151	0,0137	0,0095	0,0206	0,0387	0,0539	0,0541
MADT	0,024	-0,076	0,414	0,236	0,412	0,188	0,480	0,340	0,784	0,530

V následující tabulce (Tab. 15) jsou vyhodnocená data měření testovacích vzorků pro zkoušku tahem tištěných s teplotou trysky 220 °C. Měření proběhlo pomocí posuvného měřidla.

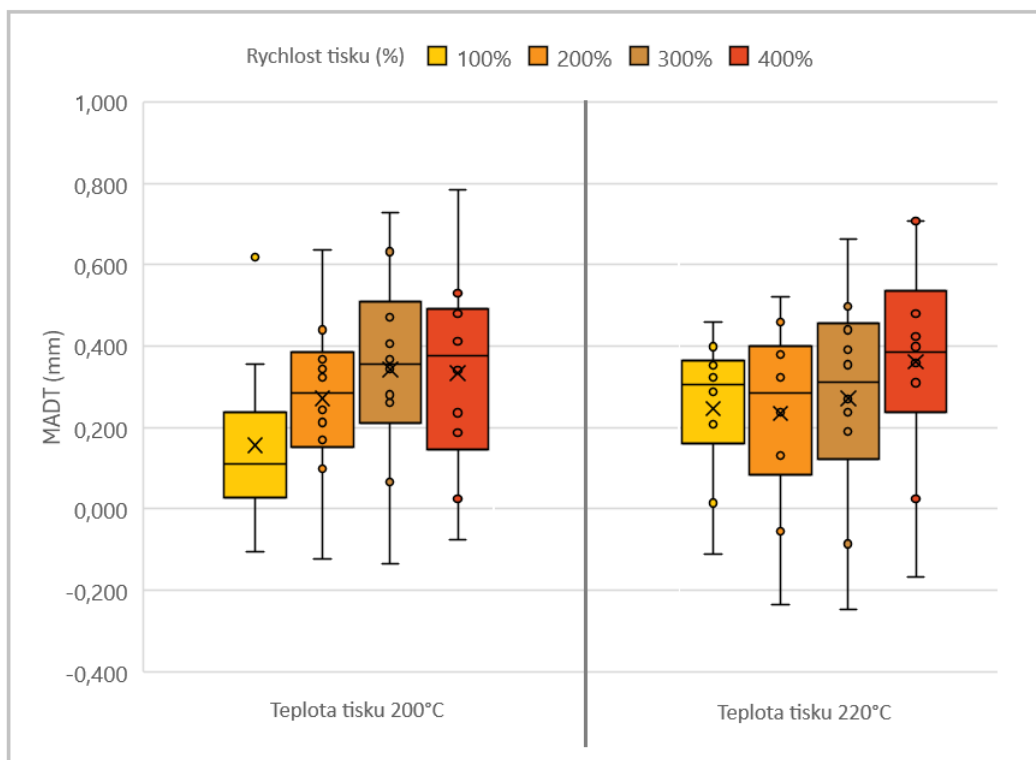
Tabulka 15 Měření posuvným měřidlem tělíska pro zkoušku tahem

Testovací tělesa na tah										
Teplota 220 °C										
Číslo měření	Osa Z		„U podložky“				„Nahoře“			
			Osa X		Osa Y		Osa X		Osa Y	
	Okraj	Střed	Okraj	Střed	Okraj	Střed	Okraj	Střed	Okraj	Střed
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
	Nominální hodnota									
	150,00	150,00	20,00	20,00	4,00	4,00	20,00	20,00	4,00	4,00
Rychlost 100 %										
\bar{x}	150,014	149,888	20,324	20,208	4,352	4,322	20,288	20,212	4,460	4,398
s	0,039	0,035	0,084	0,030	0,062	0,028	0,034	0,017	0,037	0,020
u_A	0,0173	0,0158	0,0374	0,0134	0,0278	0,0125	0,0153	0,0077	0,0167	0,0091
MADT	0,014	-0,112	0,324	0,208	0,352	0,322	0,288	0,212	0,460	0,398
Rychlost 200 %										
\bar{x}	149,944	149,766	20,324	20,238	4,458	4,340	20,380	20,132	4,520	4,246
s	0,019	0,029	0,022	0,036	0,025	0,035	0,050	0,015	0,101	0,054
u_A	0,0083	0,0128	0,0096	0,0161	0,0111	0,0155	0,0223	0,0066	0,0453	0,0241
MADT	-0,056	-0,234	0,324	0,238	0,458	0,340	0,380	0,132	0,520	0,246
Rychlost 300 %										
\bar{x}	149,914	149,754	20,390	20,270	4,498	4,190	20,440	20,238	4,662	4,354
s	0,034	0,049	0,047	0,028	0,017	0,057	0,032	0,016	0,022	0,165
u_A	0,0154	0,0220	0,0210	0,0126	0,0077	0,0256	0,0141	0,0072	0,0100	0,0737
MADT	-0,086	-0,246	0,390	0,270	0,498	0,190	0,440	0,238	0,662	0,354
Rychlost 400 %										
\bar{x}	150,024	149,832	20,424	20,310	4,480	4,358	20,398	20,372	4,708	4,706
s	0,029	0,054	0,015	0,046	0,032	0,017	0,037	0,088	0,037	0,022
u_A	0,0131	0,0241	0,0067	0,0206	0,0141	0,0077	0,0163	0,0392	0,0166	0,0096
MADT	0,024	-0,168	0,424	0,310	0,480	0,358	0,398	0,372	0,708	0,706

Následující dva grafy zobrazují průměrné odchylky rozměrů od nominální hodnoty v závislosti na teplotě a rychlosti tisku.



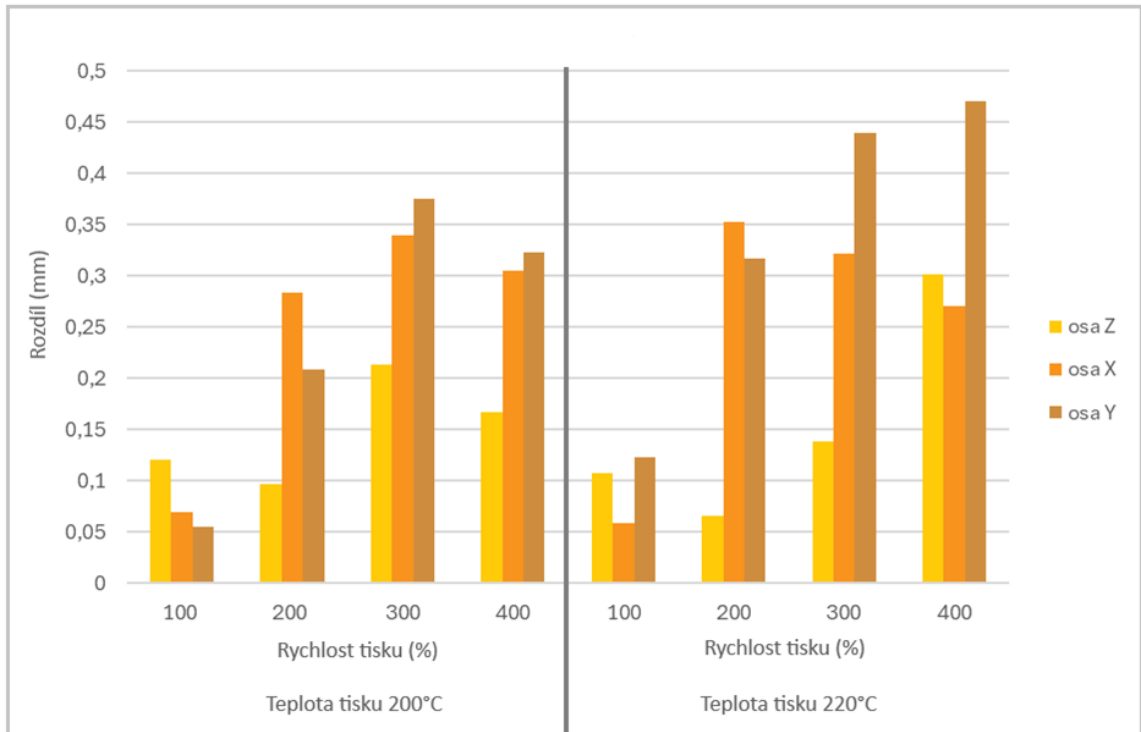
Obrázek 31 Závislost MADT na teplotě a rychlosti u vzorků pro zkoušku vrubové houževnatosti.



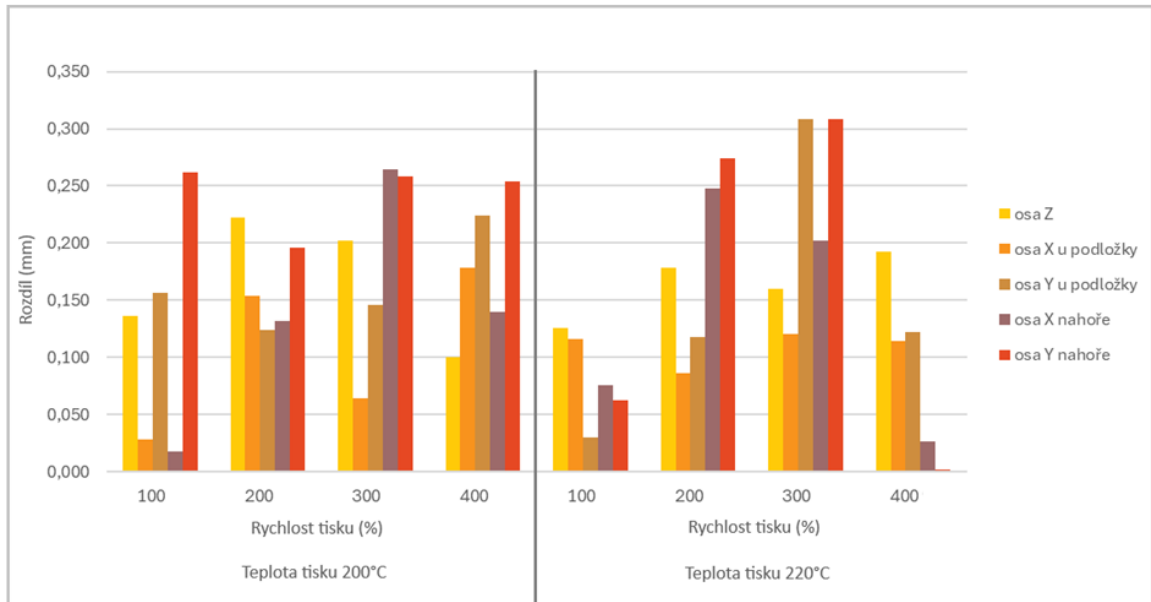
Obrázek 32 Závislost MADT na teplotě a rychlosti u vzorků pro zkoušku tahem

Z porovnání průměrných absolutních odchylek od nominální hodnoty vyplývá, že přesnost tisku se zvyšující se rychlostí klesá. Zvýšená teplota na MADT nemá výrazný vliv. Nejvyšší odchylka byla zaznamenána na vzorcích tištěných při rychlosti 400 %.

Následující dva grafy zobrazují průměrné rozdíly hodnot měřených na okraji a ve středu (Obr. 30, str. 75) vzorků v závislosti na ose, ve které byl vzorek tištěn, rychlosti a teplotě tisku.

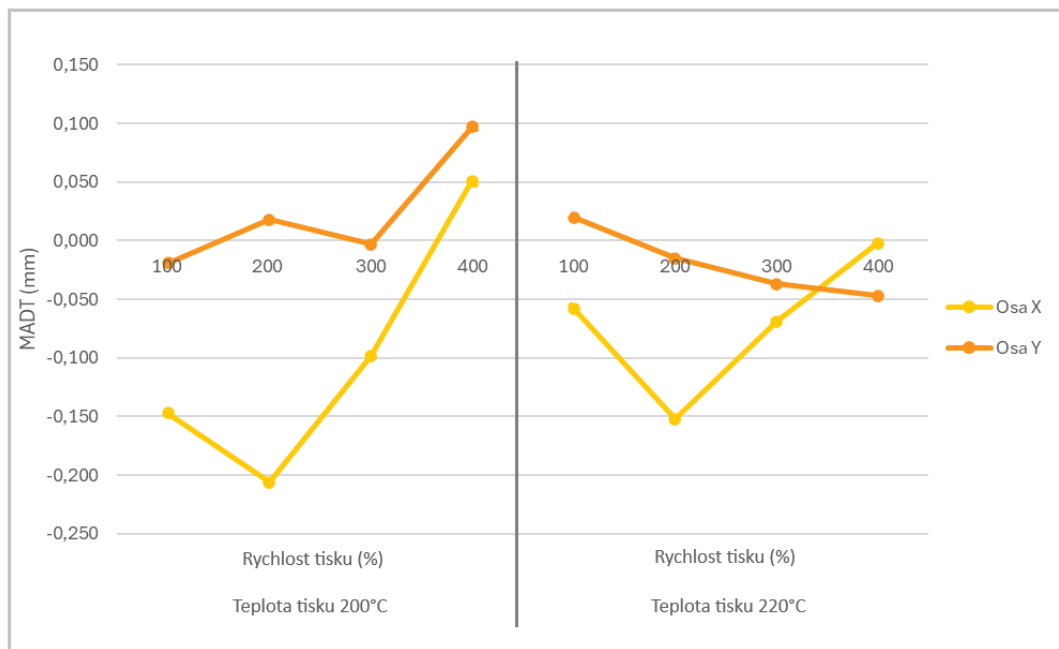


Obrázek 33 Rozdíly hodnot měřených na okraji a ve středu vzorku pro zkoušku vrubové houževnatosti

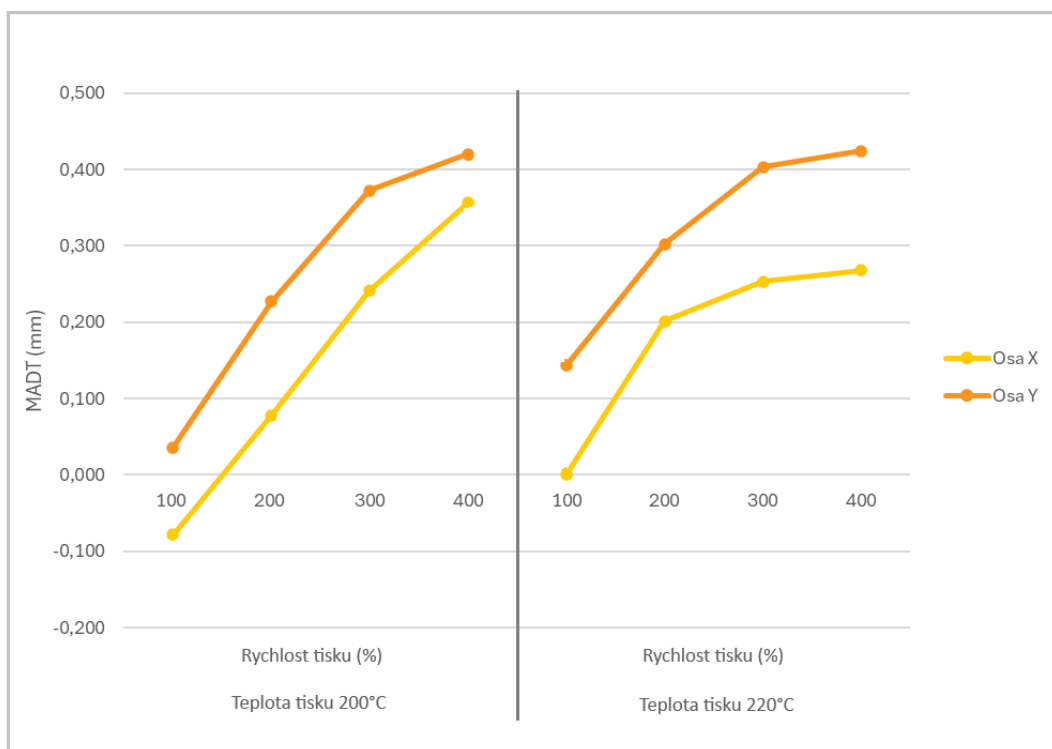


Obrázek 34 Rozdíly hodnot měřených na okraji a ve středu vzorku pro zkoušku tahem Z grafického zobrazení rozdílů hodnot naměřených na okrajích a uprostřed stěn vzorků vyplývá, že nejmenší rozdíl vzniká při rychlosti tisku 100 %. Se zvyšující se rychlostí tisku tento rozdíl narůstá. Tento jev může být způsoben nedostatečnou tuhostí konstrukce tiskárny a smrštěním materiálu.

Následující dva grafy (Obr. 35, 36, str. 83) zobrazují porovnání přesnosti větších a menších rozměrů měřených ve středech a na okraji stěn vzorků pro zkoušku vrubové houževnatosti, vzorky byly při tisku orientovány tak, že větší vzdálenost (55 mm) byla tištěna v ose X a menší vzdálenost (10 mm) v ose Y.



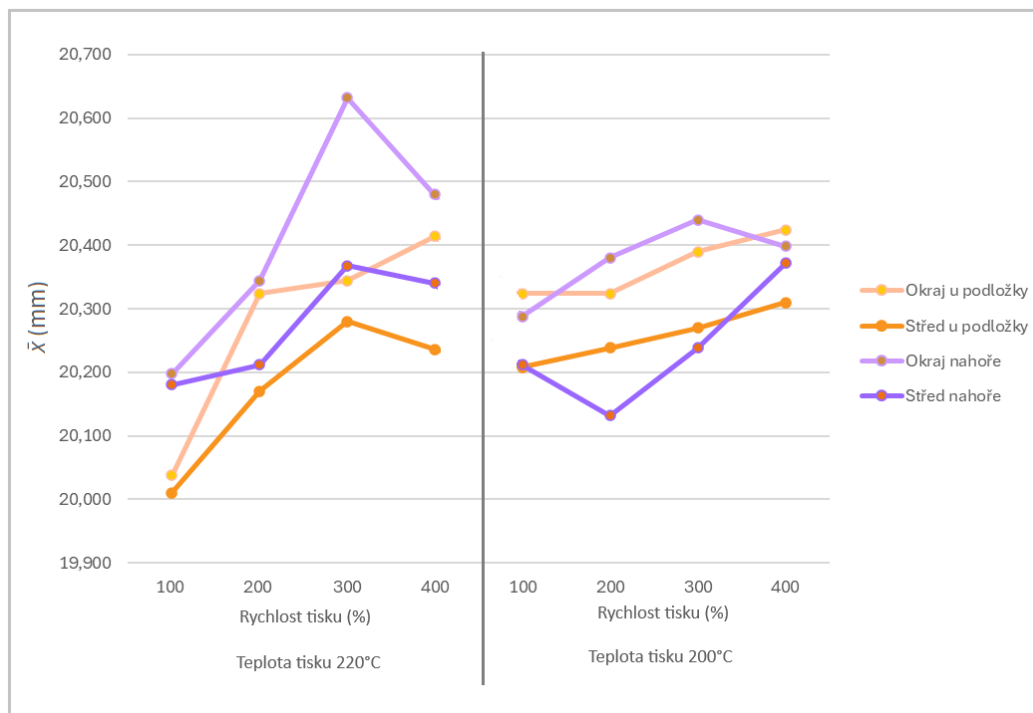
Obrázek 35 Porovnání přesnosti větších a menších rozměrů měřených ve středech stěn



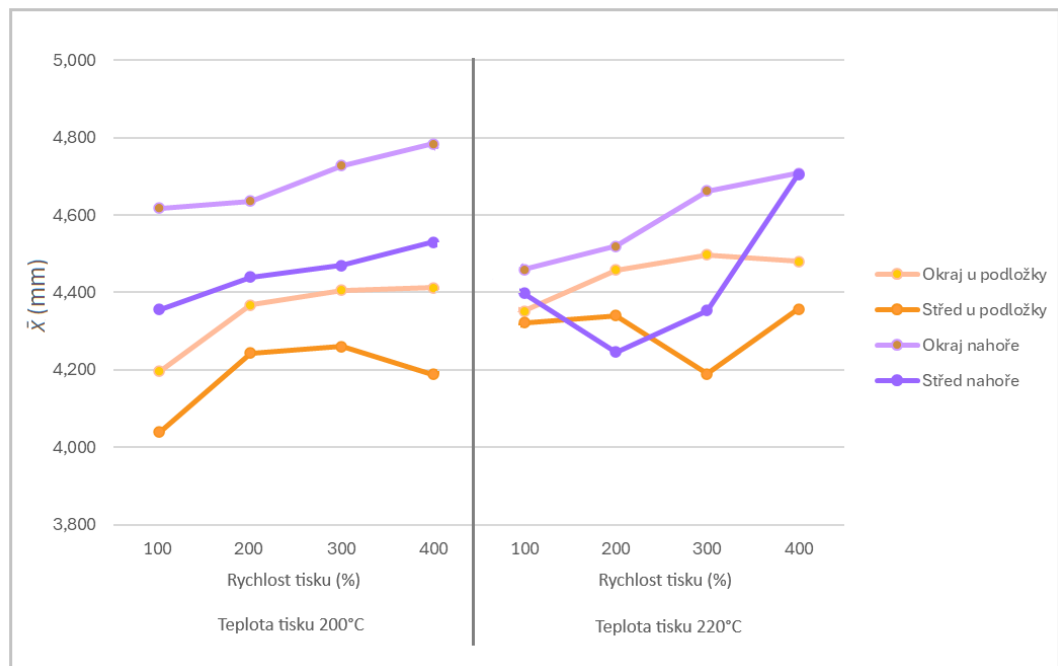
Obrázek 36 Porovnání přesnosti větších a menších rozměrů měřených na okrajích stěn

Z naměřených hodnot vyplývá, že vzorky byly přesněji vytištěny v ose X. Tento rozdíl může být zapříčiněn vyšším rozměrem tělesa v této ose, anebo rozdílem v konstrukci jednotlivých os na tiskárně. Tato otázka by mohla být předmětem dalšího zkoumání.

Následující dva grafy zobrazují porovnání přesnosti rozměrů vzorků „u podložky“ a „nahore“. Jedná se o testovací tělesa pro zkoušku tahem, jenž byly tištěny nastojato, což mohlo díky jejich vypružení do strany ovlivnit přesnost tisku.



Obrázek 37 Porovnání přesnosti výtisků „u podložky“ a „nahore“ v ose X



Obrázek 38 Porovnání přesnosti výtisků „u podložky“ a „nahore“ v ose Y

Z naměřených dat vyplývá že při teplotě tisku 200 °C je nepřesnost „nahore“ vyšší než „u podložky“. Tato nepřesnost stoupá s narůstající rychlostí. Při teplotě tisku 220 °C tento rozdíl není tak patrný.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce je zaměřená na zkoumání vlivu technologických podmínek na mechanické vlastnosti objektů vyrobených pomocí 3D tiskárny Creality CR-10. Výzkum byl proveden s cílem optimalizovat parametry tisku tak, aby bylo dosaženo nejlepších možných vlastností tisknutých vzorků. Hlavními zkoumanými parametry byly teplota trysky a rychlost tisku, jejichž různé kombinace byly testovány za účelem zjištění jejich efektu na pevnost v tahu a vrubovou houževnatost.

Experimentální výsledky ukázaly, že rychlost tisku má značný vliv na mechanické vlastnosti vytištěných vzorků. Bylo zjištěno, že při rychlosti tisku nastavené na 200 % dochází k výraznému zkrácení doby tisku, což je výhodné pro aplikace, kde je časová efektivita prioritou. S růstem rychlosti tisku také obecně docházelo ke zvýšení pevnosti v tahu. Tomu může přispět také zvýšením teploty trysky, to ovšem může díky smrštění materiálu způsobit snížení přesnosti tisku.

Z hlediska přesnosti rozměrů bylo optimální nastavení rychlosti tisku na nižší hodnoty, specificky 100 %. Toto nastavení vedlo k produkci vzorků s vyšší přesností a lepšími estetickými vlastnostmi, což je vhodné pro výrobu dílů, u kterých jsou kladeny vysoké nároky na rozměry a vizuální kvalitu. Na druhé straně pro aplikace vyžadující rychlejší výrobu a kde jsou požadavky na mechanickou odolnost v tahu vyšší, lze na úkor přesnosti doporučit zvýšení rychlosti tisku.

Na základě získaných dat bylo navrženo, že pro dosažení lehce vyšší pevnosti při vyšších rychlostech tisku je efektivní zvýšení teploty trysky. Tento přístup umožňuje efektivně balancovat mezi časem tisku a mechanickými vlastnostmi, poskytující tím široký rozsah aplikací pro 3D tisk na tiskárně Creality CR-10.

Výzkum tedy odhalil, že i malé změny v technologických podmínkách mohou mít výrazný dopad na vlastnosti tisknutých objektů. Důležité je také poznamenat, že pro každý typ materiálu mohou být optimální parametry různé, což vyžaduje další experimentální studie a testování.

Tato práce přispěla k lepšímu pochopení dynamiky 3D tisku a poskytla základní směrnice pro optimalizaci tiskových podmínek, které by mohly být využity v praxi pro zlepšení kvality a efektivity 3D tisku. Je však nezbytné provádět další výzkum s dalšími typy materiálů a zařízení, aby bylo možné tyto výsledky generalizovat a uplatnit na širší škálu aplikací.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KELLY, Brett E., et al. Volumetric additive manufacturing via tomographic reconstruction. *Sciens*, 2019, 363.6431: 1075-1079.
- [2] BORELL, David, et al. Materials for additive manufacturing. *CIRP annals*, 2017, 66.2: 659-681.
- [3] KLOSKI, Liza a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem. 1. vydání. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 9788025148761.*
- [4] BIKAS, Harry; STAVROPOULOS, Panagiotis; CHRYSSOLOURIS, George. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83.1-4: 389-405.
- [5] CALIGNANO, Flaviana, et al. Overview on additive manufacturing technologies. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105.4: 593-612.
- [6] LIU, Zengguang, et al. A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102: 2877-2889.
- [7] POPOV, Vladimir V., et al. Design and 3D-printing of titanium bone implants: brief review of approach and clinical cases. *Biomedical engineering letters*, 2018, 8: 337-344.
- [8] GUECHE, Yanis A., et al. Selective laser sintering (SLS), a new chapter in the production of solid oral forms (SOFs) by 3D printing. *Pharmaceutics*, 2021, 13.8: 1212.
- [9] ZIAEE, Mohsen; CRANE, Nathan B. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 2019, 28: 781-801.
- [10] KAFLE, Abishek, et al. 3D/4D Printing of polymers: Fused deposition modelling (FDM), selective laser sintering (SLS), and stereolithography (SLA). *Polymers*, 2021, 13.18: 3101.
- [11] MAINES, Erin M., et al. Sustainable advances in SLA/DLP 3D printing materials and processes. *Green Chemistry*, 2021, 23.18: 6863-6897.
- [12] DIZON, John Ryan C., et al. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive manufacturing*, 2018, 20: 44-67.
- [13] NGO, Tuan D., et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143: 172-196.
- [14] HEHR, Adam; NORFOLK, Mark. A comprehensive review of ultrasonic additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 2019, 26.3: 445-458.
- [15] LOCKER, Anatol. *Petg-filament-3d-printing. All3dp.com [online]. 2019 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://m.all3dp.com/1/petg-filament-3d-printing/>.*
- [16] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.*
- [17] İnanç Şencan, Sema Alaçam, Sinan Mert Şener. *Designing Printers that Print onto Spherical Geometries: A Lo-Fi Prototyping Case [PDF]. Istanbul Technical*

- University, Turkey, 2021. Dostupné také z: https://papers.cumincad.org/data/works/att/sigradi2021_199.pdf
- [18] WICKRAMASINGHE, Sachini; DO, Truong; TRAN, Phuong. *FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments*. *Polymers*, 2020, 12.7: 1529.
- [19] EL FAZANI, Hayat; COIL, Jason; LALIBERTÉ, Jeremy. *Fracture Surface Morphology for Polymer Additive Manufactured Parts*.
- [20] LEE, Ah Lam; HAN, Hyunsook. *A review of parametric clothing pattern CAD software methodology*. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2024.
- [21] POČÍTAČEM PODPOROVANÉ SYSTÉMY - CA SYSTÉMY. In: *Docplayer [online]*. Praha: Denis Bárta, 2017 [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/2298475-Pocitacem-podporovane-systemy-ca-systemy.html>.
- [22] RUSIŇÁK, Miroslav. *UGS Solid Edge verze 20: učebnice*. Vyd. 1. Praha: Miroslav Rusiňák, 2007. UGS velocity series. ISBN 978-80-239-9382-0.
- [23] ŠLJIVIC, M., et al. *Comparing the accuracy of 3D slicer software in printed enduse parts*. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019. p. 012082.
- [24] KERR, Tyler. *Advanced Slicer Settings*. *3D Printing: Introduction to Accessible, Affordable Desktop 3D Printing*, 2022, 79-120.
- [25] AVILA, Fernando; PUERTAS, Esther; GALLEGO, Rafael. *Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review*. *Construction and Building Materials*, 2021, 270: 121435.
- [26] FORSTER, Aaron M.; FORSTER, Aaron M. *Materials testing standards for additive manufacturing of polymer materials: state of the art and standards applicability*. 2015.
- [27] MATCA. *Zkouška tahem [online]*. 2024 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/zkouska-tahem/>
- [28] , Dlouhý, Chlup, Hadraba. *Houževnatost: Základní pojmy (tranzitní lomové chování ocelí, teplotní závislost pevnostních vlastností, fraktografie) [PDF]*. 2010. Dostupné také z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/zkouska-tahem/>
- [29] GEORGE, Elizabeth, et al. *Measuring and establishing the accuracy and reproducibility of 3D printed medical models*. *Radiographics*, 2017, 37.5: 1424-1450.
- [30] *Třída 6406 - Zkoušení plastů a výrobků z plastů*. *Shop.normy.biz [online]*. [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/trida/6406>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

FDM (Fused Deposition Modeling)

UV (Ultra Violet)

CAD (Computer-Aided Design)

SLS (Selective Laser Sintering)

SLM (Selective Laser Melting)

EBM (Electron Beam Melting)

LOM (Laminated Object Manufacturing)

SL (Stereolithography)

TPU (Thermoplastic Polyurethane)

PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol)

PLA (Polylactic Acid)

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate)

HIPS (High Impact Polystyrene)

PVA (Polyvinyl Alcohol)

PET (Polyethylene Terephthalate)

PEEK (Polyether Ether Ketone)

PEI (Polyetherimide)

PMMA (Polymethyl Methacrylate)

W_{break} práce spotřebovaná pro přetržení ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)

W_{Fmax} spotřebovaná energie pro dosažení maximální síly ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)

ΔF změna působící síly (N)

ΔF_{max} poměrné prodloužení na maximální síle (%)

$\Delta \varepsilon$ poměrné prodloužení (%)

$\Delta \sigma$ změna napětí (MPa)

σ_{mt} mez pevnosti v tahu (MPa)

s standardní odchylka

u_A nejistota typu A

MADT (Mean Absolute Deviation from the Trend)

\bar{x} průměrná hodnota

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Metoda SLS.....	13
Obrázek 2 Metoda EBM.....	14
Obrázek 3 Metoda SLS.....	16
Obrázek 4 Metoda PolyJet.....	18
Obrázek 5 Metoda LOM.....	19
Obrázek 6 Metoda FDM.....	21
Obrázek 7 Materiál PLA [15].....	25
Obrázek 8 Konstrukce tiskáren [17].....	28
Obrázek 9 Tiskárna Creality CR-10 [19].....	31
Obrázek 10 Části tiskárny [19].....	33
Obrázek 11 Diagram zkoušky tahem [27].....	37
Obrázek 12 Charpyho zkouška [28].....	38
Obrázek 13 Zobrazení koule ve formátu STL s různou hustotou sítě.....	46
Obrázek 14 Nastavení vrstev pro kouli o průměru 20 mm.....	47
Obrázek 15 Vzory výplní s hustotou 30 %.....	48
Obrázek 16 Podpůrná struktura.....	49
Obrázek 17 Nastavení výplně.....	51
Obrázek 18 Rozložení součástí.....	52
Obrázek 19 Odstranění nežádoucích vláken.....	56
Obrázek 20 Zařízení GOM ATOS II TripleScan MV 320.....	57
Obrázek 21 Posuvné měřidlo.....	59
Obrázek 22 Zařízení Zwick Materialprüfung 1456.....	60
Obrázek 23 Testovací těleso na zkoušku tahem.....	62
Obrázek 24 Zařízení Zwick Roell HIT25P.....	64
Obrázek 25 Vzorek pro zkoušku vrubové houževnatosti.....	65
Obrázek 26 Závislost σ_{mt} na rychlosti a teplotě tisku.....	69
Obrázek 27 Absorbovaná energie v závislosti na rychlosti tisku.....	72
Obrázek 28 Absorbovaná energie v závislosti na rychlosti a teplotě tisku.....	72
Obrázek 29 Ukázka z měřicího reportu.....	73
Obrázek 30 Měření rozměrů.....	75
Obrázek 31 Závislost MADT na teplotě a rychlosti u vzorků pro zkoušku vrubové houževnatosti.....	80
Obrázek 32 Závislost MADT na teplotě a rychlosti u vzorků pro zkoušku tahem.....	80

Obrázek 33 Rozdíly hodnot měřených na okraji a ve středu vzorku pro zkoušku vrubové houževnatosti	81
Obrázek 34 Rozdíly hodnot měřených na okraji a ve středu vzorku pro zkoušku tahem ...	82
Obrázek 35 Porovnání přesnosti větších a menších rozměrů měřených ve středech stěn ...	83
Obrázek 36 Porovnání přesnosti větších a menších rozměrů měřených na okrajích stěn ...	83
Obrázek 37 Porovnání přesnosti výtisků „u podložky“ a „nahore“ v ose X	84
Obrázek 38 Porovnání přesnosti výtisků „u podložky“ a „nahore“ v ose Y	85

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Kombinace rychlostí a teplot	45
Tabulka 2 Nastavení pro zkušební tělesa a vzorky	50
Tabulka 3 Nastavení pro objekt k 3D měření	53
Tabulka 4 Časy tisku.....	55
Tabulka 5 Parametry zařízení Zwick Materialprüfung 1456.....	61
Tabulka 6 Výpočetní parametry	62
Tabulka 7 Technické parametry zařízení Zwick Roell HIT25P	64
Tabulka 8 Výsledky tahové zkoušky pro teplotu 200 °C	67
Tabulka 9 Výsledky tahové zkoušky pro teplotu 220 °C	68
Tabulka 10 Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro teplotu 200 °C.....	70
Tabulka 11 Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro teplotu 220 °C.....	71
Tabulka 12 Měření posuvným měřidlem vzorky na vrubovou houževnatost	76
Tabulka 13 Měření posuvným měřidlem vzorky na vrubovou houževnatost	77
Tabulka 14 Měření posuvným měřidlem tělíška pro zkoušku tahem	78
Tabulka 15 Měření posuvným měřidlem tělíška pro zkoušku tahem	79

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: Měření zkoušky tahem

PŘÍLOHA P II: Měření zkoušky vrubové houževnatosti

PŘÍLOHA P III: Měření posuvným měřidlem

PŘÍLOHA P IV: Report 3D Měření