

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2022

**MICHAL
VĚTROVEC**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie



Porovnání nástrojů vyráběných 3D tiskem

Comparison of tools made by 3D printing

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Michal Větrovec

Vedoucí práce: Ing. František Tatíček, Ph.D.

Konzultant práce: Ing. Jan Havelka

Konzultant práce: Ing. Vít Novák

2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Větrovec** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **466629**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Porovnání nástrojů vyráběných 3d tiskem

Název diplomové práce anglicky:

Comparison of tools made by 3D printing

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznámení s problematikou výroby výtisků a metodami 3D tisku
- 2) Návrh konstrukčních řešení pro ověření pevnosti nástroje vyrobených 3d tiskem
- 3) Realizace zkoušek a ověření vlastností navržených řešení
- 4) Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN ISO 527-1
ASM Handbook 14B
Základy 3D tisku- <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. František Tatíček, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Jan Havelka ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2022**

Ing. František Tatíček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Františkovi Tatíčkoví, Ph.D. za odborné vedení a připomínky při zpracovávání této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat inženýrům Novákovi a Havelkovi za odborné konzultace a asistenci při provádění experimentu.

Nakonec bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu v této dlouhé studijní etapě mého života. Snad jim jejich morální a finanční podporu budu někdy moci oplatit.

Autor:	Bc. Michal Větrovec
Název diplomové práce:	Porovnání nástrojů vyráběných 3D tiskem
Rozsah práce:	104 stran, 105 obrázků, 28 tabulek
Rok vyhotovení:	2022
Univerzita:	České vysoké učení technické v Praze – fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí diplomové práce:	Ing. František Tatíček, Ph.D.
Konzultanti diplomové práce:	Ing. Jan Havelka a Ing. Vít Novák
Klíčová slova:	3D tisk, aditivní výroba konvenčně vyráběných nástrojů, zkoušky mechanických vlastností, orientace vzorků na tiskové podložce, typ a hustota infillu, zkoušky tlakem, tahem, tříbodovým ohybem a ve vzpěru, materiál PLA

Anotace:

Tato diplomová práce si klade za cíl experimentálně ověřit mechanické vlastnosti nástrojů vyrobených na FFF tiskárně značky Creality. Jedná se o upravenou 3D tiskárnu ENDER 3 PRO. V teoretické části této práce je provedeno seznámení s oblastí 3D tisku. Následně je provedena rešerše současného stavu aditivně vyráběných (3D tištěných) lisovacích a ohýbacích nástrojů. Dále se objevuje zmínka o použitém systému ARAMIS. V experimentální části byly navrženy zkušební vzorky pro ověření základních mechanických vlastností použitého filamentu. Na těchto vzorkách byly provedeny zkoušky tahem, tlakem, tříbodovým ohybem a ve vzpěru. Podle získaných poznatků byly vhodně navrženy nástroje. Tyto nástroje byly následně použity pro ohýbání plechů až do destrukce daného nástroje.

Author:	Bc. Michal Větrovec
Title of diploma thesis:	Comparison of tools made by 3D printing
Extent:	104 pages, 105 figures, 28 tables
Academic year:	2022
University:	Czech Technical University in Prague – Faculty of mechanical engineering
Department:	Department of Manufacturing Technology
Supervisor:	Ing. František Tatíček, Ph.D.
Consultant:	Ing. Jan Havelka and Ing. Vít Novák
Key words:	3D printing, additive manufacturing of conventionally manufactured tools, mechanical properties testing, orientation of samples on the printing substrate, infill type and density, compression, tensile, three-point bending and buckling tests, PLA material

Annotation:

The aim of this thesis is to experimentally verify the mechanical properties of tools produced on Creality's FFF printer. It is a modified ENDER 3 PRO 3D printer. In the theoretical part of this thesis an introduction to the field of 3D printing is made. Subsequently, a research on the current state of the art of additively manufactured (3D printed) pressing and bending tools is carried out. Furthermore, mention is made of the ARAMIS system used. In the experimental part, test specimens were designed to verify the basic mechanical properties of the filament used. Tensile, compression, three-point bending and buckling tests were performed on these specimens. According to the findings obtained, tools were suitably designed. These tools were then used for bending the sheets until the destruction of the tool.

Obsah	
1	Úvod..... - 1 -
2	Metoda FFF..... - 2 -
2.1	FFF tiskárna - 2 -
2.1.1	Kartézská tiskárna - 2 -
2.2	Princip 3D tisku - 4 -
3	Proces 3D tisku - 5 -
3.1	3D model..... - 5 -
3.2	Slicer - 5 -
3.3	Tisk - 5 -
4	Vliv parametrů tisku - 6 -
4.1	Infill - 6 -
4.1.1	Typ infillu..... - 6 -
4.1.2	Porovnání rychlosti tisku a množství materiálu pro jednotlivé typy infillu... - 7 -
4.1.3	Hustota infillu..... - 8 -
4.2	Rychlost tisku - 8 -
4.3	Teplota tisku - 9 -
4.4	Orientace dílu na tiskové podložce - 10 -
4.5	Výška vrstvy - 11 -
4.6	Počet perimetrů - 11 -
4.7	Materiál..... - 11 -
4.7.1	Kyselina polyléčná – PLA - 12 -
5	Mechanické vlastnosti materiálu - 14 -
5.1	Zkouška tahem..... - 16 -
5.2	Zkouška tříbodovým ohybem - 16 -
5.3	Zkouška tlakem..... - 17 -
5.4	Zkouška vzpěru..... - 17 -
6	Systém ARAMIS - 18 -
<hr/>	
Porovnání nástrojů vyráběných 3D tiskem	
	v

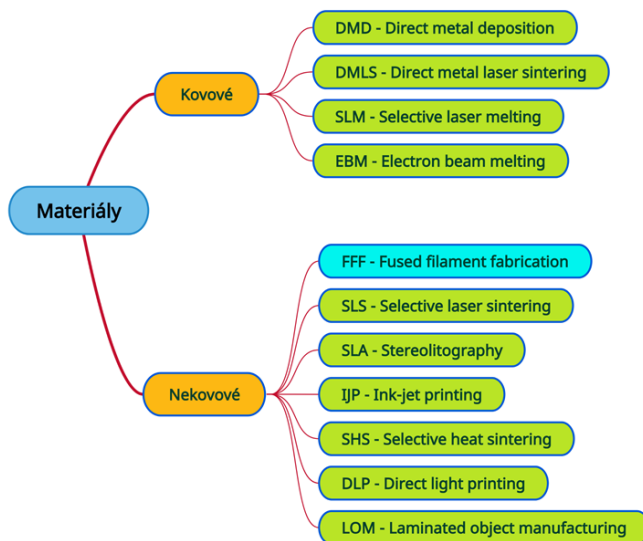
6.1	Digitální korelace obrazu – DIC	- 19 -
6.1.1	Dvourozměrná korelace obrazu (2D)	- 19 -
7	Rešerše současného stavu v oblasti tvářecích operací prováděných nástroji vyrobených 3D tiskem.....	- 20 -
7.1	Výroba a výkonnost 3D tištěných plastových nástrojů pro ohýbání vzduchem. -	20 -
7.2	Ohýbání plechů pomocí plastových nástrojů vyrobených na 3D tiskárně.....	- 21 -
7.3	Ohýbání plechů pomocí flexibilních nástrojů.....	- 23 -
7.4	Tváření plechů pomocí aditivně vyráběných polymerních nástrojů.....	- 24 -
7.5	3D tisk pro usnadnění výroby flexibilního tváření plechů	- 26 -
8	Zkoušky mechanických vlastností	- 28 -
8.1	Zkouška tlakem.....	- 29 -
8.1.1	Návrh zkušebního tělesa.....	- 29 -
8.1.2	Návrh parametrů.....	- 29 -
8.1.3	Realizace experimentu	- 33 -
8.2	Zkouška tahem.....	- 41 -
8.2.1	Návrh zkušebního tělesa.....	- 41 -
8.2.2	Návrh parametrů.....	- 41 -
8.2.3	Realizace experimentu	- 42 -
8.3	Zkouška tříbodovým ohybem	- 51 -
8.3.1	Návrh zkušebního tělesa.....	- 51 -
8.3.2	Návrh parametrů.....	- 51 -
8.3.3	Realizace experimentu	- 52 -
8.4	Zkouška vzpěru.....	- 59 -
8.4.1	Návrh zkušebního tělesa.....	- 59 -
8.4.2	Návrh parametrů.....	- 59 -
8.4.3	Realizace experimentu	- 60 -
8.5	Zhodnocení mechanických zkoušek	- 67 -

9	Nástroje	- 68 -
9.1	Návrh geometrie	- 68 -
9.1.1	Nástroj č. 1	- 68 -
9.1.2	Nástroj č. 2	- 69 -
9.1.3	Nástroj č. 3	- 69 -
9.2	Návrh parametrů tisku	- 70 -
9.2.2	Nástroj č. 1	- 71 -
9.2.3	Nástroj č. 2	- 72 -
9.2.5	Nástroj č. 3	- 73 -
9.3	Návrh upnutí	- 74 -
9.4	Realizace zkoušky	- 75 -
9.4.1	Nástroj č. 1	- 77 -
9.4.2	Nástroj č. 2	- 78 -
9.4.3	Nástroj č. 3	- 79 -
9.5	Výsledky	- 80 -
9.5.1	Nástroj č. 1	- 80 -
9.5.2	Nástroj č. 2	- 83 -
9.5.3	Nástroj č. 3	- 86 -
9.5.4	Zhodnocení výsledků zkoušek nástrojů	- 89 -
10	Závěr	- 90 -
	Seznam použité literatury	- 93 -
	Seznam obrázků	- 100 -
	Seznam tabulek	- 103 -
	Seznam použitých programů	- 104 -

1 Úvod

Konvenční výrobní technologie (obrábění, tváření) pracují s polotovarem, ze kterého následně odebírají třísku (obrábění), popřípadě za využití plastické deformace mění jeho tvar (tváření). Další konvenční výrobní technologie (slévání, vstřikování plastů) využívají formu, která má dutinu ve tvaru požadovaného výrobku, a do které je následně přiváděn roztavený materiál (kov, plast, ...). V současné době je kladen důraz především na levnou, rychlou, přesnou a ekologickou výrobu. Z těchto důvodů si do spousty odvětví našly cestu tzv. aditivní technologie (neboli 3D tisk). [1; 2]

Aditivní technologie vytváří trojrozměrný objekt z digitálních dat, přičemž samotný objekt vzniká skládáním 2D vrstev na sebe. Těchto technologií dnes existuje celá řada a jejich rozdělení je uvedeno na Obr. 1. Pro tuto práci je stěžejní technologie FFF (fused filament fabrication) ze skupiny nekovových materiálů, která je podrobněji popsána v další části práce. [1; 3; 4]



Obr. 1 - Rozdělení aditivních technologií podle použitého materiálu [3]

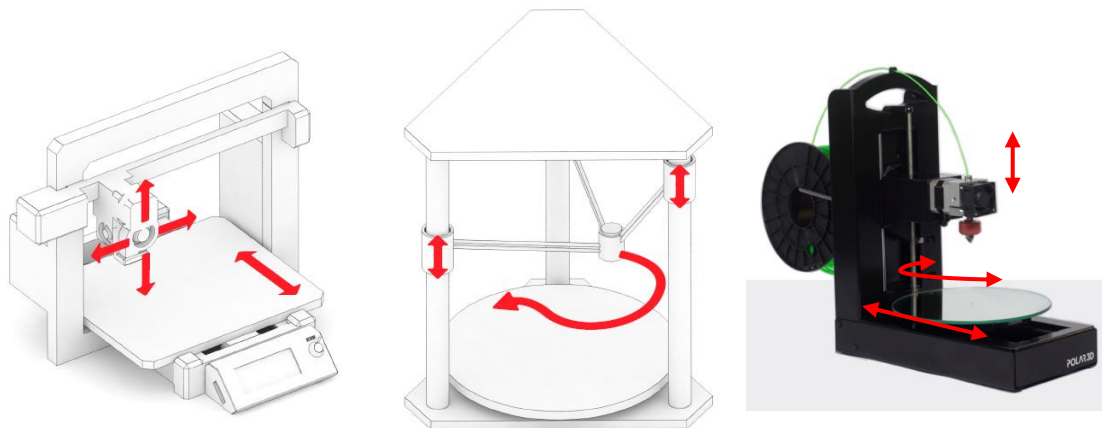
Cílem této práce je provést rešerši aditivní technologie FFF, zejména z hlediska nastavení parametrů tisku. Konkrétně se jedná o parametry, které mají značný vliv na mechanické vlastnosti finálního výrobku. Dále je provedeno seznámení se s problematikou výroby výlisků pomocí aditivně vyrobených nástrojů. V experimentální části této práce jsou využity poznatky nabyté rešerší pro ověření mechanických vlastností použitého materiálu (PLA). Na základně zjištěných mechanických vlastností jsou navrženy a vyrobeny ohýbací nástroje. Pro nástroje je dále navržen a vyroben systém upínání. Ohýbací nástroje jsou následně vystaveny zkoušce, která spočívá v ohýbání plechů o různé tloušťce do doby, než dojde k destrukci nástroje.

2 Metoda FFF

FFF neboli fused filament fabrication je technologie 3D tisku vyvinuta tvůrci projektu RepRap vzniklého v roce 2005. [5]

2.1 FFF tiskárna

Jedná se o stroj sloužící pro aditivní výrobu součástí metodou FFF. Tiskárny je možné rozdělit podle pohybu v trojrozměrném prostoru na kartézské, delta a polar. Příklady těchto tiskáren jsou zobrazeny na Obr. 2. Pro účely této práce je dále popsána tiskárna kartézská. [6]



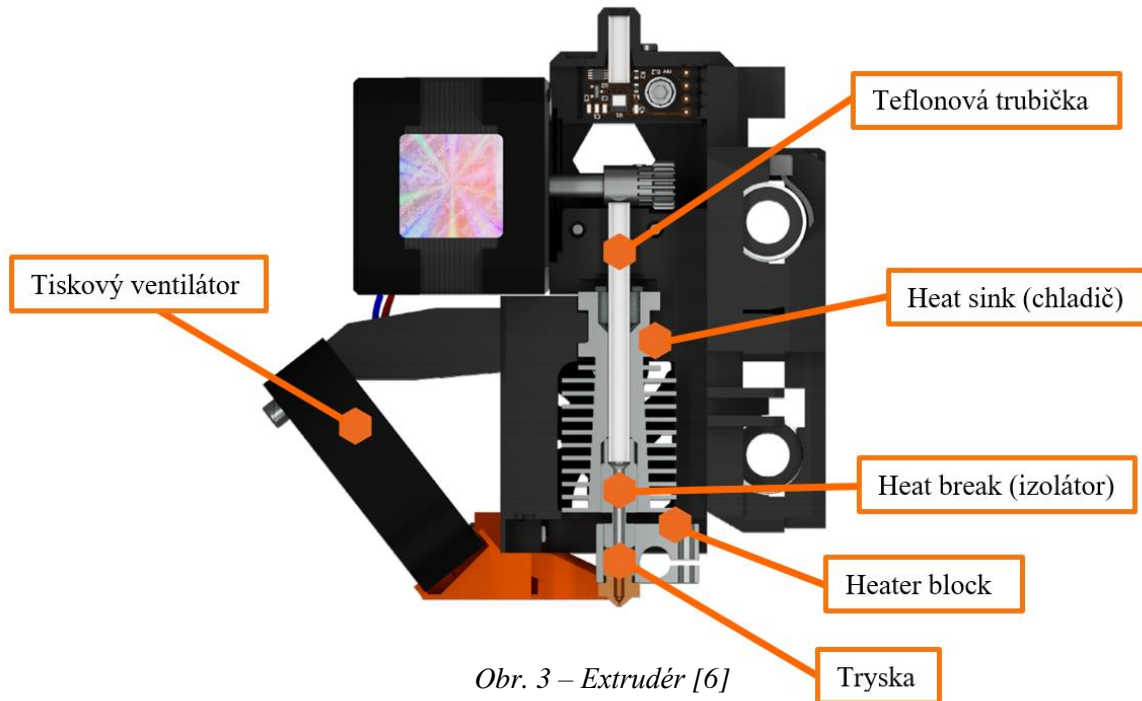
Obr. 2 - Rozdělení 3D tiskáren (zleva: kartézská, delta, polar) [6; 7]

2.1.1 Kartézská tiskárna

Tato tiskárna se pohybuje ve třech lineárních osách. Tisková hlava (extrudér) se pohybuje v osách X, Z a tisková podložka (heat bed) v ose Y. [6]

Extruder

Do extruderu zobrazeného na Obr. 3 vstupuje filament skrz teflonovou trubičku a vychází na opačném konci tryskou. Na trysce se nachází tzv. heater block, který je vyroben z tepelně vodivého materiálu (nejčastěji hliníku). Uvnitř se nachází elektrické topné těleso a termistor. Na vstupu je filament v pevném stavu a při pokojové teplotě. Aby tomu tak zůstalo, je již zmíněná teflonová trubička osazena chladičem (tzv. heat sink) a mezi ní a tryskou je vložen izolátor (tzv. heat break). Pro maximalizaci chladičícího účinku bývá heat sink osazen ventilátorem. [6]



Obr. 3 – Extrudér [6]

Vyhřívaná podložka

Na tiskové podložce vzniká tisknutá součást (výtisk). Aby nedocházelo ke kroucení výtisku, je tato podložka vyhřívána (pro užší teplotní pole mezi výtiskem a podložkou). Na samotné podložce může být umístěna například skleněná tabule pro lepší manipulaci s výtisky. [6; 8]

Rám

Výsledná kvalita tisku je dána zejména tuhostí a přesným zpracováním nosné konstrukce samotné 3D tiskárny (rámem). Rám bývá vyroben zejména z hliníkových profilů (u běžně dostupných tiskáren pro domácí použití). [6]

Krokové motory

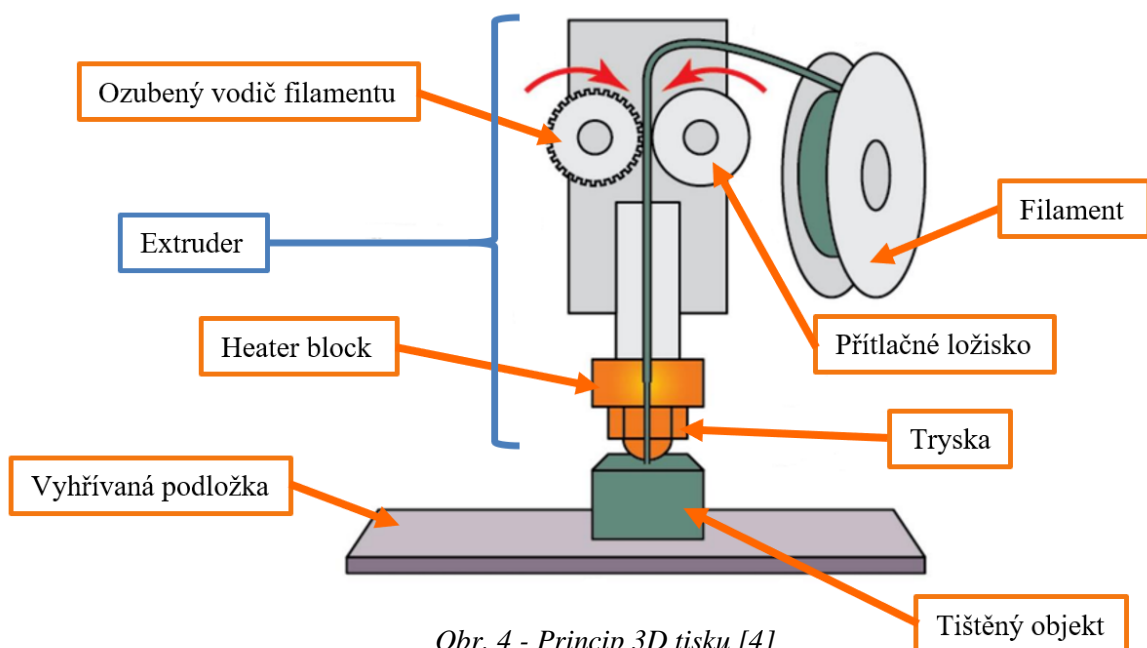
O mechanický pohyb příslušných částí tiskárny se starají krokové motory. Jmenovitě se jedná o pohyb tiskové podložky, pohyb extrudéru a o podávání filamentu do extrudéru. [6]

Řídící jednotka

„Mozkem“ 3D tiskárny je řídicí jednotka. Ta má za úkol číst a zpracovávat vstupní data, která jsou ve formátu textového souboru (tzv. G-code). Tato data udávají pohyb všech krokových motorů a nastavují nahřívání trysky a podložky. [6]

2.2 Princip 3D tisku

Princip samotného 3D tisku je zobrazen na Obr. 4. V horní části tiskárny je umístěn zásobník filamentu ve formě struny. Filament vstupuje do teflonové trubičky v extruderu, následně je ozubeným vodičem veden do části zvané heater block, kde dochází vlivem vysoké teploty k natavení. Roztavený filament je tryskou kladen na tiskovou podložku. Extruder v osách X, Y vytváří první řez tisknuté součásti. Jakmile je první řez hotový, posune se extrudér v ose Z o nastavenou výšku vrstvy a začne tvořit další řez. Toto se opakuje do doby, než je vytisknutá celá součást. [6; 8; 9; 10]



Obr. 4 - Princip 3D tisku [4]

3 Proces 3D tisku

Proces 3D tisku se skládá ze tří základních kroků, které budou v rámci této kapitoly uvedeny a blíže popsány. [6]

3.1 3D model

Prvním krokem samotného 3D tisku je obstarání 3D modelu. Jsou v zásadě tři možnosti, jak takový model získat. První možností je stáhnout model ze spousty databází na internetu. Druhou možností je využití 3D skeneru a existující objekt naskenovat. Poslední možností, pro technickou praxi nejdůležitější, je 3D model vytvořit v jednom z modelovacích softwarů. Velkou výhodou je možnost využít jakýkoliv modelovací software (SolidWorks, Inventor, CATIA, ...), pokud umí soubor převést do formátů STL, OBJ, 3MF nebo AMF. [6]

3.2 Slicer

Existuje více druhů slicerů, jako například Simplify3D, Cura a PrusaSlicer. Slicer je typ programu, který převede 3D model na textový soubor ve formátu G-code. V praxi je 3D objekt „rozřezán“ na tenké vrstvy, ve kterých jsou pro extruder vytvořeny cesty, po kterých se následně bude pohybovat. Dále je textový soubor doplněn o teploty trysky a podložky, chlazení, a další data potřebná pro samotný tisk. Ve sliceru je také určena orientace dílu na tiskové podložce, použití podpor, a je zvolna hustota a typ infillu (výplně). [6]

3.3 Tisk

Když je ve sliceru vše nastaveno, dojde k exportování G-code souboru. Tento soubor je následně spuštěn přímo z počítače, popřípadě umístěn na nějaké přenosové médium (flash disk, micro sd karta) a následně vložen do řídicí jednotky 3D tiskárny. Při spuštění tisku začne tiskárna nahřívat podložku a trysku na přednastavené teploty. Jakmile je dosaženo požadovaných teplot, spustí tiskárna proces kalibrace (u některých tiskáren je potřeba kalibraci provést ručně). Po dokončení kalibrace začne samotný tisk. [6]

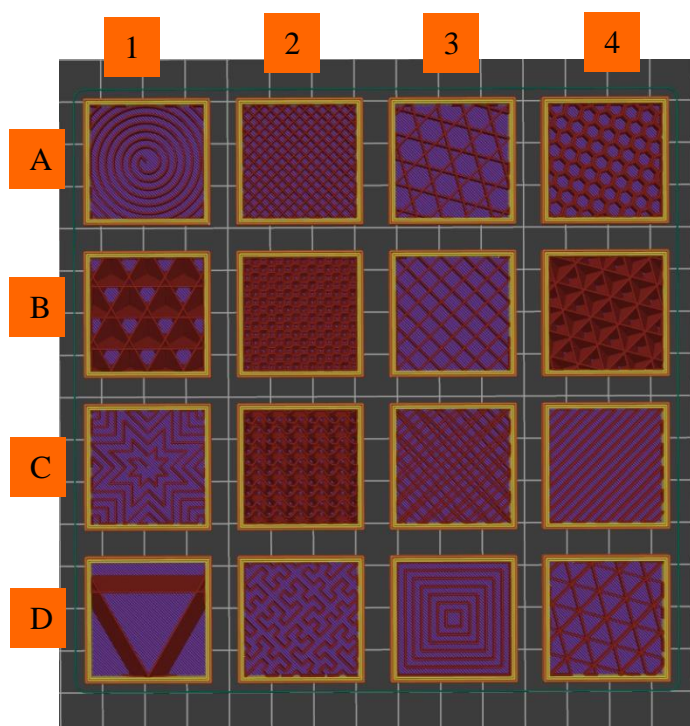
4 Vliv parametrů tisku

4.1 Infill

Infill neboli výplň udává vnitřní strukturu tisknutého objektu. U tohoto parametru je zásadní jeho hustota (z kolika procent je vnitřek součásti vyplněn) a typ. Tento parametr se podílí největší měrou na mechanických vlastnostech tištěné součásti. Nejlepších mechanických vlastností je dosaženo použitím stoprocentního infillu, to se ale negativně projeví na době samotného tisku, spotřebě materiálu a vyšší hmotnosti. Doba tisku a spotřeba materiálu poté přímo souvisí s vyššími náklady na výrobu (materiál, elektřina). [6; 10]

4.1.1 Typ infillu

V programu PrusaSlicer je možné vybrat z celkem šestnácti typů infillu, které jsou zobrazeny na Obr. 5 a uvedeny v Tab. 1.



Obr. 5 - Typy infillu

Tab. 1 - Typy infillu

Označení vzorku	Typ infillu
1A	Archimedean Chords
2A	Přímočarý
3A	Hvězdy
4A	Plástev
1B	Kubický adaptivní
2B	3D plástev
3B	Mřížka
4B	Kubický
1C	Octagram Spiral
2C	Gyroid
3C	Čára
4C	Zarovnaný přímočarý
1D	Kubický podepíraný
2D	Hilbertova křivka
3D	Koncentrický
4D	Trojúhelníky

4.1.2 Porovnání rychlosti tisku a množství materiálu pro jednotlivé typy infillu

V Tab. 2 je na modelovém příkladu znázorněna doba tisku nejpoužívanějších typů infillu při čtyřech různých hustotách. Hustota infillu je jediná proměnná, ostatní parametry tisku jsou pro všechny vzorky stejné (výchozí hodnoty z programu PrusaSlicer). V Tab. 3 je pro stejný příklad znázorněno množství použitého materiálu. Pro tuto ukázkou je zvolena krychle o délce hrany 50 mm. Doba tisku i množství použitého materiálu je uvedeno podle výpočtů programu PrusaSlicer. [10]

Tab. 2 - Závislost doby tisku na hustotě a typu infillu

Typ infillu	Hustota infillu [%]			
	10	30	50	80
Přímočarý	1 h 19 min	1 h 56 min	2 h 36 min	3 h 36 min
Trojúhelníky	1 h 23 min	2 h 4 min	2 h 51 min	4 h 0 min
Kubický	1 h 21 min	2 h 4 min	2 h 50 min	3 h 58 min
Gyroid	1 h 24 min	3 h 19 min	5 h 20 min	9 h 20 min
Plástev	1 h 44 min	4 h 31 min	7 h 35 min	11 h 27 min

Tab. 3 - Závislost spotřebovaného množství materiálu na hustotě a typu infillu

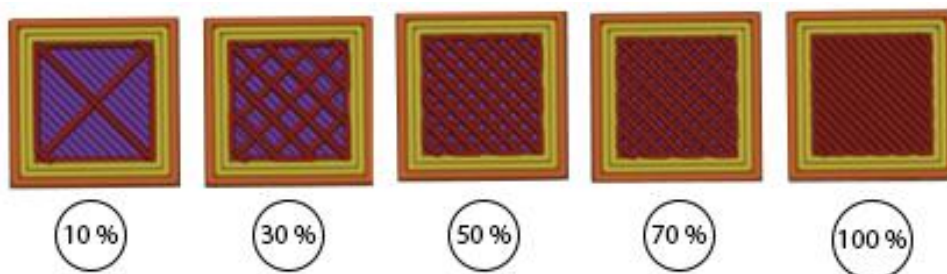
Typ infillu	Hustota infillu [%]			
	10	30	50	80
Přímočarý	31,29 g	56,73g	81,97 g	119,91 g
Trojúhelníky	30,82 g	56,51 g	81,94 g	119,6 g
Kubický	30,43 g	56,25 g	81,64 g	119,38 g
Gyroid	30,78 g	54,57 g	78,36 g	111,08 g
Plástev	34,41 g	65,63 g	92,46 g	126,38 g

Z Tab. 3 vyplývá, že pro různé typy infillu se s rostoucí hustotou infillu mění rozdíly v době tisku. Například 10 % gyroid se bude tisknout 1 hodinu a 24 minut, což je velmi podobné 10 % trojúhelníkům. Ovšem při 80 % infillu už to je 9 hodin a 20 minut u gyroidu a 4 hodiny u trojúhelníků. Co se týká množství použitého materiálu, tak podle Tab. 3 jsou i zde značné rozdíly. Například při 80 % infillu typu plástev bude spotřebováno o 12,1 % materiálu více než při použití infillu typu gyroid.

Volba typu infillu je tedy velmi individuální a měla by být vhodně odhadnuta podle použití dané součásti a následně experimentálně ověřena její pevnost.

4.1.3 Hustota infillu

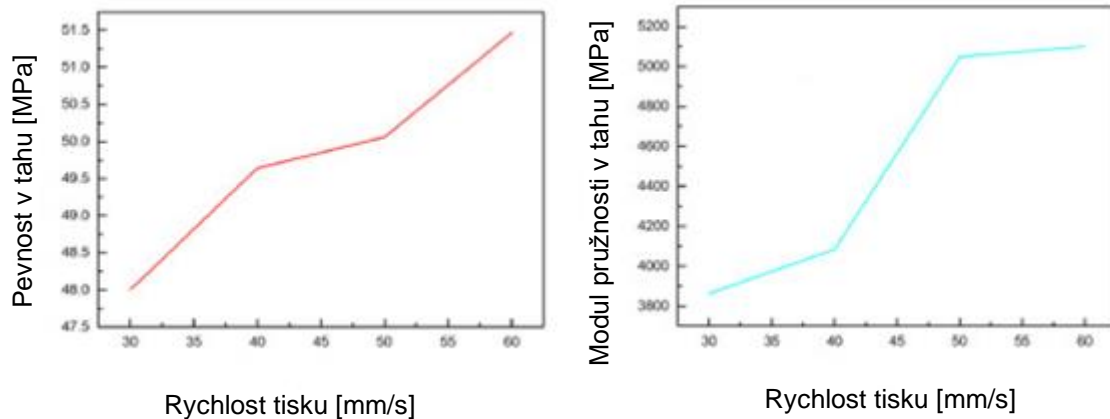
Hustota infillu je jinými slovy procentuální výplň materiálu v dané součásti a největší měrou ovlivňuje její výsledné mechanické vlastnosti. S velkou pravděpodobností bude nejlepší mechanické vlastnosti vykazovat součást s hustotou infillu blízkou 100 %. Bohužel nic není jednostranné, a tak vyšší hustota znamená vyšší množství potřebného materiálu. Z toho vyplývá vyšší cena, delší doba tisku a tím i vyšší hmotnost. Při návrhu součásti je proto potřeba spočítat, jak velké zatížení bude součást přenášet a podle toho navrhnout optimální hustotu infillu. Porovnání různých hustot infillu je zobrazeno na Obr. 6. [11; 12; 13]



Obr. 6 - Vzájemné porovnání hustot infillu

4.2 Rychlost tisku

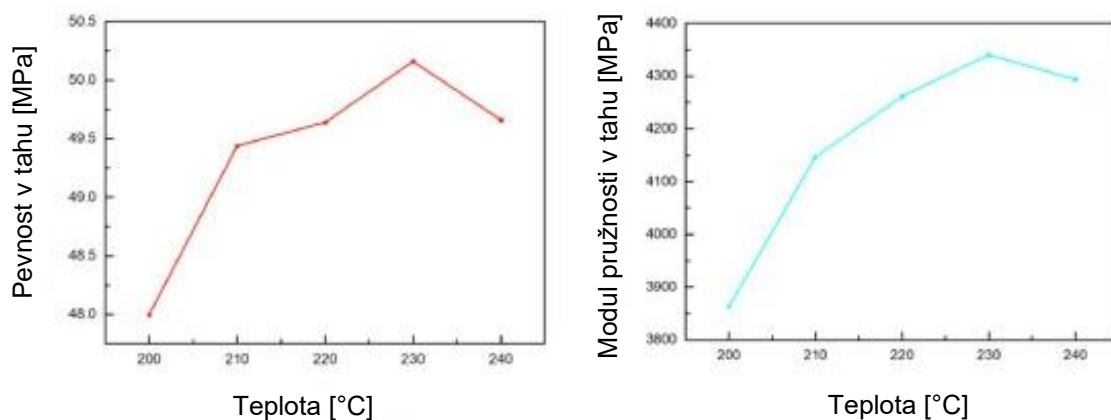
Rychlost tisku má vliv na mechanickou odolnost a rozměrovou přesnost. Při volbě vyšší rychlosti je potřeba pracovat s teplotou extrudéru, neboť vyšší rychlost znamená, že je potřeba protlačit více materiálu (je vhodné zvýšit teplotu extrudéru). Studie [14] uvádí, že s vyšší rychlostí tisku se zvyšovaly hodnoty meze pevnosti a modulu pružnosti v tahu (materiál PLA). Konkrétně při zvýšení rychlosti z 30 na 60 mm/s došlo k navýšení mechanických charakteristik v tahu o zhruba 10 %. Tato závislost je zobrazena na Obr. 7. [14; 9]



Obr. 7 - Vliv rychlosti tisku na mez pevnosti a mez pružnosti v tahu [14]

4.3 Teplota tisku

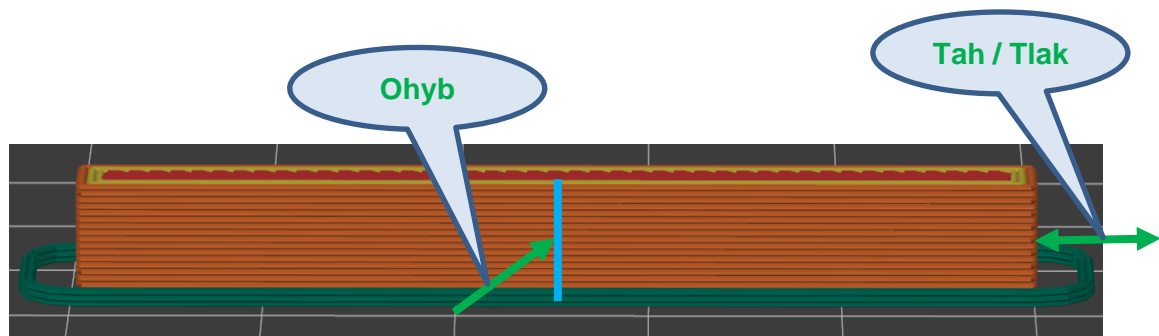
Při tisku jsou nastavovány dvě teploty. Teplota hotendu a teplota podložky. Předehřátá podložka zajišťuje pevné uchycení první vrstvy a zamezuje následnému kroucení výtisku, neboť snižuje teplotní gradient. Naproti tomu teplota hotendu úzce souvisí s rychlostí tisku a také ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti součásti. Studie [14] uvádí, že při teplotě od 200 °C do 230 °C se zvýší pevnost v tahu o 4,3 % a modul pružnosti v tahu se zvýší o 11,06 % (materiál PLA). Naopak při teplotách nad 230 °C dochází k poklesu pevnosti v tahu o 1,02 % a k poklesu modulu pružnosti o 3,32 %. Nízká teplota neumožňuje dostatečné roztavení materiálu. Naopak je-li teplota příliš vysoká, nestíhá předchozí vrstva dostatečně ztuhnout. Závislost pevnosti a modulu pružnosti na teplotě je zobrazena na Obr. 8. [8; 14]



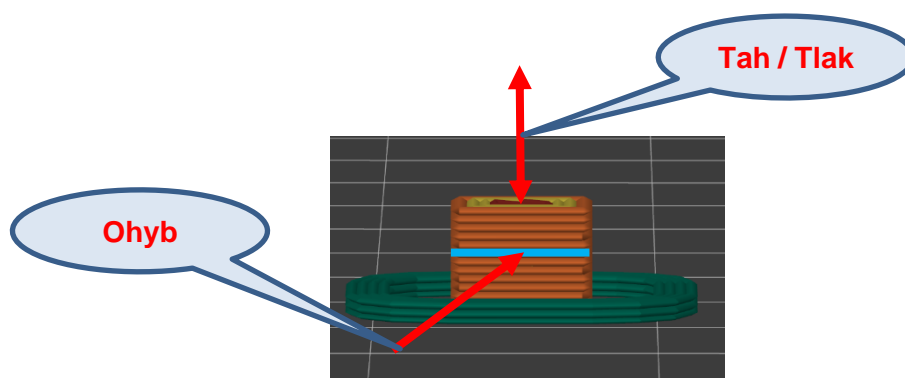
Obr. 8 - Vliv teploty hotendu na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu [14]

4.4 Orientace dílu na tiskové podložce

Společně s typem a hustotou infillu se orientace dílu podílí největší měrou na výsledných mechanických vlastnostech. Je naprosto zásadní uvažovat na tím, jak bude daná součást zatěžována. Nejmenší pevnost při zatěžování v tlaku, tahu a vzpěru bude vykazovat součást zatěžována kolmo ke směru tisku. Největší pevnost zajistí zatěžování součásti ve směru vláken (tzn. rovnoběžně se směrem tisku). Při zatěžování na ohyb je nejvhodnější orientace součásti tak, aby zatěžování působilo kolmo na průběh vláken, nikoliv rovnoběžně s nimi (poté by došlo jednoduše k odlomení jedné vrstvy od druhé). Na Obr. 9 je uvedeno, v jakém směru by daná součást **měla** být zatěžována a na Obr. 10 je naopak znázorněno, v jakém směru by uvedená součást **neměla** být zatěžována. [1; 9; 12; 15; 16]



Obr. 9 – Vhodný směr zatěžování součásti vzhledem k orientaci tisku



Obr. 10 – Nevhodný směr zatěžování součásti vzhledem k orientaci tisku

4.5 Výška vrstvy

Jak již bylo zmíněno, při 3D tisku jsou postupně tisknuty a skládány na sebe jednotlivé 2D řezy. Výška tohoto řezu se nazývá výška vrstvy. Tento parametr má významný vliv na dobu tisku a kvalitu vytištěné součásti. Model bude nejrychleji vytištěn při vyšší výšce vrstvy, ovšem na úkor kvality (přesnost, estetika). V programu PrusaSlicer lze volit z nejběžnějších hodnot uvedených v Tab. 4. Existují studie, které se zabývaly vlivem výšky vrstvy na mechanické vlastnosti (pevnost v tahu, tlaku, ohybu). Z těchto studií vyplývá, že nejlepších výsledků je dosaženo s výškou vrstvy 0,3 mm. Výška vrstvy je omezena velikostí trysky. Běžně používaná velikost trysky je 0,4 mm, ale existují například i trysky o průměru 0,8 mm. S takovouto tryskou je poté možné nastavit ve sliceru vyšší výšky vrstvy, než uvedené v Tab. 4. [17]

Tab. 4 - Výšky vrstvy nejběžněji používané v programu PrusaSlicer

0,05 mm	0,07 mm	0,1 mm	0,15 mm	0,2 mm	0,3 mm
---------	---------	--------	---------	--------	--------

4.6 Počet perimetrů

Perimetr je vlastně obvod tisknuté součásti a většinou se jich používá více než jen jeden. Za posledním perimetrem se již začíná tvořit obrys zvolené výplně. Počet perimetrů má vliv na mechanické vlastnosti tisknutého dílu. Existuje několik studií, které zjišťovali ideální počet perimetrů. Bohužel se ukázalo, že to není vůbec jednoduchá otázka a spousta studií se navzájem vyvrací. Počet perimetrů je potřeba volit individuálně s ohledem na danou součást a způsob jejího zatěžování. Ovšem jako taková optimální hodnota, kterou je vhodné experimentálně ověřit, se jeví tři perimetry. Dále je potřeba podotknout, že tisk perimetru trvá delší dobu než tisk výplně. Z toho důvodu počet perimetrů ovlivňuje ekonomickou stránku tisku (doba, cena). [18]

4.7 Materiál

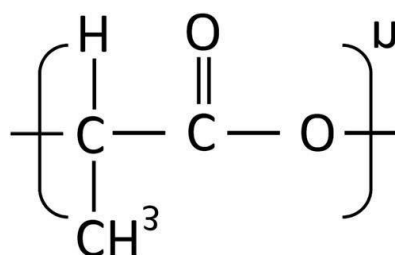
Dnes již existuje nepřehledné množství materiálů používaných v 3D tisku. Mezi ty nejpoužívanější lze zařadit PLA (Polylactic acid – kyselina polyléčná) a PETG (Polyethylene terephthalate glycol). Tyto dva materiály jsou použity pro 90 % všech technologických výtisků. Naopak od známého materiálu ABS (Akrylonitrilbutadienstyren)

se pomalu upouští, neboť při tisku uvolňuje nebezpečné zplodiny. Dále je potřeba provádět tisk ABS v uzavřené komoře, jinak má tendenci se kroutit a praskat. [8; 9; 19; 20]

Mezi další materiály je potřeba zmínit ještě ASA (Acrylonitrile styrene acrylate), který byl vytvořen jako alternativa k ABS. Vyznačuje se větší odolností proti povětrnostním podmínkám a UV záření. Stále častěji používanou skupinou jsou materiály doplněné o výztuž ve formě vláken (dřevěná, skleněná, uhlíková) nebo prášků (kovové, keramické). Do skupiny odolných materiálů se řadí PC (Polycarbonate), PEEK (Polyether ether ketone) a nylon (PA – polyamide). Pro účely této práce je dále více popsán materiál PLA. [8; 9; 19; 20]

4.7.1 Kyselina polymléčná – PLA

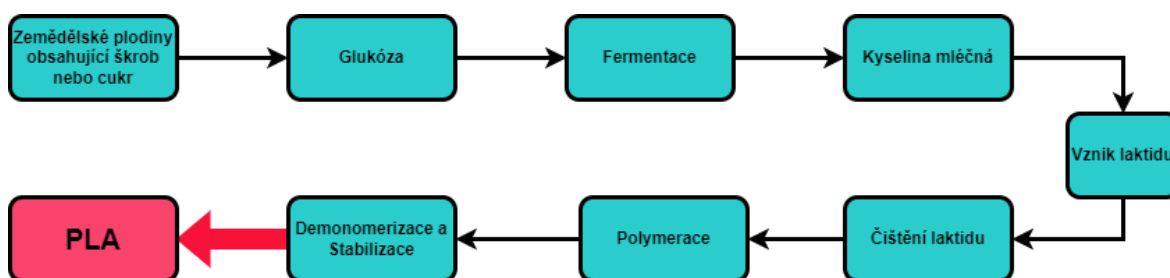
Jedná se o polymer (konkrétně polyester), jehož základní stavební jednotkou je kyselina mléčná. PLA je biologicky plně odbouratelný materiál, pro jehož výrobu se využívá cukrová třtina, bramborový nebo kukuřičný škrob. Základní chemický vzorec kyseliny polymléčné je zobrazen na Obr. 11. [21; 22; 23; 24; 25; 26]



Obr. 11 - Chemická struktura polymeru PLA [27]

Výroba

Ze vstupního materiálu se získá škrob, který je následně smíchán s enzymy nebo s kyselinou a zahřát. Škrob se za vyšší teploty rozloží na dextrózu nebo cukr. Vlivem fermentace glukózy vznikne kyselina mléčná. Nakonec polymerací této kyseliny mléčné vznikne materiál PLA. Zjednodušené schéma výroby PLA je zobrazeno na Obr. 12. [22; 24]



Obr. 12 - Schéma výroby polymeru PLA [21]

Výhody a nevýhody

Materiál je biologicky odbouratelný a zdravotně nezávadný. Při správné průmyslové recyklaci se přemění na přírodní materiály (vodu, oxid uhličitý a biomasu). Pozornost je potřeba věnovat slovnímu spojení „průmyslové recyklaci“, neboť toto platí pouze při specifických a kontrolovaných podmínkách (k rozkladu může dojít již do tří měsíců). Pokud se ale PLA umístí na běžnou skládku odpadu, jeho rozklad bude trvat 100 až 1000 let. PLA je termoplast a je tedy možné jej opakovaně tepelně zpracovávat bez zhoršení jeho mechanických vlastností. Jako další výhody je možné uvést jeho nízkou cenu ve srovnání s ostatními materiály používanými v 3D tisku. Dále, jak již bylo zmíněno, pro výrobu PLA se využívají zemědělské plodiny (často GMO plodiny). Toto je možné považovat za nevýhodu, neboť dochází k záboru zemědělské půdy. Další nevýhodou je sklon k pohlcování vzdušné vlhkosti a nízká teplota skelného přechodu (okolo 60 °C). [21; 22; 23; 24; 25; 26]

Vlastnosti

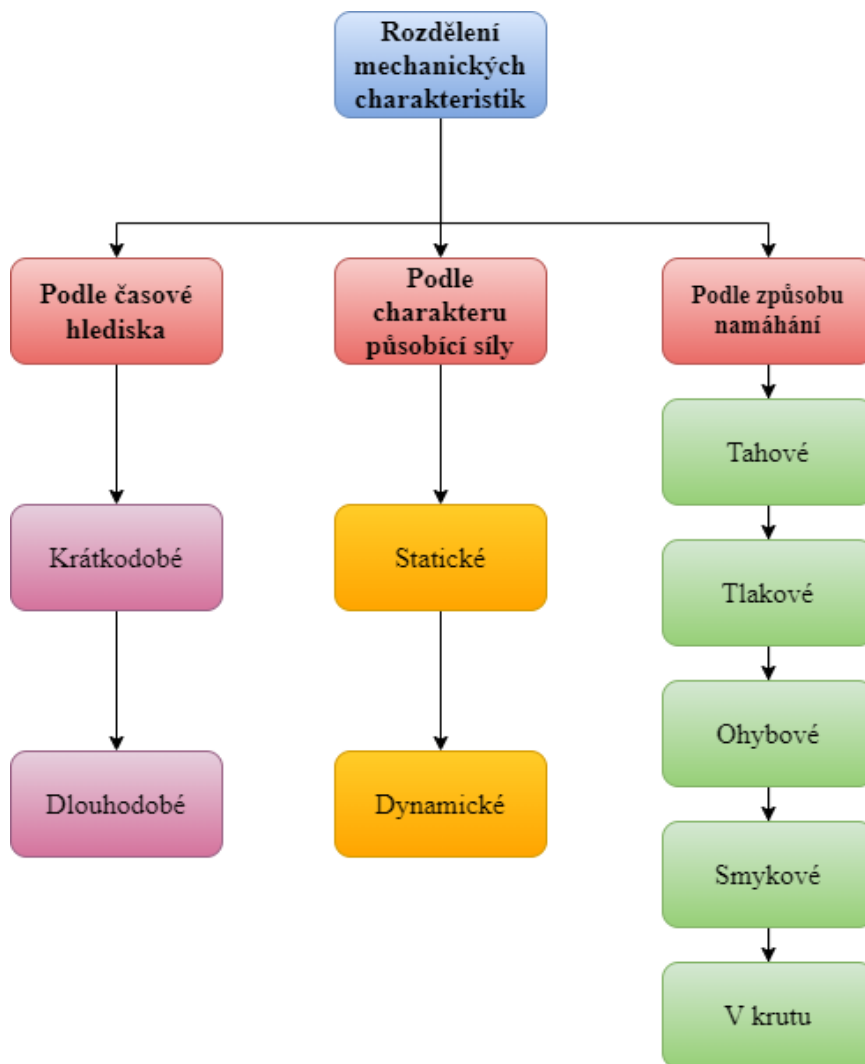
Při srovnání s ostatními polymery je PLA tuhý plast s nízkou pevností v ohybu. Čím vyšší má daný materiál molekulovou hmotnost, tím se vyznačuje větší pevností v tahu. Není chemicky odolný a špatně odolává působení UV záření. V tabulce Tab. 5 jsou uvedeny přibližné hodnoty základních parametrů tohoto materiálu. Přesné hodnoty se mohou lišit v závislosti na konkrétním materiálu a parametrech tisku. [21; 22; 23; 24; 25; 26]

Tab. 5 - Přibližné vlastnosti polymeru PLA [23; 28]

Hustota	1,24 g/cm ³
Teplota tání	145–160 °C
Teplota extrudéru při tisku	200–220 °C
Teplota skelného přechodu	55–60 °C
Modul pružnosti v tahu	2,2 – 2,4 GPa
Napětí na mezi kluzu	33,6 – 61,2 MPa
Prodloužení v tahu	až 4 %
Absorpce vlhkosti 24 hodin	0,3 %
Rázová houževnatost	4,6 – 14,4 kJ/m ²

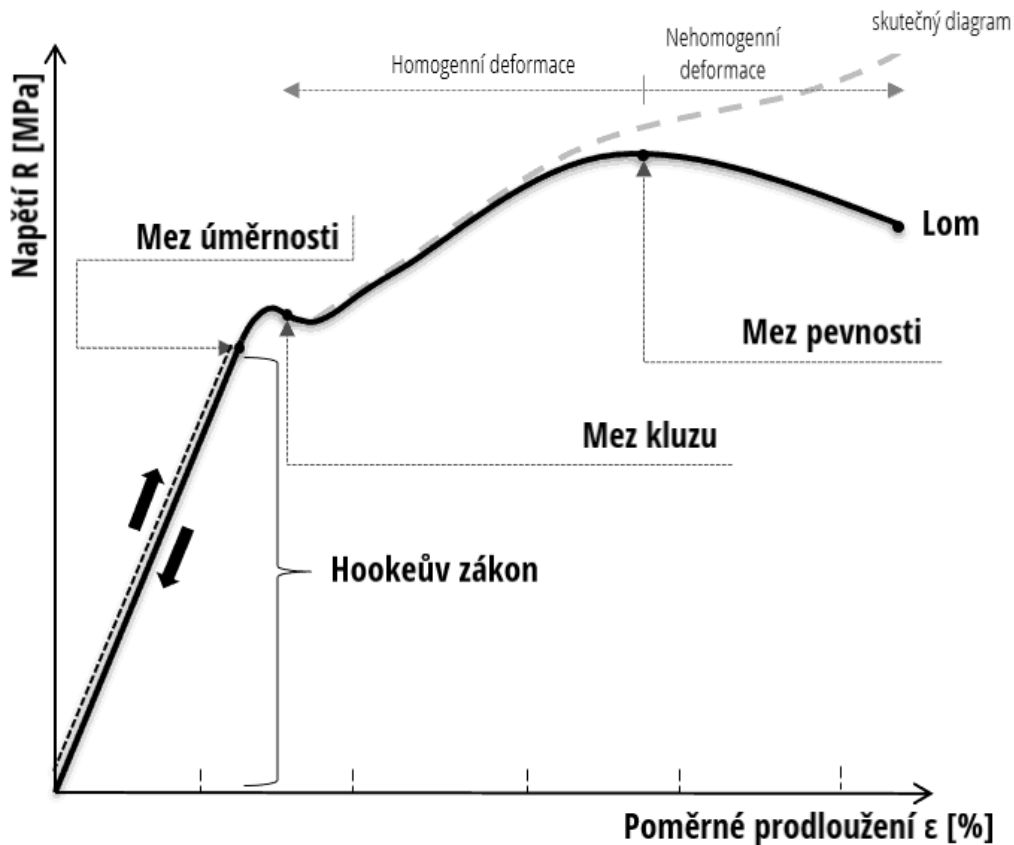
5 Mechanické vlastnosti materiálu

Základní vlastnosti materiálu je možné rozdělit do tří skupin (fyzikální, chemické a mechanické). Mechanické vlastnosti materiálu poskytují důležité informace potřebné pro realizaci experimentu v této práci (pevnost, pružnost, plasticita, houževnatost). Mechanické charakteristiky je možné rozdělit podle Obr. 13. Pro tuto práci je stěžejní namáhání v tahu, tlaku, ohybu a ve vzpěru. [29]



Obr. 13 - Rozdělení mechanických charakteristik [29]

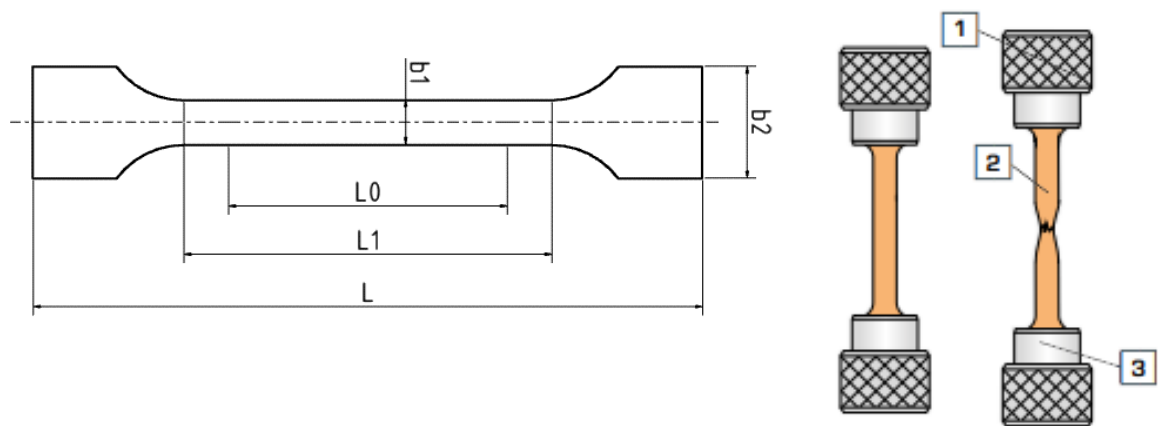
Pro zjištění mechanických vlastností konkrétního materiálu se využívají experimentální zkoušky. Výstupem z těchto zkoušek jsou hodnoty meze pevnosti, meze kluzu, tažnost, kontrakce a zásoba plasticity. Z každé zkoušky jsou výsledky ve formě textového souboru a diagramu (viz. Obr. 14). Existují celkem tři typy tohoto diagramu, a to pracovní, skutečný a smluvní. Pracovní diagram znázorňuje závislost síly (F) na dráze (ΔL). Smluvní diagram znázorňuje závislost smluvního napětí (R) na poměrném přetvoření (ϵ), přičemž obě tyto veličiny jsou vztaženy k počátečním rozměrům zkušebního tělesa. Posledním diagramem je diagram skutečný znázorňující závislost skutečného napětí (σ) na skutečném přetvoření (ϕ), přičemž tyto veličiny jsou vztaženy k aktuálním rozměrům zkušebního tělesa během prováděné zkoušky. [30; 31]



Obr. 14 - Diagram mechanické zkoušky [30]

5.1 Zkouška tahem

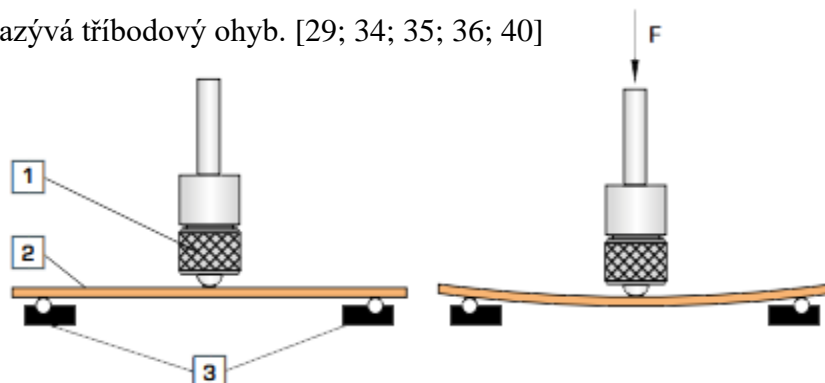
Zkouška tahem se řídí normou ČSN EN ISO 527-1. Na Obr. 15 je zobrazeno zkušební těleso (2) a schéma tahové zkoušky. Zkušební těleso má předem definovaný tvar, přičemž spodní a horní část je uzpůsobena pro snadné upnutí vzorku a prostřední část má zúžený průřez, do kterého je koncentrováno napětí. Při zkoušce tahem je zkušební těleso upnuto do čelistí univerzálního zkušebního stroje. Spodní čelist (3) je pevná a nepohybuje se. Horní čelist (1) se pohybuje ve směru od spodní čelisti a zatěžuje zkušební vzorek tahovou silou. Zkouška je ukončena nejčastěji po přetržení vzorku. [29; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38]



Obr. 15 – Zkušební těleso (vlevo) a schéma zkoušky tahem (vpravo) [39]

5.2 Zkouška tříbodovým ohybem

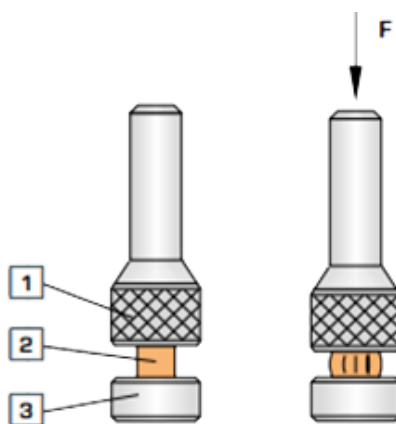
Zkouška tříbodovým ohybem se řídí normou EN ISO 178. Schéma zkoušky je zobrazeno na Obr. 16. Zkušební těleso (2) pro tuto zkoušku je obvykle nosník ve tvaru kvádru. Nosník se umístí na dvě podpěry (3), které mají předepsanou vzdálenost od sebe. Uprostřed podpěr působí na zkušební těleso osamělá síla generovaná horní čelistí (1). Tento způsob se nazývá tříbodový ohyb. [29; 34; 35; 36; 40]



Obr. 16 - Schéma zkoušky tříbodovým ohybem [39]

5.3 Zkouška tlakem

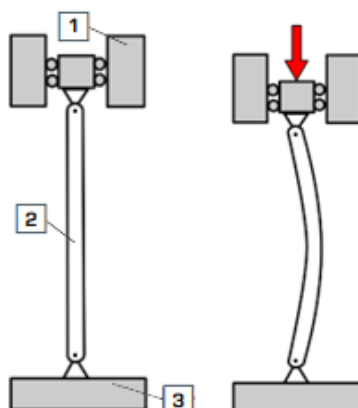
Zkouška tlakem se řídí normou ČSN EN ISO 844. Schéma zkoušky tlakem je zobrazeno na Obr. 17. Zkušební těleso (2) může být ve tvaru válce, trubky, hranolu nebo krychle. Důležité je, aby toto těleso mělo přesně definované rozměrové parametry, které jsou následně před samotnou zkouškou zkontrolovány. Při zkoušce tlakem je zkušební těleso umístěno na spodní čelist univerzálního zkušebního stroje. Spodní čelist (3) je pevná a nepohybuje se. Horní čelist (1) se pohybuje směrem ke spodní čelisti a zatěžuje zkušební vzorek tlakovou silou. Zkouška je ukončena nejčastěji po dosažení předem nastavené dráhy. Výstupem z této zkoušky je tlakový diagram. [29; 34; 35; 36; 37]



Obr. 17 - Schéma zkoušky tlakem [39]

5.4 Zkouška vzpěru

Zkouška vzpěru se řídí normou ČSN EN ISO 844. Schéma zkoušky je zobrazeno na Obr. 18. Zkušební těleso (2) pro tuto zkoušku je tenký prut. Horní čelist (1) se pohybuje směrem dolů a zatěžuje vzorek. Spodní čelist (3) se nepohybuje. Je-li těleso dostatečně dlouhé a tenké, pak při provádění zkoušky tlakem nedojde k běžnému stlačení vzorku, ale dojde k jeho vychýlení. V tu chvíli je primárním zatížením ohyb. [41]



Obr. 18 - Schéma zkoušky vzpěru [42]

6 Systém ARAMIS

Jedná se o bezkontaktní optický systém, který pracuje na principu DIC (digitální korelace obrazu). Systém ARAMIS (viz. Obr. 19) se využívá pro analýzu dynamických dějů a pro měření deformace sledovaného objektu v průběhu zatěžovacího procesu (např. při zkoušce tahem). Sledovaný objekt je potřeba opatřit černobílým patternem (nástříkem), který se nanese pomocí spreje. Pattern musí vytvořit náhodný izotropní povrch s dostatečným kontrastem. Je důležité, aby nástřík na zkušební vzorku velmi dobře držel, neboť se bude deformovat zároveň s jeho povrchem. Deformaci je možné měřit v rozsahu od 0,05 % až do stovek %. [43; 44; 45; 46]



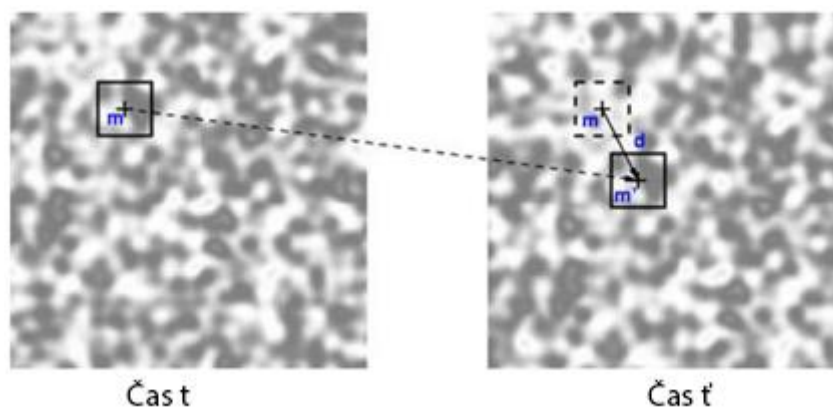
Obr. 19 - Schéma systému ARAMIS [47]

6.1 Digitální korelace obrazu – DIC

DIC je bezkontaktní optická technika měřící povrchovou deformaci na většině materiálech a tvarech. Při měření dvojice kamer sleduje posuv a deformaci bodů na měřeném povrchu. Oproti tenzometrům a průtahoměrům je touto metodou možné detailněji pozorovat lokální děje. DIC je možné použít jak ve 2D, tak i ve 3D. Pro měření v této práci je dostatečná dvourozměrná korelace obrazu, ovšem z důvodu přesnějšího měření byla pro monitorování použita dvojice kamer. [43; 46; 48]

6.1.1 Dvourozměrná korelace obrazu (2D)

Jedná se o monokulární metodu, kde nelze určit velikost sledovaného objektu. Objekt musí mít rovinný povrch, který je zároveň rovnoběžný s rovinnou snímání v průběhu celého procesu měření. Princip metody spočívá ve vybrání jednoho bodu v původním snímku (když na objekt nepůsobí žádné zatížení), který je nezaměnitelný. Tento bod je následně sledován v průběhu celého deformačního děje nebo posuvu sledovaného povrchu. Sledovat jeden jediný bod, není realizovatelné. Ve skutečnosti je sledován nejen tento bod, ale současně s ním i jeho okolí (sousedící body). Bod s jeho okolím se nazývá fazeta. Na Obr. 20 je znázorněn posun sledované fazety během deformačního procesu. [43; 46; 48]



Obr. 20 - Posun sledované fazety během deformačního procesu [48]

Kamera pracuje se snímkem, který je matice přirozených čísel, kde je bílým pixelům přiřazena hodnota šedosti 100 a černým pixelům je přiřazena hodnota šedosti 0. Před začátkem měření je nadefinována fazeta (matice o rozměrech 5x5 pixelů). Cílem měření je nalézt pohyb zvolené fazety tzv. mapovacím procesem. V reálném procesu vstupuje do měření šum, který znehodnocuje obraz. To znamená, že skoro žádné pixely nebudou nabývat hodnot 0 pro černou barvu ani hodnot 100 pro barvu bílou. [43; 46; 48]

7 Rešerše současného stavu v oblasti tvářecích operací prováděných nástroji vyrobených 3D tiskem

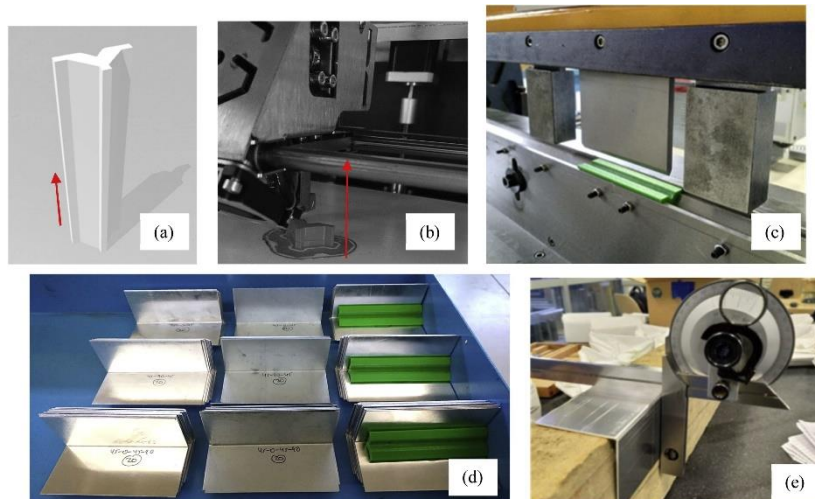
V této kapitole je provedena rešerše současného stavu z oblasti tváření plechů nástroji vyráběných 3D tiskem. Je zde zahrnuta jak výroba výlisků, tak ohýbání plechů.

7.1 Výroba a výkonnost 3D tištěných plastových nástrojů pro ohýbání vzduchem

V této studii je provedeno hodnocení výkonnosti 3D tištěných nástrojů pro proces ohýbání plechů V-zápustkou. V průmyslové praxi je často využíváno ohýbání plechů vzduchem s kovovými matricemi ve tvaru „V“ z důvodu velké flexibility, produktivity a dobré opakovatelnosti výsledků. Ovšem výroba zápustky z nástrojové oceli je finančně nákladná a trvá dlouhou dobu. Je-li potřeba provést malou sérii nebo rychle reagovat na změnu ve výrobě, nabízí se možnost využít aditivní technologie a zápustku vytisknout na 3D tiskárně. [49]

Na běžné tiskárně Creality Ender 3 bylo z materiálu PLA vytištěno celkem pět V-zápustek. Pro zápustky byly použity různé tiskové vzory. Následně byly v zápustkách ohýbány hliníkové a uhlíkové plechy s nízkou pevností o tloušťkách od 0,4 mm do 1,2 mm. Plechy byly do polymerních zápustek ohýbány pomocí běžného kovového razníku. V každé zápustce bylo provedeno 60 ohybů, a to v pořadí 20 hliníkových plechů, 20 ocelových plechů a nakonec opět 20 hliníkových plechů. Na Obr. 21 je znázorněna sekvence experimentální části. [49]

Vyhodnocení zkoušky probíhalo analýzou povrchu zápustky (geometrický profil a drsnost). Měření ukázalo, že po ohnutí 60 plechů nedochází k žádným významným statistickým odchylkám hodnot před a po ohýbací operaci. Byly ovšem pozorovány drobné rozdíly mezi jednotlivými tiskovými vzory. Nejlepších výsledků dosáhl „standardní“ vzor 45°-45°. Studie ve svém závěru uvádí, že takovéto zápustky lze efektivně využít pro krátkodobé ohýbací operace. [49]



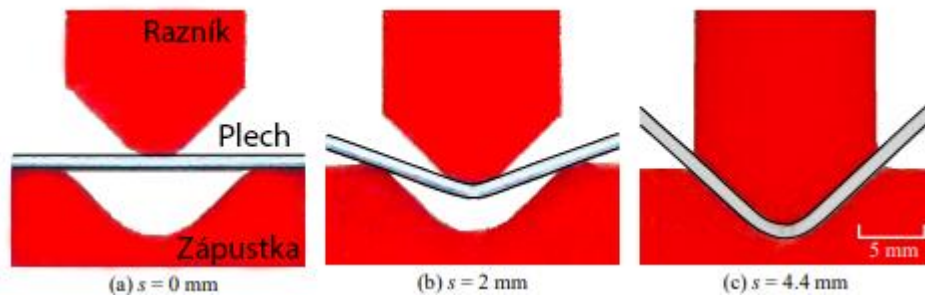
Obr. 21 - Sekvence experimentální části: (a) 3D model nástroje; (b) 3D tisk nástroje; (c) Zkouška ohybu; (d) Vzorky po zkoušce ohybu (e) Měření charakteristik vzorků po zkoušce ohybu [49]

7.2 Ohýbání plechů pomocí plastových nástrojů vyrobených na 3D tiskárně

Tato studie se zabývá porovnáním mezi ohýbáním plechů pomocí polymerových nástrojů a ohýbáním plechů konvenčními kovovými nástroji. Na začátku byly metodou FFF vyrobeny z materiálu PLA razník a V-zápustka s 80 % infillem. Dále bylo zvoleno, že ohýbání plechů proběhne na kombinaci nástrojů, aby bylo možné výsledky porovnat. Razník a zápustka budou nakombinovány následovně: plast-plast, ocel-plast, ocel-ocel. Pro zkoušku byly zvoleny plechy uvedené v Tab. 6. Celý proces byl sledován pomocí CCD kamery a je znázorněn na Obr. 22. Ohýbání bylo provedeno na 100 vzorcích plechu. [50]

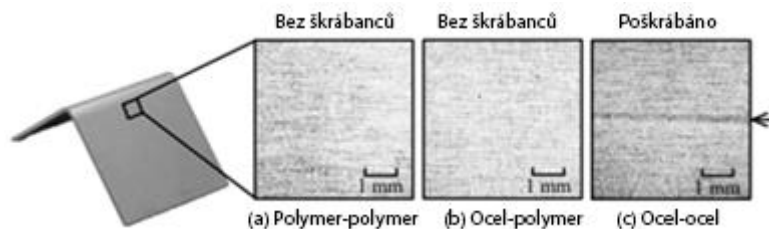
Tab. 6 - Vlastnosti zkoušených plechů [50]

Plech	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení [%]	Tvrdość podle Vickerse [HV0.2]
A1100-H14	138	4,8	47
A5052-H32	229	9,2	86
440 MPa ocel	470	29,5	152

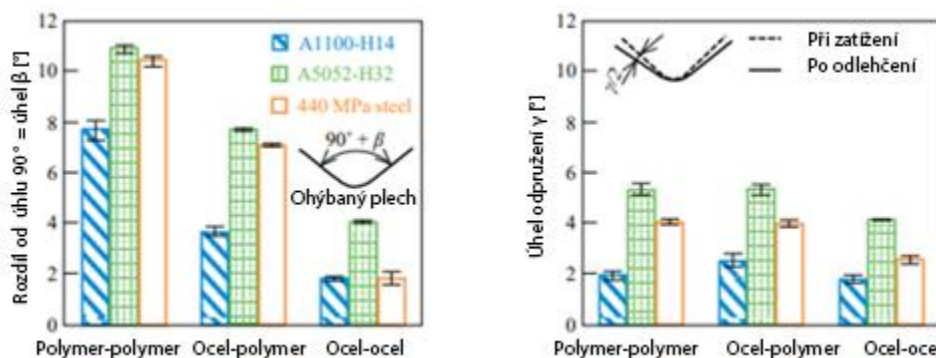


Obr. 22 - Proces ohýbání plechu [50]

Vyhodnocení zkoušky probíhalo porovnáváním výsledného úhlu ohnutí (90°) a úhlu odpružení. Z přiložených výsledků je patrné, že nejlepšího výsledku bylo dosaženo s čistě kovovými nástroji (tento fakt, ale není žádným překvapením). Závěr studie přesto uvádí, že využití 3D tištěných nástrojů má velký potenciál. Lepší variantou je využití kombinace kovového razníku a polymerní zápustky (vyrobení razníku nebývá tak obtížné jako výroba zápustky), než pouze polymerních nástrojů. Ovšem i čistě polymerní nástroje mají své využití v menších sériích. Jako další výhoda se ukázalo, že oproti ocelovým nástrojům nepoškozují zbylé dvě varianty povrch plechů (viz. Obr. 23). Dále je na Obr. 24 graf (a) zobrazující přírůstek úhlu k úhlu ohybu (90°) pro různé kombinace nástrojů. Graf (b) z Obr. 24 zobrazuje velikost odpružení pro různé kombinace nástrojů. [50]



Obr. 23 - Kvalita povrchu plechů pro různé kombinace nástrojů [50]



Obr. 24 – (a) Velikost přírůstku úhlu k úhlu ohybu pro různé kombinace nástrojů; (b) velikost odpružení pro různé kombinace nástrojů [50]

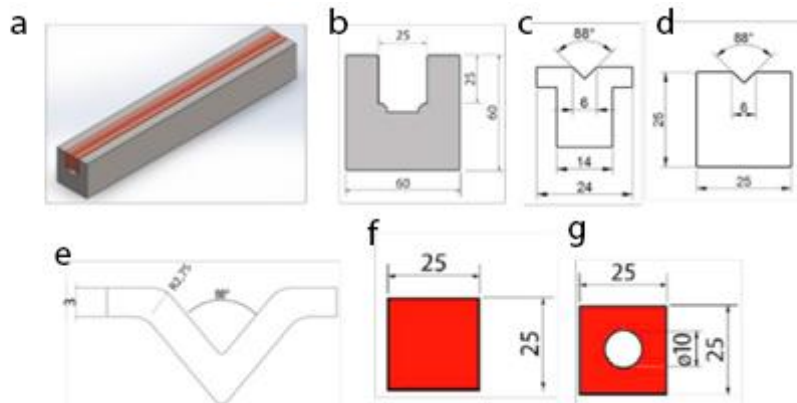
7.3 Ohýbání plechů pomocí flexibilních nástrojů

V této studii je navrhnout a vyroben hybridní systém (viz. Obr. 25), který se skládá z kovové a polymerní části. Jedná se o alternativu k plně kovovým systémům. Nástroj je vytvořen jako tuhý kovový rám, do kterého je vložena vyměnitelná polymerní matrice. Ta je vyrobena několika způsoby (3D tisk, vstřikování, obrábění). Zkoušky mají za úkol porovnat konvenční řešení (nástroj vyrobený z oceli C40) s šesti různými polymerními matricemi. V Tab. 7 jsou uvedeny použité materiály a jejich vlastnosti. [51]

Při zkoušce byly ohýbány plechy z materiálů Al1050, Fe37 a Al008 CR. Tloušťky plechů byly od 0,7 mm do 2 mm. Plechy byly kratší než matrice, proto byly vždy umístěny v jejím středu. Zkouška probíhala s jedním kovovým razníkem s úhlem otevření 88°. Pro každý typ matrice byly provedeny nejméně dvě opakování. Studie uvádí, že lze použít polymerní matrice se stejnou variabilitou, jako nabízí matrice kovové. Oproti kovovým lze pozorovat lepší výsledný povrch ohnutých plechů (bez škrábanců). Využití hybridních systémů dává smysl v případě, že výrobní podnik musí vyrobit větší množství malých sérií plechových dílů s různými tloušťkami a cílovými úhly. V takovém případě je vhodné vyrobit pouze vnější kovové pouzdro a do něj vkládat příslušné polymerní matrice. [51]

Tab. 7 - Vlastnosti materiálů použitých pro výrobu nástrojů [51]

Materiál	Hustota [Kg/mm ³]	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Prodloužení [%]
Steel C40	$7,8 \cdot 10^{-6}$	$208 \cdot 10^3$	335	530	22
Nylon	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^3$	55	67,8	60
Necuron 1050	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$3,24 \cdot 10^3$	30	38	3
Necuron 1150	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,91 \cdot 10^3$	42,67	62,67	14,8
Necuron 1300	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$2,76 \cdot 10^3$	37,33	49,33	12,07
Rubber shore 90 A	$1,26 \cdot 10^{-6}$	8,3	-	51,7	525
Polycarbonate	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,025 \cdot 10^3$	43,45	70	100



Obr. 25 - (a) Koncepte ohýbání vzduchem zhotovená ze standardního kovového pouzdra a rychle vyměnitelné polymerní vložky ve tvaru V; (b) výkres průřezu kovového rámu; (c) rozměry nylonové vložky; (d) rozměry polyuretanové vložky; (e) rozměry polykarbonátové vložky; (f) a (g) rozměry pryžových vložek [51]

7.4 Tváření plechů pomocí aditivně vyráběných polymerních nástrojů

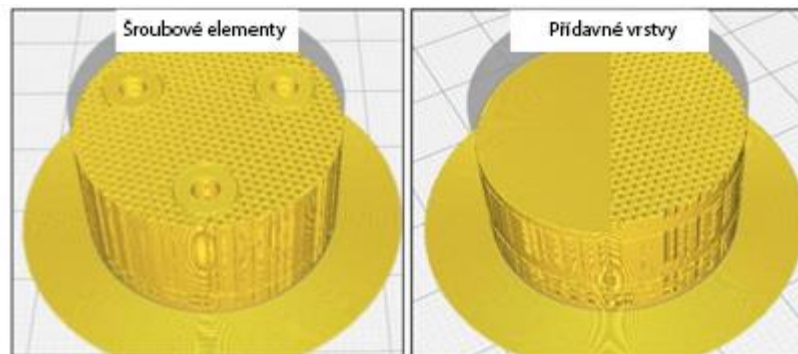
Tato studie se narozdíl od předešlých zabývá aditivně vyráběnými nástroji pro hluboké tažení. Na 3D tiskárně byl z materiálu PLA vyroben zkušební razník. Následně byla provedena zkouška hlubokotažnosti podle Erichsena na plechách uvedených v Tab. 8. [52]

Tab. 8 - Vlastnosti zkoušených plechů [52]

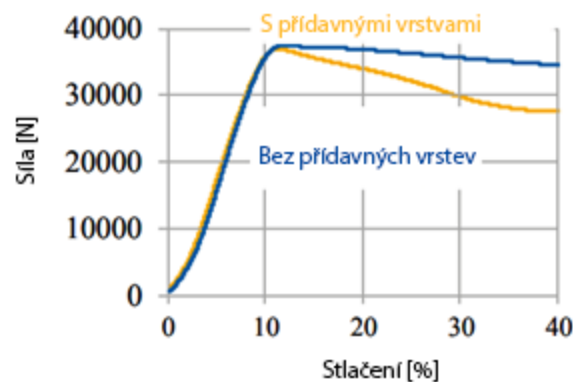
Materiál	Mez kluzu [MPa]	Tloušťka [mm]
DC01	140-280	1,0
CR3	140-210	0,7
CR240LA	240-320	1,0

Zkoušky ukázaly, že razník vyrobený z PLA je schopný dosáhnout podobných výsledků jako konvenční kovový razník. V následující části studie byl kladen důraz na optimalizaci konstrukce nástroje s ohledem na výrobní čas (co nejnižší hustota a vhodný typ infillu). [52]

Optimalizace probíhala následujícím způsobem. Bylo vybráno osm různých typů infillu a vytištěno mnoho válců, které byly následně rozdrceny pro zjištění jejich maximální pevnosti v tlaku. Jako nejpevnější se ukázal typ infillu „trojúhelníky“. Následně byl vytištěn vzorek s tímto typem infillu a pro zvýšení tuhosti byl doplněn o další prvky (přídavné vrstvy, šroubové elementy). Oba tyto prvky jsou uvedeny na Obr. 26. Přídavná vrstva je doplnění infillu o desku, která má tloušťku 2 mm a je z plného materiálu. Celkem byly v součásti použity dvě tyto přídavné vrstvy. Vliv těchto vrstev je znázorněn v grafu na Obr. 27. [52]



Obr. 26 - Ukázka zpevňujících prvků; (a) šroubové elementy; (b) přídavné vrstvy [52]

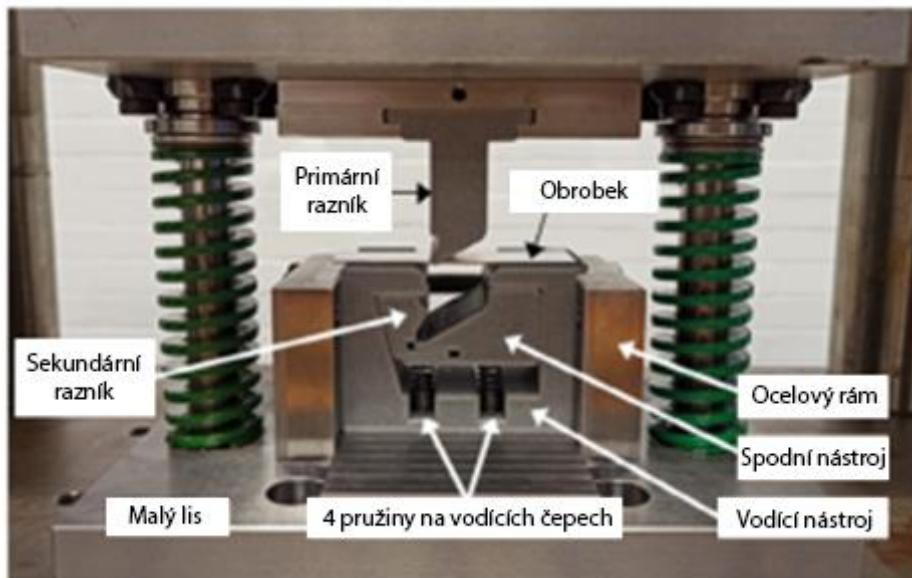


Obr. 27 - Vliv přídavných vrstev na průběh zatěžující síly [52]

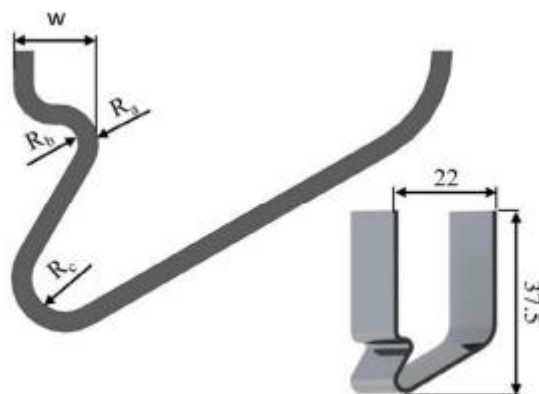
Šroubové elementy umožnili do vzorku vložit běžné ocelové šrouby. Cílem bylo zpevnit strukturu pomocí tuhých, levných a běžně dostupných prvků. Šrouby zvedly únosnost vzorku z 36,95 kN na 49,28 kN (zvýšení únosnosti o 33,4 %). Studie ve svém závěru uvádí, že nástroje pro hluboké tažení vyrobené metodou FFF poskytují podobně dobré výsledky, jako konvenční kovové nástroje. Co se optimalizace týče, studie dále uvádí, že je možné zlepšit pevnost konstrukce nástrojů výrazně nad meze základního materiálu. Aditivně vyráběné nástroje mají své uplatnění pro menší série. [52]

7.5 3D tisk pro usnadnění výroby flexibilního tváření plechů

Tato studie zkoumá možnost využití výroby 3D tištěných polymerních nástrojů pro vytvoření flexibilní výrobní linky na tváření kovů. Pro tisk nástroje byla zvolena vertikální orientace tisku a materiál PLA. Podle studie [53] tato orientace maximalizuje odolnost nástroje tlakovým silám (síly působí kolmo na nástroj, čímž je minimalizován vznik delaminace). Výška vrstvy byla zvolena 0,1 mm a hustota infillu 50 %. Výchozím polotovarem byl hliníkový plech Al1050 o rozměrech 90 x 30 x 1 mm. Hotový výrobek je díl na Obr. 29 pro jehož vytvoření je potřeba pohyb více nástrojů současně. Jedná se tedy o vznik komplikovanější geometrie ohýbání plechu než v předchozích studiích. Na Obr. 28 je znázorněna celá sestava 3D tištěného lisovacího nástroje. Celkem byly vytištěny čtyři části nástroje. Pro zvýšení tuhosti byly tyto části umístěny do ocelového rámu. [54]



Obr. 28 - 3D sestava lisovacího nástroje [54]



Obr. 29 – Návrh výrobku [54]

Následně již proběhlo samotné lisování plechu. Průběh lisování je zobrazen na Obr. 30. Na Obr. 31 je ukázka hotového výrobku. [54]



Obr. 30 - Postupný průběh lisování (zleva doprava) [54]



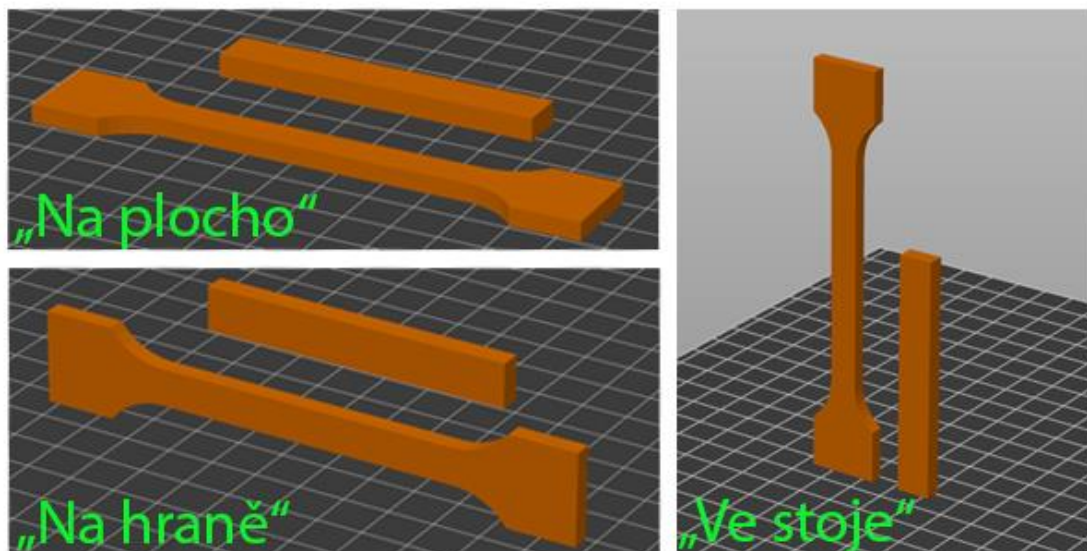
Obr. 31 - Hotový výrobek [54]

Závěr studie uvádí, že u konečného výrobku jsou jisté odchylky. Například poloměr R_b je o 30 % větší, než by měl být. Poloměr R_a je větší o 10 %. Poloměr R_c a šířka w mají vyhovující rozměry. Přesto studie shledává potenciál ve využití 3D tištěných nástrojů pro lisování plechů, a dokonce se v závěru studie zabírá návrhem robotického pracoviště, které by spojovalo 3D tisk nástrojů a samotný lisovací proces. [54]

8 Zkoušky mechanických vlastností

Pro tisk nástrojů bude použit filament PLA od společnosti Creality. Existuje značné množství výrobců a každý může vyrobit stejný typ materiálu s lehce odlišnými mechanickými vlastnostmi. Z tohoto důvodu je potřeba daný materiál podrobit mechanickým zkouškám a jeho vlastnosti tak ověřit. V provedené rešerši byly zmíněny určité předpoklady týkající se orientace tisku, typu a hustoty infillu. I tyto předpoklady je vhodné před samotným návrhem nástrojů ověřit. Pro ověření vlastností jsou zvoleny zkoušky tahem, tlakem, ohybu a vzpěru.

Během zkoušek jsou použity celkem tři různé orientace vzorků na tiskové podložce. Tyto orientace jsou nazvány jako „ve stoje“, „na hraně“ a „na plocho“ a jsou znázorněny na Obr. 32.



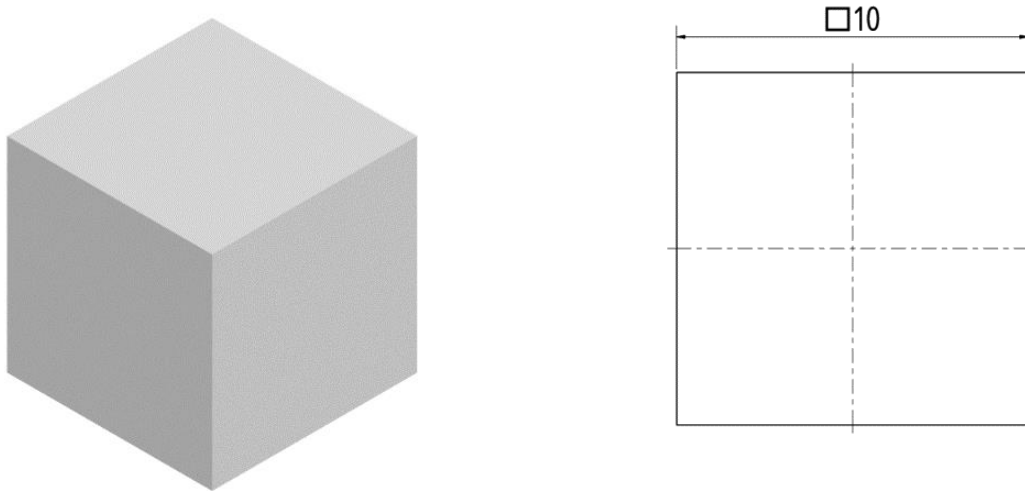
Obr. 32 - Definice orientace vzorku na tiskové podložce

8.1 Zkouška tlakem

O zkoušce tlakem byly uvedeny informace v kapitole 5.3. V první řadě je potřeba navrhnout zkušební těleso, dále zvolit proměnlivé a fixní parametry, následně zkušební tělesa vytisknout a provést samotnou zkoušku. Na závěr budou získané výsledky zhodnoceny.

8.1.1 Návrh zkušebního tělesa

Jako zkušební těleso pro tuto zkoušku byla zvolena krychle o délce hrany 10 mm zobrazena na Obr. 33.



Obr. 33 - Zkušební těleso pro zkoušku tlakem (zleva: 3D model, výkres)

8.1.2 Návrh parametrů

Zkouška tlakem je rozdělena na dvě samostatné části. V první části bude navrženo 48 vzorků rozdělených do dvanácti skupiny po čtyřech. Každá skupina se bude lišit hustotou a typem infillu. Ostatní parametry budou pro všechny vzorky stejné. Ve druhé části zkoušky bude navrženo 18 vzorků rozdělených do šesti skupin po třech. Jednotlivé skupiny se od sebe budou lišit pouze výškou vrstvy. Ostatní parametry budou opět pro všechny vzorky stejné.

Vliv hustoty infillu na mechanické vlastnosti

V Tab. 9 jsou uvedeny proměnlivé parametry tisku a v Tab. 10 fixní parametry tisku.

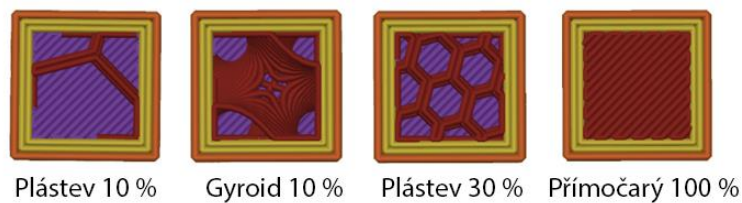
Tab. 9 – Proměnlivé parametry tisku pro zkoušku tlakem (vliv hustoty infillu)

Vzorky	Typ infillu	Hustota infillu [%]
1-4	gyroid	10
5-8	přímočarý	20
9-12	plástev	30
13-16		40
17-20		50
21-24		60
25-28		70
29-32		80
33-36		85
37-40		90
41-44		95
45-48		přímočarý

Tab. 10 - Fixní parametry tisku pro zkoušku tlakem (vliv hustoty infillu)

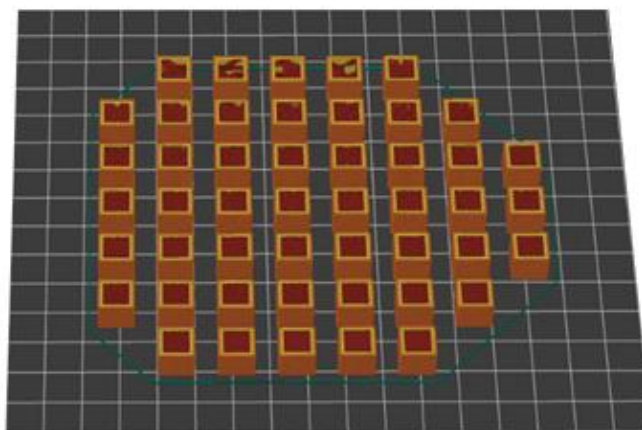
Parametr	Nastavení
Filament	PLA
Tiskárna	Ender 3 PRO
Teplota hotendu	210 °C
Teplota podložky	60 °C
Výška vrstev	0,30 mm
Počet perimetrů	3

Pro tuto část bylo uvažováno, že typ infillu pro všechny vzorky bude plástev. Při nastavování parametrů v programu PrusaSlicer bylo ovšem zjištěno, že pro zvolený vzorek není vhodné při 10% hustotě použít tento typ. Důvod je zobrazen na Obr. 34. Infill typu plástev na takto malém vzorku při takto malé hustotě se není schopen vytvořit. Z toho důvodu byl pro 10 % hustotu zvolen gyroid a pro 20 % hustotu přímočarý. Při 30 % hustotě již bylo možné použít plástev. Pro 100 % infill nelze použít jiný typ než přímočarý. Na Obr. 35 je znázorněna tisková podložka se všemi 48 vzorky doplněna o informace ohledně doby tisku a množství spotřebovaného materiálu. Doba tisku těchto vzorků je 4 hodiny a 20 minut.



Obr. 34 – Volba typu infillu

Typ	Čas	Procentuálně	Použito filamentu	Informace o slicování	
Perimetr	1h5m	25,1%	5,20 m 15,50 g	Použito Filamentu (g)	49,35
Vnější perimetr	48m	18,5%	3,75 m 11,17 g	Použito Filamentu (m)	16,55
Vnitřní výplň	1h56m	44,8%	5,51 m 16,43 g	Použito Filamentu (mm ³)	39797,53
Plná výplň	19m	7,4%	1,43 m 4,26 g	Náklady	19,69
Vrchní plně výplně	4m	1,5%	0,30 m 0,89 g	Odhadovaný čas tisku:	
Výplň mostů	5m	1,8%	0,27 m 0,82 g	- normální režim	4h20m
Obrys/Límeč	42s	0,3%	0,05 m 0,14 g		
Vlastní	2m	0,6%	0,05 m 0,13 g		



Obr. 35 – Vzorky pro zjišťování vlivu typu hustoty infillu na mechanické vlastnosti

Vliv výšky vrstvy na mechanické vlastnosti

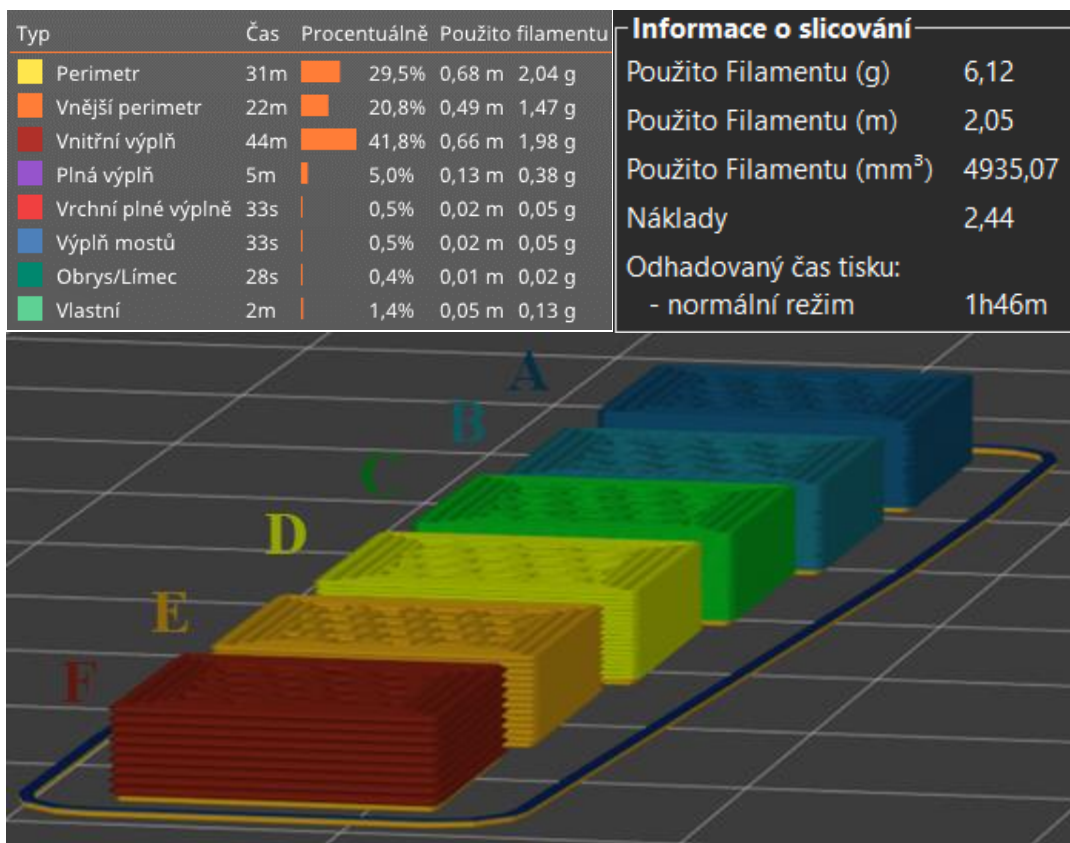
V Tab. 11 jsou uvedeny proměnlivé parametry tisku a v Tab. 12 jsou uvedeny fixní parametry tisku. Na Obr. 36 jsou zobrazeny vzorky s rozdílnou výškou vrstvy. Dále jsou na obrázku uvedeny informace o samotném tisku.

Tab. 11 – Proměnlivé parametry tisku

Vzorky	Výška vrstvy [mm]
A1-A3	0,05
B1-B3	0,07
C1-C3	0,1
D1-D3	0,15
E1-E3	0,2
F1-F3	0,3

Tab. 12 - Fixní parametry tisku

Parametr	Nastavení
Filament	PLA
Tiskárna	Ender 3 PRO
Teplota hotendu	210 °C
Teplota podložky	60 °C
Hustota infillu	50 %
Typ infillu	plástev
Počet perimetrů	3



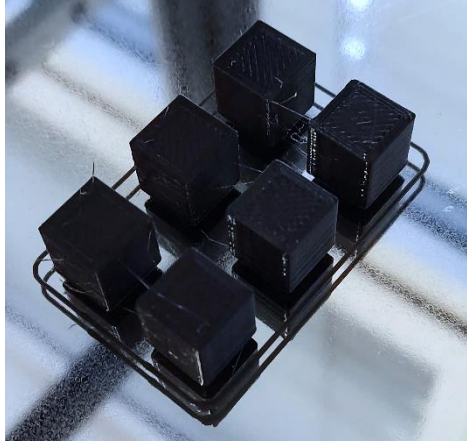
Obr. 36 - Rozdílné výšky vrstvy

8.1.3 Realizace experimentu

Po navržení všech parametrů je možné přistoupit k realizaci samotného experimentu.

3D tisk

Po nastavení všech parametrů v programu PrusaSlicer je vyexportován G-Code. Ten je pomocí přenosového média (flash disku) vložen do 3D tiskárny Ender 3 PRO. Na Obr. 37 jsou zobrazeny první vytištěné vzorky.



Obr. 37 - Vytištěné vzorky pro zkoušku tlakem

Měření charakteristik

Po vytištění všech vzorků následuje jejich označení a změření charakteristik. U vzorků pro zkoušku tlakem byla změřena jejich výška (v tomto směru bude při zkoušce působit zatížení) a dále byly všechny vzorky zváženy. Pro vážení byla použita laboratorní váha zobrazena na Obr. 38 s přesností měření 0,001 g.



Obr. 38 - Vážení vzorků

Zkouška

Nyní jsou vzorky připravené pro samotnou zkoušku tlakem. Ta bude probíhat na univerzálním zkušebním trhacím stroji LabTest Model 5.100SP1 (viz. Obr. 39). Zkušební těleso se umístí na spodní čelist stroje. Následně se nastaví parametry zkoušky. Po zahájení zkoušky se horní čelist začne pohybovat ve směru dolů, přičemž působí na vzorek tlakovou silou. Po dosažení kritéria pro ukončení zkoušky se pohyb zastaví. Následně se horní čelist pomocí rychloposuvu vrátí zpět do výchozí polohy. Z každé provedené zkoušky je automaticky vytvořen protokol a textový soubor, kde jsou zaznamenány hodnoty času, dráhy a síly.

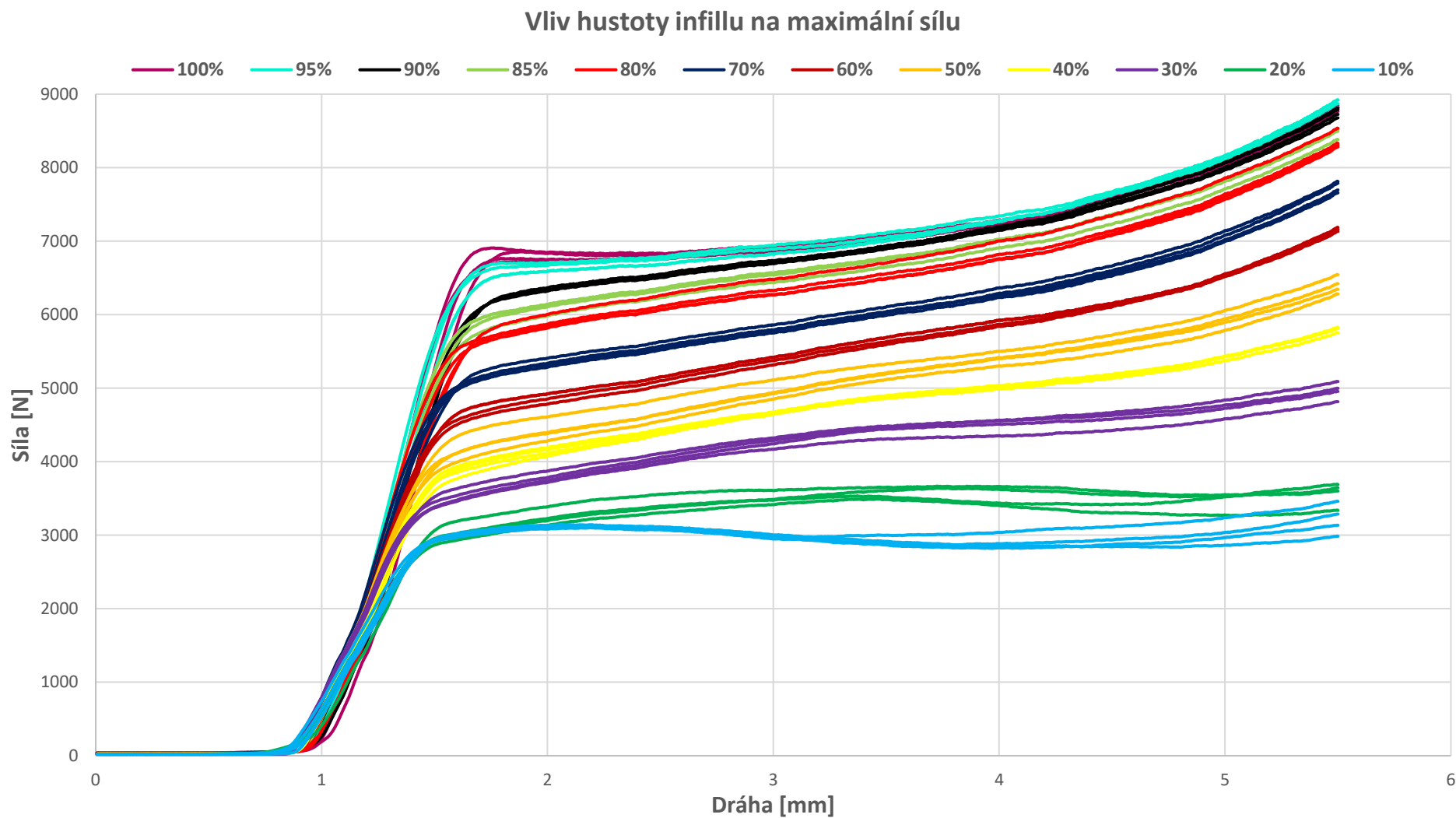
- **Parametry zkoušky:**
 - **Rychlost pohybu horní čelisti:**
 - 5 mm/min
 - **Kritérium ukončení zkoušky:**
 - Dráha 5,5 mm
 - Dosažení síly 60 000 N
 - Pokles síly o 75 %



Obr. 39 - Univerzální zkušební trhací stroj LabTest Model 5.100SP1

Výsledky

V grafech na Obr. 40 a na Obr. 41 jsou vyneseny křivky znázorňující závislost síly na dráze pro každý vzorek. Skupina čtyř vzorků je vždy znázorněna jednou barvou, čímž je možné pozorovat rozptyl hodnot v každé skupině. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 13, Tab. 14 a Tab. 15.



Obr. 40 - Graf vlivu hustoty infillu na průběh síly

Tab. 13 - Naměřené hodnoty ze zkoušky tlakem (vliv hustoty infillu)

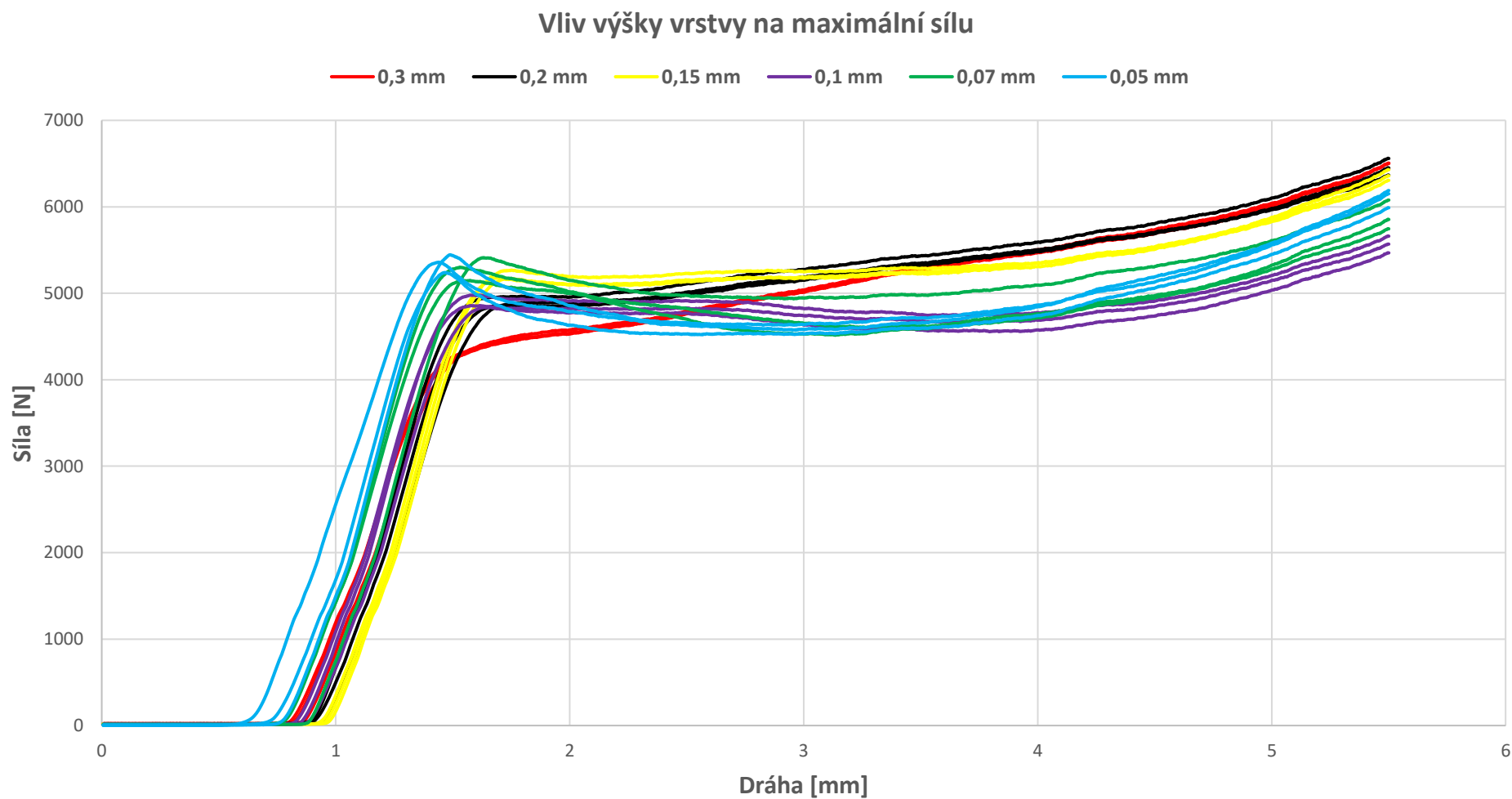
Vzorek	Hmotnost [g]	Výška [mm]	Infill [%]	Typ infillu	Síla [N]	Pokles síly oproti referenčnímu vzorku č. 44 [%]
1	0,78	10	10	gyroid	3461,7	157,7
2	0,78	10,01			3116,1	186,3
3	0,78	10,02			3288,1	171,3
4	0,78	10,04			3144,5	183,7
5	0,81	9,97	20	přímočarý	3493,3	155,3
6	0,81	10,01			3692,6	141,6
7	0,82	10,02			3644	144,8
8	0,83	9,99			3666,9	143,3
9	0,92	10,02	30	plástev	5091	75,2
10	0,91	10,04			4817	85,2
11	0,91	10,03			4958,9	79,9
12	0,91	10,02			4999,9	78,4
13	0,97	10,01	40	plástev	5829	53,0
14	0,96	10			5754,8	55,0
15	0,97	10			5814,3	53,4
16	0,96	10			5816,4	53,4
17	1,02	10,02	50	plástev	6546,2	36,3
18	1,01	10,02			6422,3	38,9
19	1,00	10,03			6283,1	42,0
20	1,00	10,02			6346,5	40,6
21	1,06	10,01	60	plástev	7267,8	22,7
22	1,05	10,02			7187,1	24,1
23	1,05	10			7131,4	25,1
24	1,06	10			7156,5	24,6
25	1,09	10,01	70	plástev	7814,8	14,1
26	1,09	10,01			7788,6	14,5
27	1,09	10,01			7659,8	16,5
28	1,09	10,05			7695,8	15,9
29	1,14	9,98	80	plástev	8535,8	4,5
30	1,13	9,98			8333,3	7,0
31	1,12	10,01			8307,7	7,4
32	1,12	10,01			8282	7,7
33	1,14	10,02	85	plástev	8413,6	6,0
34	1,14	10,03			8498,2	5,0
35	1,14	10,03			8384,1	6,4
36	1,15	10,04			8516,7	4,7

Tab. 14 - Naměřené hodnoty ze zkoušky tlakem (vliv hustoty infillu) - pokračování

Vzorek	Hmotnost [g]	Výška [mm]	Infill [%]	Typ infillu	Síla [N]	Pokles síly oproti referenčnímu vzorku č. 44 [%]
37	1,15	9,97	90	plástev	8809,9	1,3
38	1,15	9,97			8728,5	2,2
39	1,16	9,99			8788,6	1,5
40	1,15	10,01			8676,1	2,8
41	1,17	10,03	95	plástev	8868,8	0,6
42	1,17	10,02			8813,7	1,2
43	1,17	10,02			8872,1	0,5
44 – ref.	1,16	10,03			8920,1	0,0
45	1,16	10	100	přímočarý	8825,7	1,1
46	1,17	10			8765,1	1,8
47	1,17	10,02			8847,5	0,8
48	1,17	10,03			8823,5	1,1

Zhodnocení vlivu hustoty infillu na mechanické vlastnosti

V první části byl zkoumán vliv hustoty infillu na mechanické vlastnosti. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při 95 % infillu typu plástev. Nejvyšší síla byla vynaložena na stlačení vzorku č. 44. Tento vzorek byl zvolen jako referenční a od něj byl vypočítaný procentuální pokles síly u ostatních vzorků. Z Tab. 14 vyplývá, že u vzorků č. 37 až 48 (90 %, 95 % a 100 % infill) se maximální dosažená síla pohybuje pouze v rozmezí od 0,5 % až 2,8 % od referenčního vzorku. U nižších hustot infillu se rozdíl pohybuje od 4,7 % do 186,3 %. Tento pokles síly je zaznamenán v grafu na Obr. 42 V grafu je vidět značný skok mezi 20 % a 30 % infillem a následně mezi 70 % a 80 %.



Obr. 41 - Graf vlivu výšky vrstvy na průběh síly

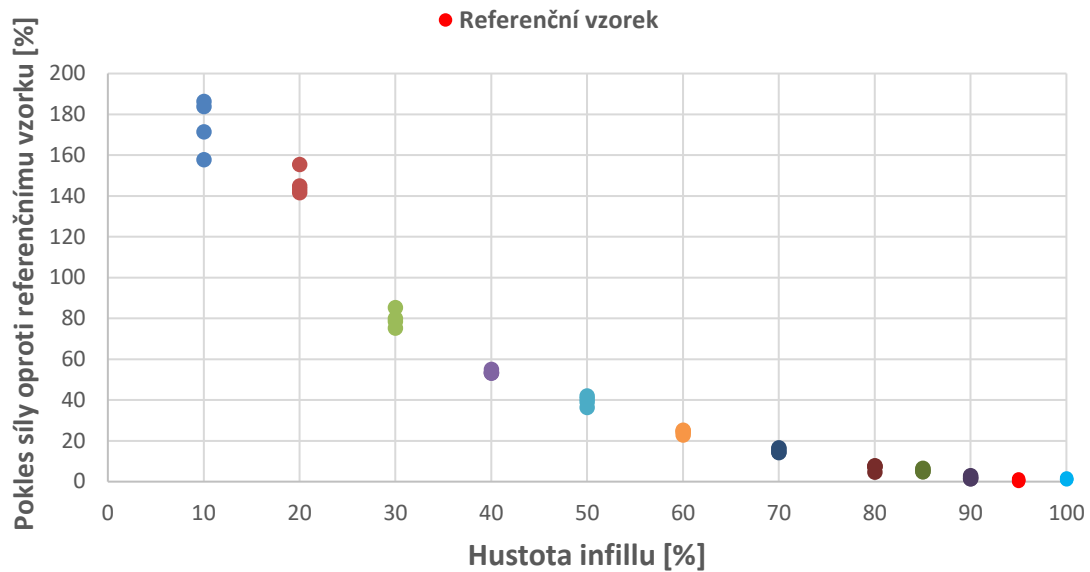
Tab. 15 - Naměřené hodnoty ze zkoušky tlakem (vliv výšky vrstvy)

Vzorek	Výška vrstvy [mm]	Výška vzorku [mm]	Hmotnost [g]	Síla [N]	Pokles síly oproti referenčnímu vzorku č. E3 [%]
A1	0,05	9,96	0,97	6189,3	6,0
A2	0,05	9,96	0,96	5990,6	9,5
A3	0,05	9,96	0,97	6152,1	6,7
B1	0,07	9,95	0,98	5856,8	12,0
B2	0,07	9,96	0,97	5747,1	14,2
B3	0,07	9,95	0,98	6078,5	8,0
C1	0,1	9,95	0,97	5468,7	20,0
C2	0,1	9,96	0,97	5569,2	17,8
C3	0,1	9,95	0,98	5663,1	15,9
D1	0,15	9,87	1,02	6430	2,1
D2	0,15	9,9	1,02	6308,3	4,0
D3	0,15	9,91	1,03	6360,7	3,2
E1	0,2	9,94	1,02	6452,4	1,7
E2	0,2	9,96	1,02	6366,7	3,1
E3 – ref.	0,2	9,95	1,03	6562,1	0,0
F1	0,3	10,03	1,02	6503,7	0,9
F2	0,3	10,04	1,01	6438,2	1,9
F3	0,3	10,02	1,02	6506,4	0,9

Zhodnocení vlivu výšky vrstvy na mechanické vlastnosti

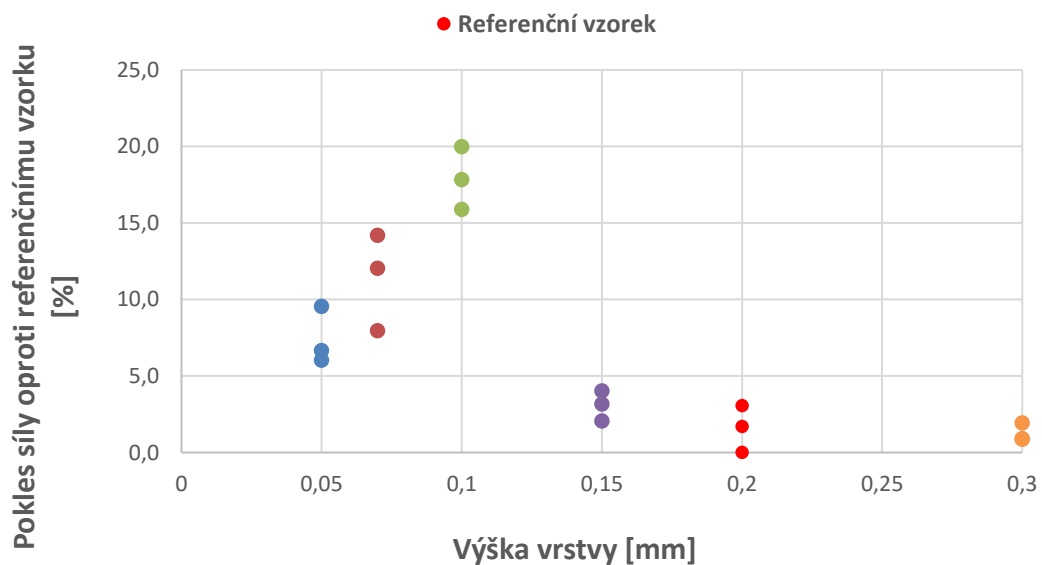
Ve druhé části byl zkoumán vliv výšky vrstvy na mechanické vlastnosti. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u jednoho vzorku s výškou vrstvy 0,2 mm. Ovšem zbylé dva vzorky z této skupiny vykazovaly rozdíl maximální dosažené síly až 3,1 %. Oproti tomu vzorky s výškou vrstvy 0,3 mm vykazovaly konstantnější hodnoty s rozdílem pouze 0,9 % až 1,9 %. Pokles síly oproti referenčnímu vzorku je pro všechny vzorky zaznamenán v grafu na Obr. 43. Nakonec jsou na Obr. 44 zobrazeny zdeformované vzorky po zkoušce tlakem.

Vliv hustoty infillu na maximální sílu



Obr. 42 - Graf závislosti poklesu síly od referenčního vzorku na hustotě infillu (zkouška tlakem)

Vliv výšky vrstvy na maximální sílu



Obr. 43 – Graf závislosti poklesu síly od referenčního vzorku na výšce vrstvy (zkouška tlakem)



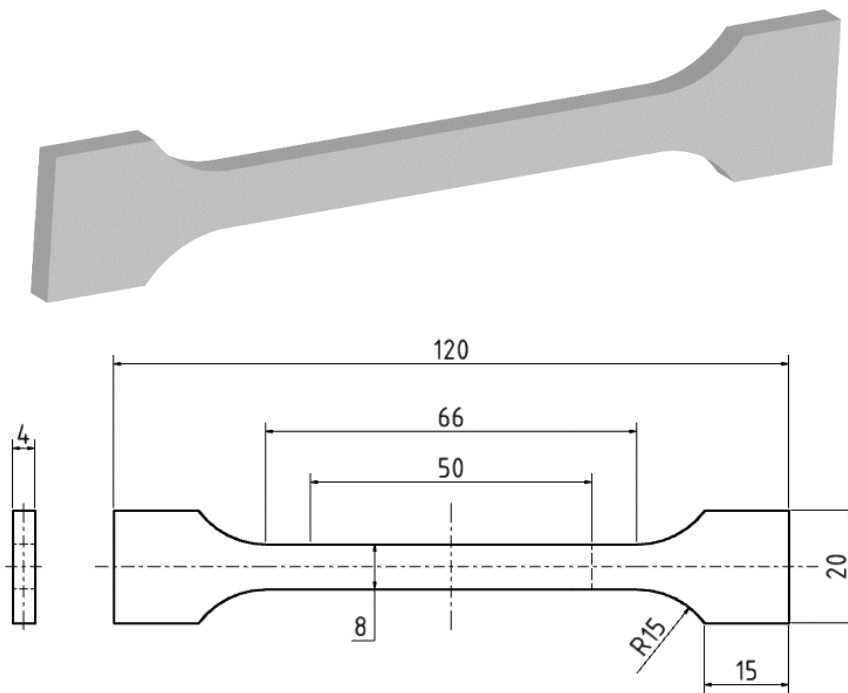
Obr. 44 – Zdeformované vzorky po zkoušce tlakem

8.2 Zkouška tahem

O zkoušce tahem byly uvedeny informace v kapitole 5.1 V první řadě je potřeba navrhnout zkušební těleso, dále zvolit proměnlivé a fixní parametry a následně vytisknout zkušební tělesa. Při této zkoušce bude využit systém ARAMIS, proto je potřeba vytištěné vzorky opatřit patternem. Poté je možné provést samotnou zkoušku. Na závěr budou získané výsledky zhodnoceny.

8.2.1 Návrh zkušebního tělesa

Zkušební těleso pro tuto zkoušku bylo zvoleno v obvyklém tvaru „psí kosti“. Rozměry tělesa jsou uvedeny na Obr. 45.



Obr. 45 – Zkušební těleso pro zkoušku tahem (nahore 3D model, dole výkres)

8.2.2 Návrh parametrů

V této zkoušce je navrženo 27 vzorků tvořících devět skupin po třech. Vzorky se od sebe liší hustotou a typem infillu a orientací vzorku na tiskové podložce. V Tab. 16 jsou uvedeny proměnlivé parametry tisku. Dále v Tab. 17 jsou uvedeny fixní parametry tisku.

Tab. 16 - Proměnlivé parametry tisku pro zkoušku tahem

Vzorky	Typ infillu	Hustota infillu [%]	Orientace tisku
A1-A3	trojúhelníky	50	ve stoje
B1-B3			na hraně
C1-C3			na plocho
1-3	přímočarý	100	ve stoje
4-6		50	
7-9		100	na hraně
10-12		50	
13-15		100	na plocho
16-18		50	

Tab. 17 - Fixní parametry tisku pro zkoušku tahem

Parametr	Nastavení
Filament	PLA
Tiskárna	Ender 3 PRO
Teplota hotendu	210 °C
Teplota podložky	60 °C
Výška vrstev	0,30 mm
Počet perimetrů	3

8.2.3 Realizace experimentu

Po navržení všech parametrů je možné přistoupit k realizaci samotného experimentu.

3D tisk

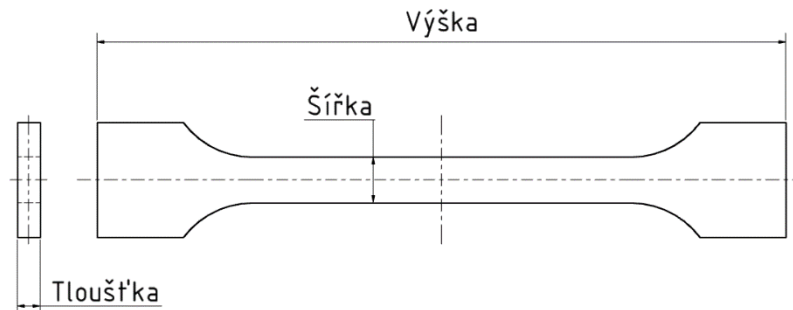
Po nastavení všech parametrů v programu PrusaSlicer je vyexportován G-Code. Ten je pomocí přenosového média (flash disku) vložen do 3D tiskárny Ender 3 PRO. Na Obr. 46 jsou zobrazeny první vytištěné vzorky.



Obr. 46 - Vytištěné vzorky pro zkoušku tahem

Měření charakteristik

Po vytištění všech vzorků následuje jejich označení a změření charakteristik. U vzorků pro zkoušku tahem byla změřena jejich výška, šířka, tloušťka a dále byly všechny vzorky zváženy. Kontrolované rozměry jsou zobrazeny na Obr. 47.



Obr. 47 - Kontrolované rozměry na zkušebním tělese pro zkoušku tahem

Aplikace patternu

V kapitole 6 byl popsán systém ARAMIS. Pro jeho použití je potřeba opatřit vzorek patternem. Vzorky byly vytištěny z černého filamentu, proto bylo potřeba je v první řadě nastříkat na bílo. K tomu byl využit akrylový sprej bílé barvy od výrobce MoTip (viz. Obr. 48). Po zaschnutí bílé vrstvy byl na vzorek přerušovanou aplikací nanesen černý vzor. K tomu byl použit opět akrylový sprej, tentokrát černé barvy od stejného výrobce (viz. Obr. 48). Na Obr. 49 jsou zobrazeny vzorky s naneseným patternem.



Obr. 48 - Akrylový sprej od výrobce MoTip (vlevo bílý, vpravo černý)



Obr. 49 – Zkušební tělesa pro zkoušku tahem opatřena černobílým patternem

Kalibrace systému ARAMIS

Na Obr. 50 je zobrazen kamerový systém ARAMIS. Před zahájením zkoušky byl tento systém zkalibrován. Při kalibraci je potřeba zaměřit dvojici kamer tak, aby sledovaly stejný bod (respektive fazetu).



Obr. 50 - Kamerový systém ARAMIS

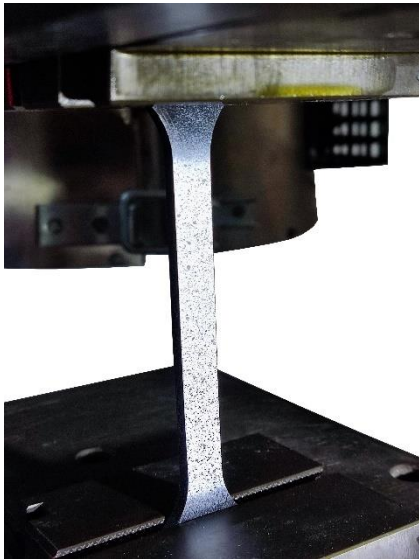
Zkouška

Nyní jsou vzorky připravené pro samotnou zkoušku tahem. Ta bude probíhat na stejném univerzálním zkušebním trhacím stroji LabTest Model 5.100SP1 (viz Obr. 39), jako probíhala zkouška tlakem. Zkušební těleso se upne do obou čelistí (viz. Obr. 51). Pro měření prodloužení je použit laserový průtahoměr LE-05. Na zkušební těleso se umístí dva reflexní pásy, v jejichž rovině je veden laserový paprsek. Z průtahoměru je odečten rozměr L0 udávající vzdálenost mezi pásy. Následně se nastaví parametry zkoušky.

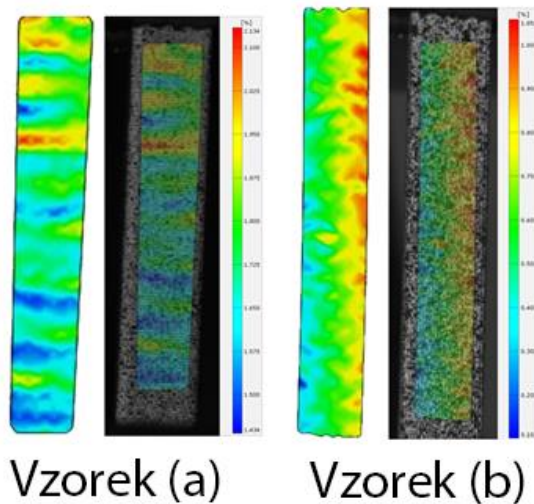
Po zahájení zkoušky se horní čelist začne pohybovat ve směru nahoru, přičemž působí na vzorek tahovou silou. Po dosažení kritéria pro ukončení zkoušky se pohyb zastaví. Následně je vzorek vyjmut a horní čelist se pomocí rychloposuvu vrátí zpět do výchozí polohy. Z každé provedené zkoušky je automaticky vytvořen protokol a textový soubor, kde jsou zaznamenány hodnoty času, dráhy, síly a protažení. Na Obr. 52 jsou zobrazeny dva vzorky sledované systémem ARAMIS. Vzorek (a) byl při tisku orientován „ve stoje“ (rovina tisku je kolmá na směr působení zatěžující síly). Na vzorku je možné pozorovat vodorovné deformační pásy. Naopak vzorek (b) byl při tisku orientován „na hraně“ (rovina tisku je

rovnoběžná se směrem působení zatěžující síly). Na tomto vzorku je možné pozorovat svislé deformační pásy.

- **Parametry zkoušky:**
 - **Rychlost pohybu horní čelisti:**
 - 2 mm/min
 - **Kritérium ukončení zkoušky:**
 - Dosažení síly 90 000 N
 - Pokles síly o 65 %



Obr. 51 - Upnuté zkušební těleso při zkoušce tahem



Obr. 52 – Ukázka výsledků ze systému ARAMIS

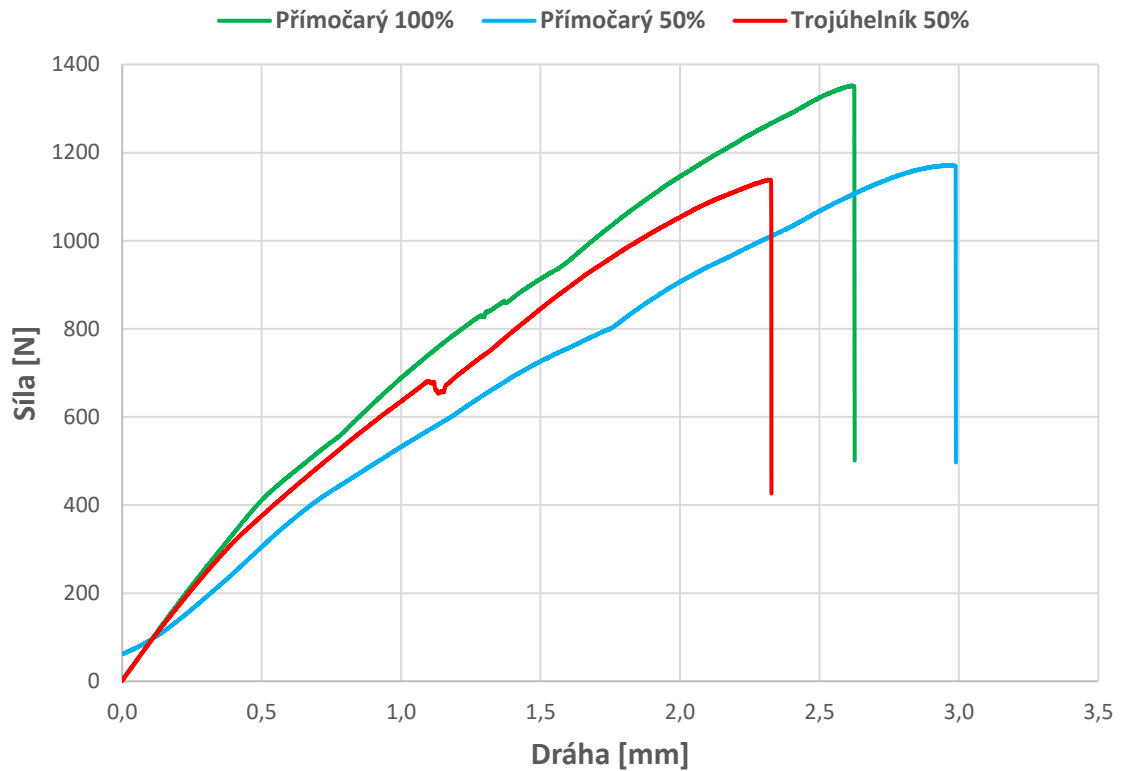
Výsledky

Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 18. Byly vytvořeny celkem čtyři grafy znázorňující průběh síly na dráze. Pro každou orientaci dílu na tiskové podložce byl vytvořen samostatný graf (viz. Obr. 53, Obr. 54, Obr. 55). Pro přehlednost je v grafu z každé skupiny vzorků zobrazen pouze vzorek s nejlepším výsledkem. Následně je z každého z těchto tří grafů vybrán vzorek s reprezentativní hustotou a typem infillu a tyto vzorky jsou spolu vzájemně porovnány pro zjištění optimální orientace (viz. Obr. 56).

Tab. 18 - Naměřené hodnoty ze zkoušky tahem

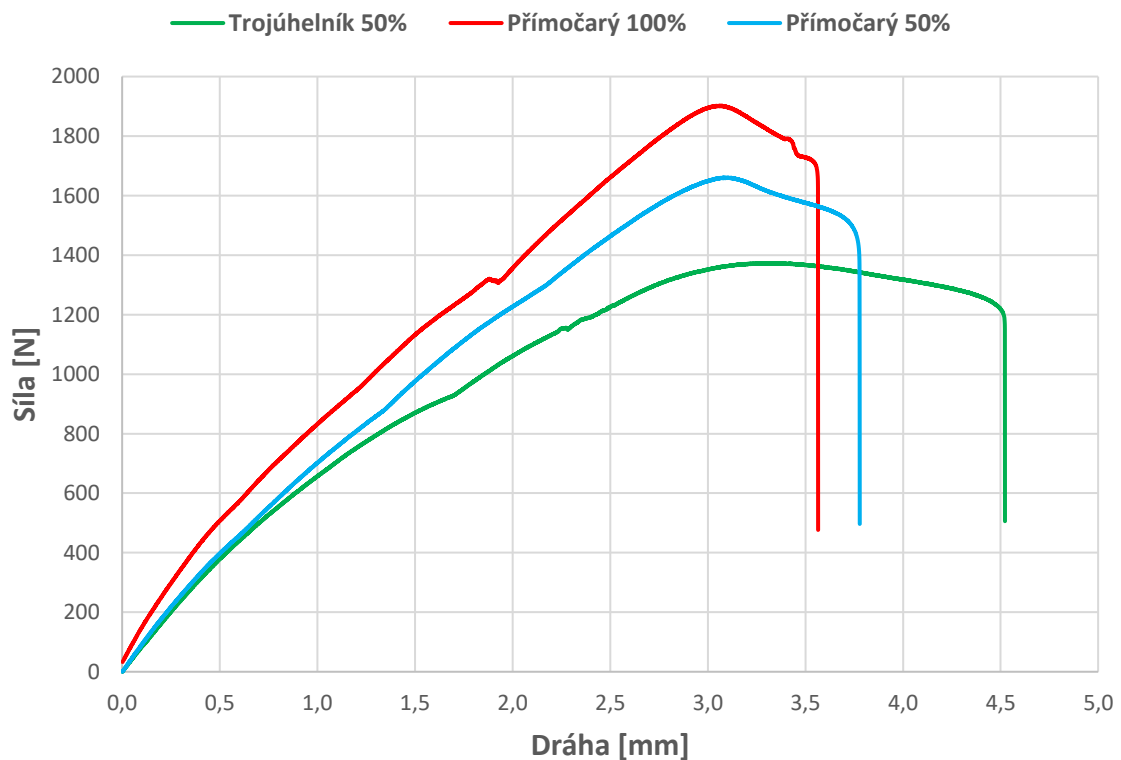
Vzorek	Hmotnost [g]	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Výška [mm]	Infill [%]	Typ infillu	Orientace tisku	L0 [mm]	Síla [N]	Pokles síly oproti referenčnímu vzorku č. 8 [%]
A1	6,47	8,19	4,02	120,09	50	trojúhelník	ve stoje	50,35	766,8	149,2
A2	6,04	8,2	4,06	120,06				50,5	706,2	170,6
A3	5,97	8,16	4,07	120,09				50,09	682,8	179,8
B1	5,94	8,7	3,99	120,04	50	trojúhelník	na hraně	50,58	1518	25,9
B2	5,92	8,92	4,03	119,96				51,05	1558,2	22,6
B3	6,55	8,45	4,11	120,01				50,04	1358,2	40,7
C1	5,53	8,4	3,96	120,15	50	trojúhelník	na plocho	49,92	1329	43,8
C2	5,5	8,31	3,95	120,25				56,71	1369,3	39,5
C3	5,5	8,39	3,96	120,05				50,84	1342,6	42,3
1	6,56	8,2	4,1	120,04	100	přímočarý	ve stoje	49,91	1184,4	61,3
2	6,63	8,01	4,29	120,23				50,16	1116,1	71,2
3	6,62	8,24	4,12	120,2				50,68	1352,4	41,3
4	5,91	7,99	4,28	120,07	50	přímočarý	ve stoje	50,28	853,1	124,0
5	5,82	7,99	4,26	120,25				50,15	1171,8	63,1
6	5,8	8,15	4,07	120,06				49,89	977,5	95,5
7	6,68	8,53	4,03	120,14	100	přímočarý	na hraně	50,27	1835	4,1
8 – ref.	6,67	8,51	4,03	120,12				50,02	1910,8	0,0
9	6,69	8,51	4,03	120,15				50,98	1585,5	20,5
10	5,89	8,43	3,99	120,05	50	přímočarý	na hraně	50,22	1607,4	18,9
11	5,88	8,4	3,97	120,09				50,75	1630,8	17,2
12	5,89	8,4	3,98	120,04				50,69	1780,9	7,3
13	6,64	8,37	3,97	120,35	100	přímočarý	na plocho	49,14	1583,3	20,7
14	6,65	8,44	4	120,4				50,11	1799,4	6,2
15	6,65	8,38	4	120,57				51,11	1902	0,5
16	5,56	8,3	4,01	120,28	50	přímočarý	na plocho	50	1538,1	24,2
17	5,54	8,29	4	120,25				50,84	1586,6	20,4
18	5,55	8,31	4,02	120,32				50,2	1570,8	21,6

Zkouška tahem - orientace "ve stoje"



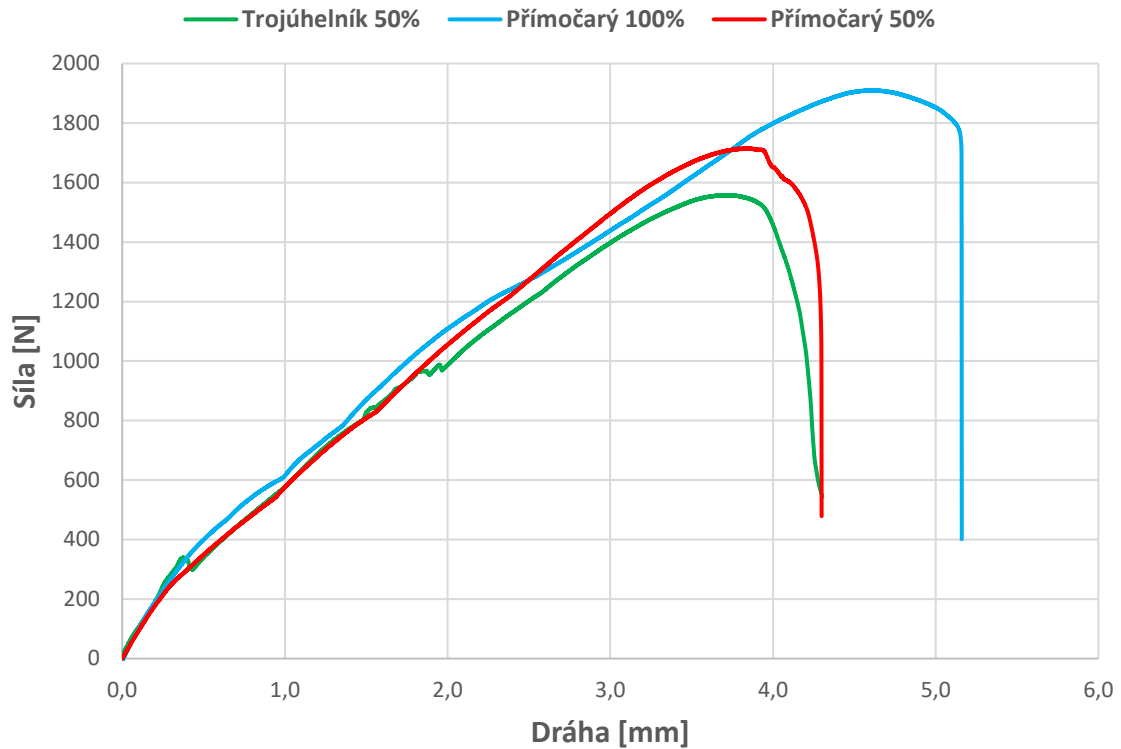
Obr. 53 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce tahem (orientace "ve stoje")

Zkouška tahem - orientace "na plocho"



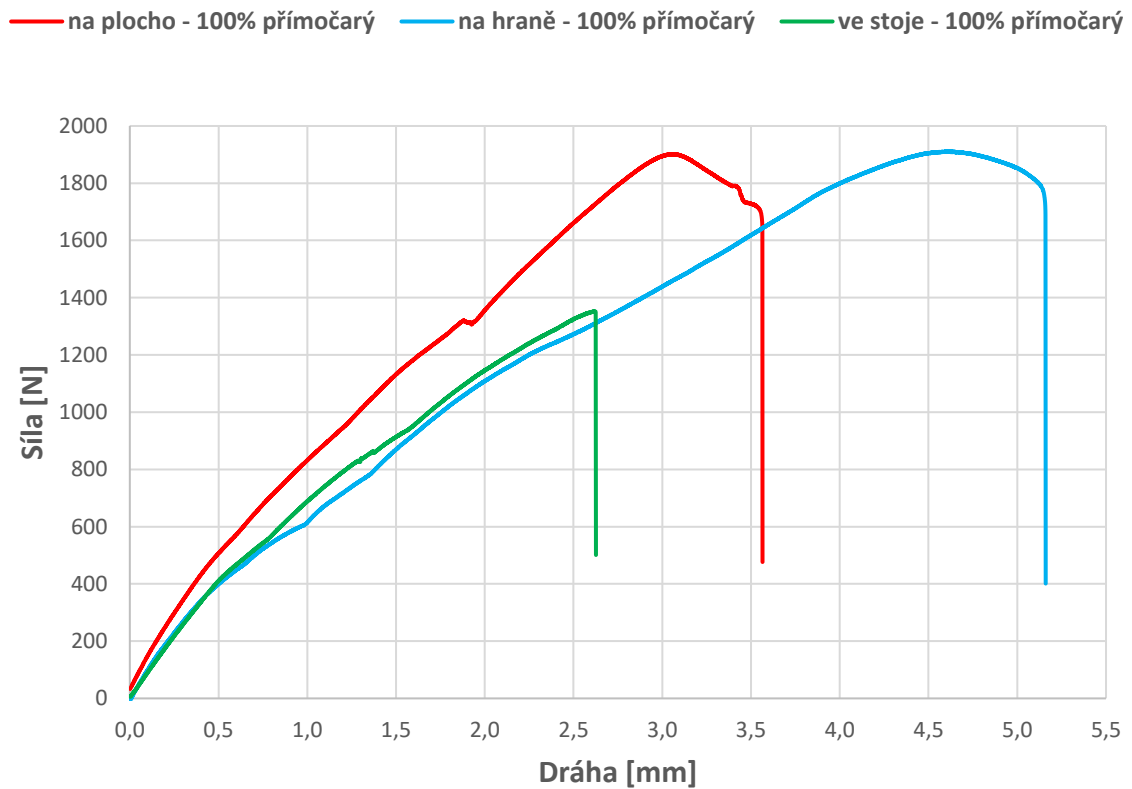
Obr. 54 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce tahem (orientace "na plocho")

Zkouška tahem - orientace "na hraně"



Obr. 55 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce tahem (orientace "na hraně")

Zkouška tahem - porovnání orientací tisku



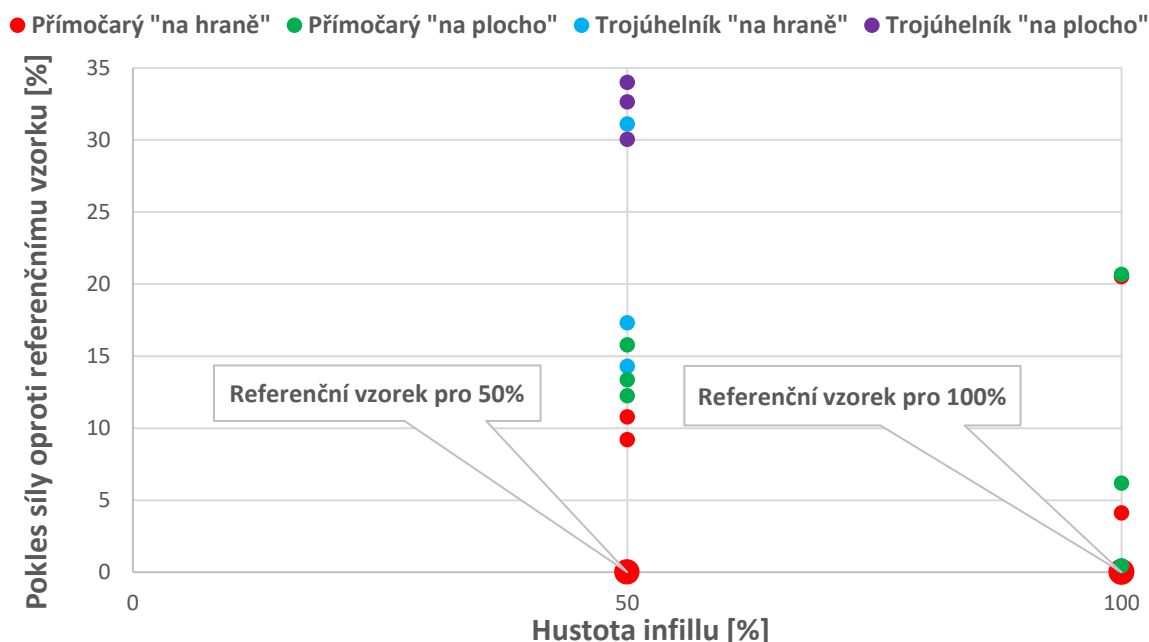
Obr. 56 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce tahem (porovnání orientací)

Zhodnocení výsledků zkoušky tahem

Při této zkoušce byl zkoumán vliv hustoty a typu infillu a orientace dílu na tiskové podložce na mechanické vlastnosti. Zkouška byla provedena na 27 vzorcích. Nejlepší hodnoty vykazoval vzorek č. 8 (100 % infill, přímočarý, „na hraně“) a byl tedy zvolen jako referenční. Od něj byl následně vypočítán procentuální pokles síly u ostatních vzorků (uvedeno v Tab. 18). V grafu na Obr. 56 jsou porovnány reprezentativní vzorky z každé orientace. Nejlépe dopadla orientace dílu na tiskové podložce „na hraně“. Tato orientace dosáhla nejvyšší maximální síly a zároveň i nejvyšší tažnosti.

Pro lepší znázornění rozdílů mezi jednotlivými vzorky, byl vybrán také nejlepší vzorek s 50 % infillem, což je vzorek č. 12. Společně se vzorkem č. 8 byly zvoleny jako referenční a byl od nich vypočítán procentuální pokles síly u ostatních vzorků z jejich skupiny. Výsledky jsou zobrazeny v grafu na Obr. 57. Pro lepší zobrazení byly z grafu odstraněny vzorky s orientací „ve stoje“, neboť dosahovaly zdaleka nejhorších hodnot. Z grafu vyplývá, že hodnoty vzorků ze stejné skupiny se od sebe liší i o 20 %. Tyto výsledky mohou být způsobeny kvalitou tisku.

Vliv hustoty, typu infillu a orientace dílu na maximální sílu



Obr. 57 - Graf závislosti poklesu síly od referenčního vzorku na parametrech tisku (zkouška tahem)

Na Obr. 58 jsou zobrazeny vzorky po zkoušce tahem. Vzorky (a) a (b) byly orientovány na tiskové podložce „na plocho“. Důvod, proč jsou vzorky přetrženy na různých místech může být dán kvalitou tisku. Při tisku je vytištěn vždy jeden řez pro všechny vzorky na tiskové podložce, přičemž mohou vznikat větší nepřesnosti v tisku, než kdyby byl vytvářen vždy pouze jeden vzorek. Vzorek (c) byl orientován na tiskové podložce „ve stoje“ a přetrhl se, jakmile byla porušena soudržnost dvou sousedících vrstev. Poslední vzorek (d) byl orientován na tiskové podložce „na hraně“. Na tomto vzorku je patrné, jak docházelo k jeho prodlužování (natahování vláken). Tento fakt koreluje s výsledky z grafu na Obr. 56.



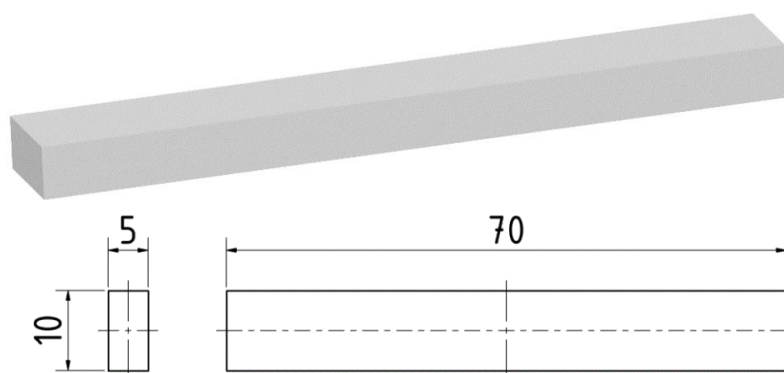
Obr. 58 - Vzorky po zkoušce tahem

8.3 Zkouška třibodovým ohybem

O zkoušce třibodovým ohybem byly uvedeny informace v kapitole 5.2. V první řadě je potřeba navrhnout zkušební těleso, dále zvolit proměnlivé a fixní parametry, následně vytisknout zkušební tělesa a provést samotnou zkoušku. Na závěr budou získané výsledky zhodnoceny.

8.3.1 Návrh zkušebního tělesa

Jako zkušební těleso pro tuto zkoušku byl zvolen kvádr, jehož rozměry jsou uvedeny na Obr. 59.



Obr. 59 - Zkušební těleso pro zkoušku třibodovým ohybem (nahore 3D model, dole výkres)

8.3.2 Návrh parametrů

V této zkoušce je navrženo 33 vzorků tvořících jedenáct skupin po třech. Vzorky se od sebe liší hustotou a typem infillu, orientací vzorku na tiskové podložce a pro porovnání i barvou použitého filamentu od stejného výrobce. V Tab. 19 jsou uvedeny fixní parametry tisku. Dále v Tab. 20 jsou uvedeny proměnlivé parametry tisku.

Tab. 19 - Fixní parametry tisku pro zkoušku třibodovým ohybem

Parametr	Nastavení
Filament	PLA
Tiskárna	Ender 3 PRO
Teplota hotendu	210 °C
Teplota podložky	60 °C
Výška vrstev	0,30 mm
Počet perimetrů	3

Tab. 20 - Proměnlivé parametry tisku pro zkoušku tříbodovým ohybem

Vzorky	Typ infillu	Hustota infillu [%]	Orientace tisku	Barva filamentu
1-3	přímočarý	100	na plocho	černá
4-6			na hraně	
7-9			ve stoje	
10-12		50	na plocho	červená
13-15			100	
16-18		50	ve stoje	
19-21	plástev			
22-24				
25-27	přímočarý	100	na hraně	
28-30				50
31-33		100		

8.3.3 Realizace experimentu

Po navržení všech parametrů je možné provést samotný experiment.

3D tisk

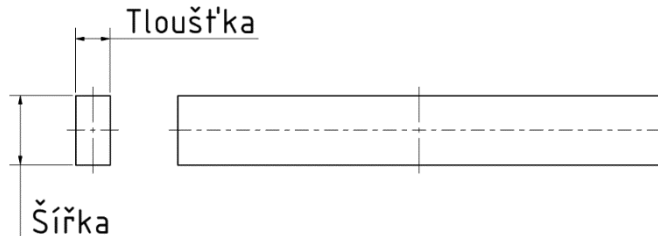
Po nastavení všech parametrů v programu PrusaSlicer je vyexportován G-Code. Ten je pomocí přenosového média (flash disku) vložen do 3D tiskárny Ender 3 PRO. Na Obr. 60 jsou zobrazeny vytištěné vzorky.



Obr. 60 - Vytištěné vzorky pro zkoušku tříbodovým ohybem

Měření charakteristik

Po vytištění všech vzorků následuje jejich označení a změření charakteristik. U vzorků pro zkoušku tříbodovým ohybem byla změřena jejich šířka a tloušťka a dále byly všechny vzorky zváženy. Kontrolované rozměry jsou zobrazeny na Obr. 61.

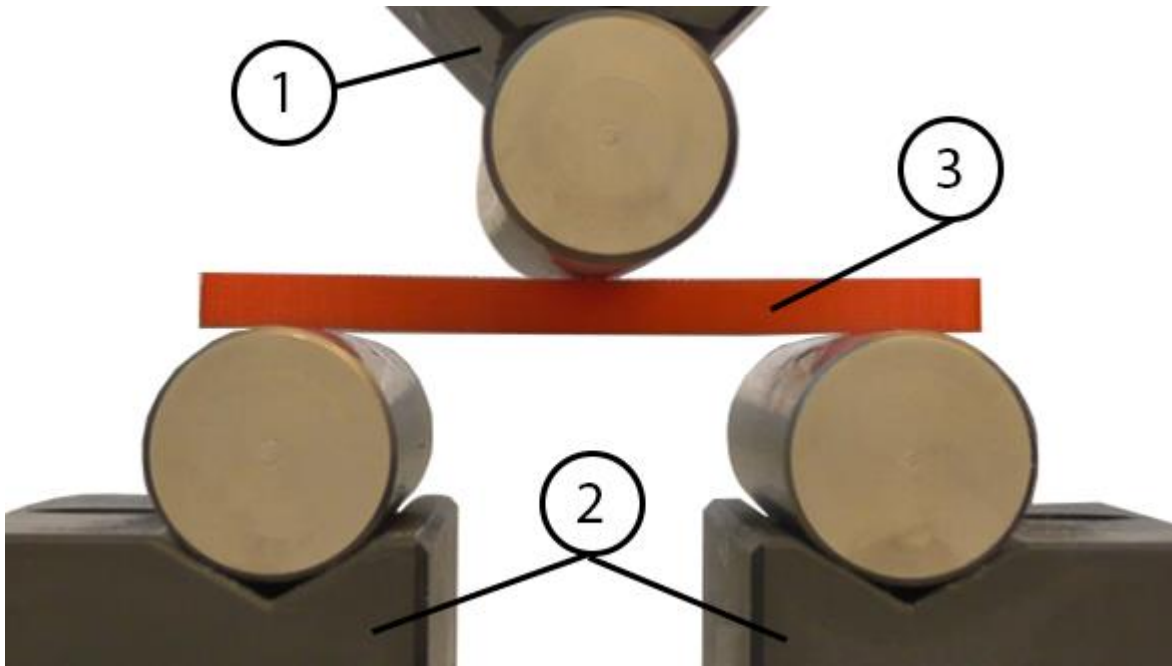


Obr. 61 - Kontrolované charakteristiky na zkušebním tělese pro zkoušku tříbodovým ohybem

Zkouška

Nyní jsou vzorky připravené pro samotnou zkoušku tříbodovým ohybem. Ta bude probíhat na zkušebním trhacím stroji LabTest Model 5.100SP1 (viz. Obr. 39). Zkušební těleso se umístí na dvě podpěry ve tvaru válců. Následně se nastaví parametry zkoušky. Po zahájení zkoušky se horní čelist začne pohybovat ve směru dolů, přičemž působí na vzorek tlakovou silou. Vzhledem k tomu, že je těleso podepřeno dvěma podpěrami a uprostřed působí síla z horní čelisti, dochází zde k ohybovému namáhání. Po dosažení kritéria pro ukončení zkoušky se pohyb zastaví. Následně se horní čelist pomocí rychloposuvu vrátí zpět do výchozí polohy. Z každé provedené zkoušky je automaticky vytvořen protokol a textový soubor, kde jsou zaznamenány hodnoty času, dráhy a síly. Na Obr. 62 je zobrazeno zkušební těleso (3) umístěné na spodních podpěrách (2) a shora na něj působí silou horní podpěra (1).

- **Parametry zkoušky:**
 - **Rychlost pohybu horní čelisti:**
 - 15 mm/min
 - **Kritérium ukončení zkoušky:**
 - Dosažení síly 50 000 N
 - Pokles síly o 80 %



Obr. 62 - Výchozí poloha pro zkoušku třibodovým ohybem

Výsledky

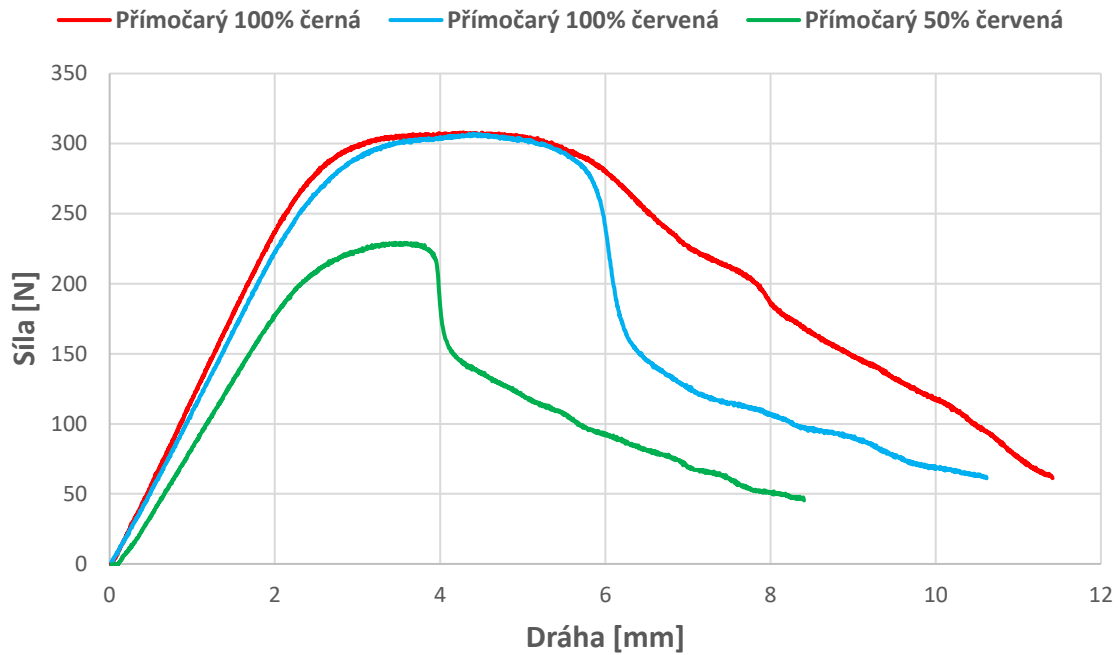
Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 21. Byly vytvořeny celkem čtyři grafy znázorňující průběh síly na dráze. Pro každou orientaci dílu na tiskové podložce byl vytvořen samostatný graf (viz. Obr. 63, Obr. 64, Obr. 65). Pro přehlednost je v grafu z každé skupiny vzorků zobrazen pouze reprezentativní vzorek. Následně je z každého z těchto tří grafů vybrán vzorek s nejvhodnější hustotou a typem infillu a tyto vzorky jsou spolu vzájemně porovnány pro zjištění optimální orientace (viz. Obr. 66).

Tab. 21 - Naměřené hodnoty ze zkoušky tříbodovým ohybem

Vzorek	Hmotnost [g]	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Infill [%]	Typ infillu	Orientace tisku	Síla [N]	Pokles síly oproti ref. vzorku č. 32 [%]
1Č	4,08	9,93	4,93	100	přímočarý	na plocho	300,4	10,42
2Č	4,07	9,94	4,94				308,4	7,56
3Č	4,09	10,09	4,97				307,9	7,73
4Č	4,17	10,08	4,97	100	přímočarý	na hraně	319,3	3,88
5Č	4,19	10,07	5				324,2	2,31
6Č	4,17	10,07	4,99				314,4	5,50
7Č	4,13	10,05	5,04	100	přímočarý	ve stoje	192,7	72,13
8Č	4,13	10	5,05				172	92,85
9Č	4,12	9,99	5,08				181,8	82,45
10	3,93	9,93	5,06	100	přímočarý	na plocho	307,8	7,76
11	3,94	9,88	5,07				308,9	7,38
12	3,94	9,89	4,97				307,3	7,94
13	3,17	9,86	4,91	50	přímočarý	na plocho	229,2	44,72
14	3,12	9,91	4,96				225,4	47,16
15	3,17	9,85	4,9				227,6	45,74
16	3,95	9,96	5,01	100	přímočarý	ve stoje	136,4	143,18
17	3,94	9,97	4,99				131	153,21
18	3,92	10,03	4,95				116,8	183,99
19	3,21	9,98	4,94	50	přímočarý	ve stoje	117,9	181,34
20	3,38	9,96	4,94				103,1	221,73
21	3,26	9,91	4,94				118,4	180,15
22	3,61	9,95	4,93	50	plástev	ve stoje	109,1	204,03
23	3,57	9,94	4,95				102,6	223,29
24	3,72	10,02	4,95				123,3	169,02
25	3,59	9,95	4,94	50	kubický	ve stoje	101,5	226,80
26	3,51	10	5,01				112,4	195,11
27	3,52	10,01	4,91				98,8	235,73
28	3,34	10,02	4,92	50	přímočarý	na hraně	270,7	22,53
29	3,49	9,99	4,94				281,1	18,00
30	3,36	10,01	4,91				269,6	23,03
31	4,04	10,04	4,94	100	přímočarý	na hraně	323,3	2,60
32 – ref.	4,06	10,05	4,96				331,7	0,00
33	4,06	10,02	4,94				312,5	6,14

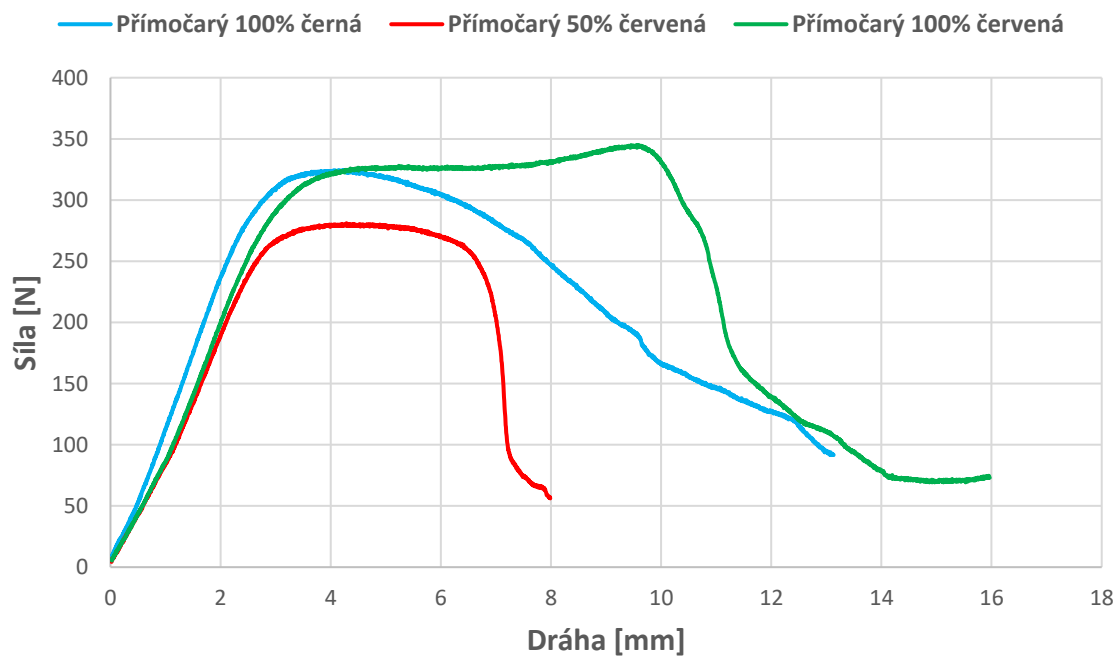
Poznámka: Vzorky s písmenem „Č“ jsou vtištěné z černého filamentu. Vzorky bez písmene jsou vtištěné z červeného filamentu.

Zkouška tříbodovým ohybem - orientace "na plocho"



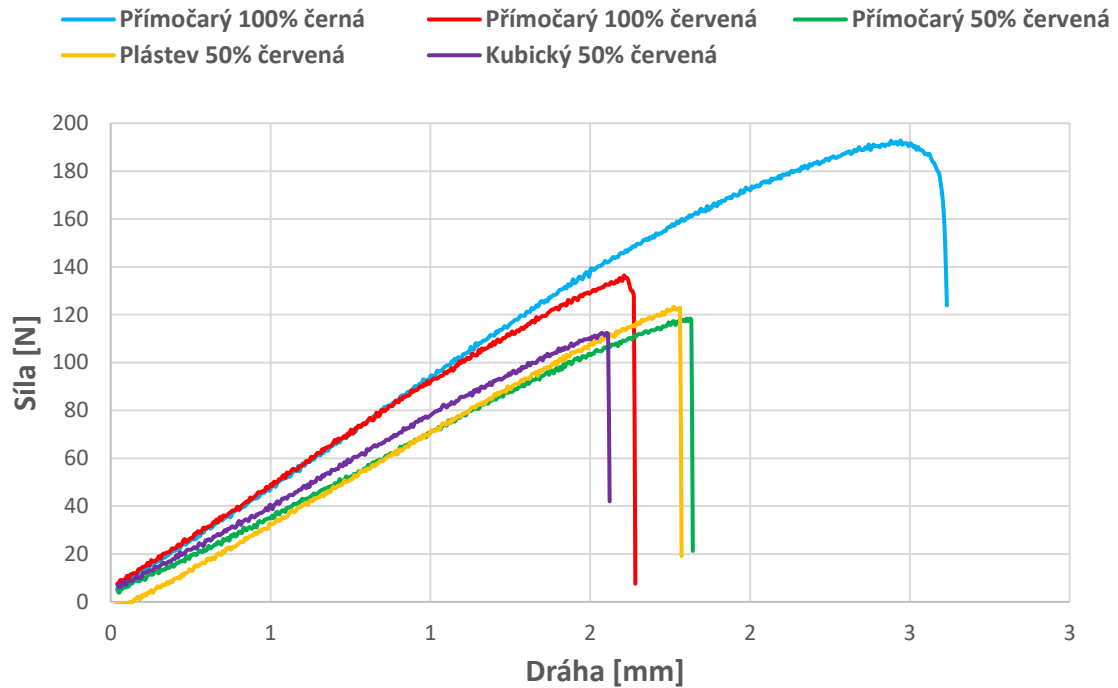
Obr. 63 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce tříbodovým ohybem (orientace "na plocho")

Zkouška tříbodovým ohybem - orientace "na hraně"



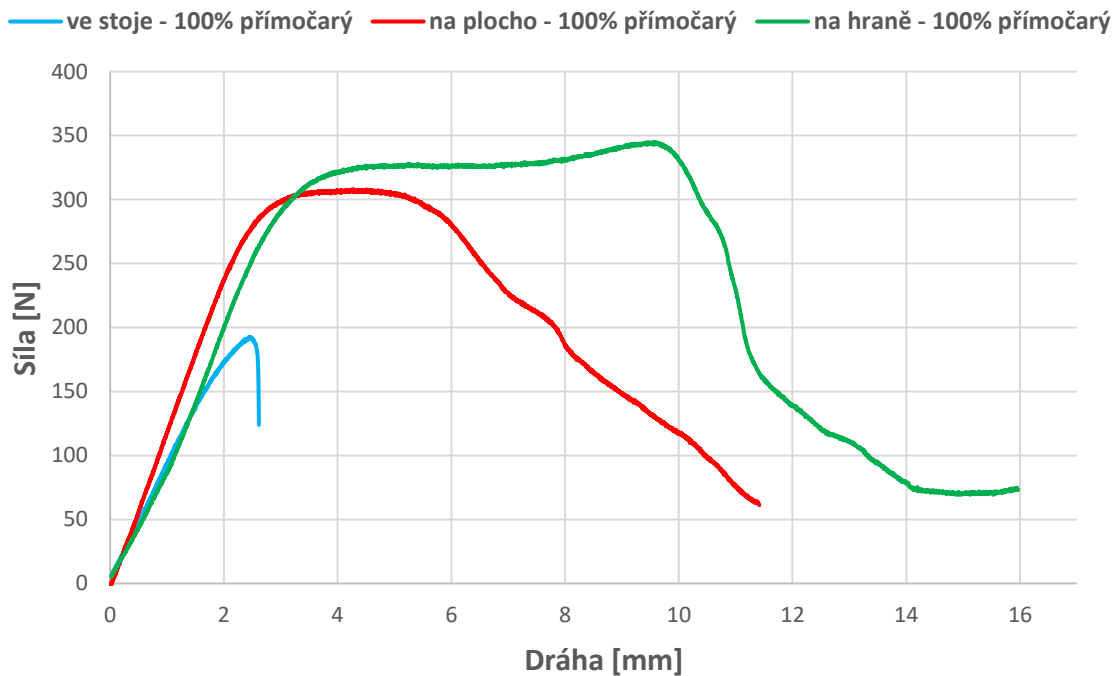
Obr. 64 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce tříbodovým ohybem (orientace "na hraně")

Zkouška třibodovým ohybem - orientace "ve stoje"



Obr. 65 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce třibodovým ohybem (orientace "ve stoje")

Zkouška třibodovým ohybem - porovnání orientací tisku



Obr. 66 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce třibodovým ohybem (porovnání orientací)

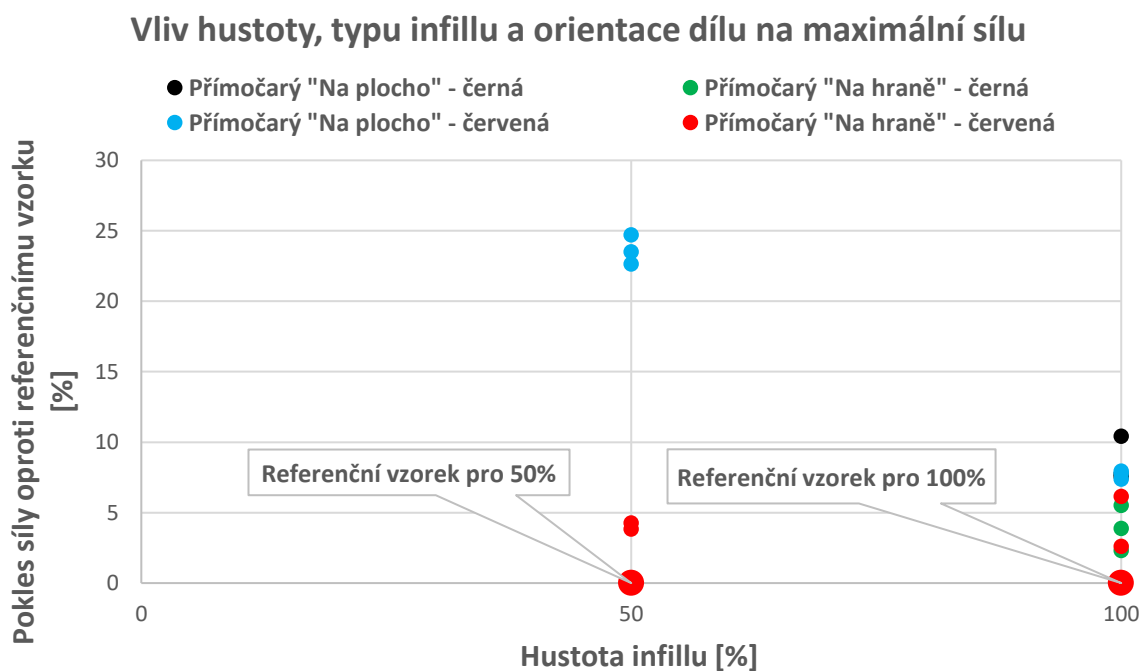
Zhodnocení výsledků zkoušky tříbodovým ohybem

Při této zkoušce byl zkoumán vliv hustoty a typu infillu a orientace dílu na tiskové podložce na mechanické vlastnosti. Zkouška byla provedena na 33 vzorcích. Pro porovnání bylo zjišťováno, zda použití filamentu jiné barvy od stejného výrobce bude mít nějaký vliv na mechanické vlastnosti.

Nejlepší hodnoty vykazoval vzorek č. 32 (100% infill, přímočarý, „na hraně“) a byl tedy zvolen jako referenční. Od něj byl následně vypočítán procentuální pokles síly u ostatních vzorků (uvedeno v Tab. 21). V grafu na Obr. 66 jsou porovnány nejlepší vzorky z každé orientace. Nejlépe dopadla orientace dílu na tiskové podložce „Na hraně“. Tato orientace dosáhla nejvyšší maximální síly a zároveň i nejvyšší protažení.

Pro lepší znázornění rozdílů mezi jednotlivými vzorky, byl vybrán také nejlepší vzorek s 50 % infillem, což je vzorek č. 29. Společně se vzorkem č. 32 byly zvoleny jako referenční, byl od nich vypočítán procentuální pokles síly u ostatních vzorků z jejich skupiny. Výsledky jsou zobrazeny v grafu na Obr. 67. Pro lepší zobrazení byly z grafu vyjmuty vzorky s orientací „Ve stoje“ neboť dosahovaly zdaleka nejhorších hodnot.

Z grafu vyplývá, že u 50 % infillu je rozdíl mezi orientacemi „na hraně“ a „na plocho“ okolo 20 %. Naopak u 100 % infillu je tento rozdíl řádově jednotek procent. Ohledně porovnání červené a černé barvy filamentu je možné konstatovat, že vzorky dosahovaly podobných hodnot. O trochu lepších výsledků bylo dosaženo s červeným filamentem.



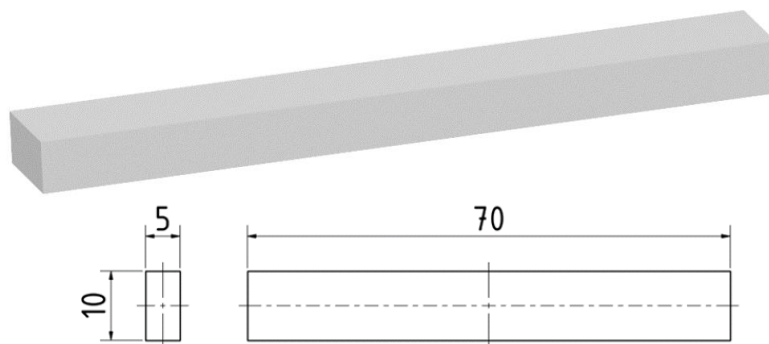
Obr. 67 - Graf závislosti poklesu síly od referenčního vzorku na parametrech tisku

8.4 Zkouška vzpěru

O zkoušce vzpěru byly uvedeny informace v kapitole 5.4. V první řadě je potřeba navrhnout zkušební těleso, dále zvolit proměnlivé a fixní parametry, následně zkušební tělesa vytisknout a provést samotnou zkoušku. Na závěr budou získané výsledky vyhodnoceny.

8.4.1 Návrh zkušebního tělesa

Jako zkušební těleso pro tuto zkoušku byl zvolen kvádr, jehož rozměry jsou uvedeny na Obr. 68.



Obr. 68 - Zkušební těleso pro zkoušku vzpěru (nahore 3D model, dole výkres)

8.4.2 Návrh parametrů

V této zkoušce je navrženo 24 vzorků tvořících osm skupin po třech. Vzorky se od sebe liší hustotou a typem infillu a orientací vzorku na tiskové podložce. V Tab. 22 jsou uvedeny fixní a v Tab. 23 proměnlivé parametry tisku.

Tab. 22 - Fixní parametry tisku pro zkoušku vzpěru

Parametr	Nastavení
Filament	PLA
Tiskárna	Ender 3 PRO
Teplota hotendu	210 °C
Teplota podložky	60 °C
Výška vrstev	0,30 mm
Počet perimetrů	3

Tab. 23 - Proměnlivé parametry tisku pro zkoušku vzpěru

Vzorky	Typ infillu	Hustota infillu [%]	Orientace tisku	
1-3	přímočarý	100	na plocho	
4-6		50		
7-9		100	ve stoje	
10-12	50			
13-15		plástev		
16-18		kubický		
19-21	přímočarý	100		na hraně
22-24				

8.4.3 Realizace experimentu

Po navržení všech parametrů je možné provést samotný experiment.

3D tisk

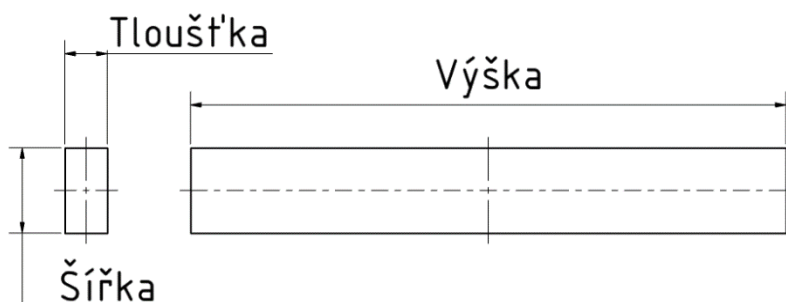
Po nastavení všech parametrů v programu PrusaSlicer je vyexportován G-Code. Ten je pomocí přenosového média (flash disku) vložen do 3D tiskárny Ender 3 PRO. Na Obr. 69 jsou zobrazeny vytištěné vzorky.



Obr. 69 - Vytištěné vzorky pro zkoušku vzpěru

Měření charakteristik

Po vytištění všech vzorků následuje jejich označení a změření charakteristik. U vzorků pro zkoušku vzpěru byla změřena jejich šířka, tloušťka a výška. Dále byly všechny vzorky zváženy. Na Obr. 70 jsou zobrazeny měřené charakteristiky.



Obr. 70 - Kontrolované charakteristiky na zkušebním tělese pro zkoušku vzpěru

Zkouška

Nyní jsou vzorky připravené pro samotnou zkoušku vzpěru. Ta bude probíhat na zkušebním trhacím stroji LabTest Model 5.100SP1 (viz Obr. 71). Zkušební těleso se umístí na spodní čelist univerzálního stroje. Následně se nastaví parametry zkoušky. Po zahájení zkoušky se horní čelist začne pohybovat ve směru dolů, přičemž působí na vzorek tlakovou silou. Výška vzorku je několikanásobně větší než zbylé dva rozměry, těleso se vychýlí a dojde ke vzpěru. Po dosažení kritéria pro ukončení zkoušky se pohyb zastaví. Následně se horní čelist pomocí rychloposuvu vrátí zpět do výchozí polohy. Z každé provedené zkoušky je automaticky vytvořen protokol a textový soubor, kde jsou zaznamenány hodnoty času, dráhy a síly.

Parametry zkoušky:

- **Rychlost pohybu horní čelisti:**
 - 5 mm/min
- **Kritérium ukončení zkoušky:**
 - Dráha 30 mm
 - Dosažení síly 60 000 N
 - Pokles síly o 80 %



Obr. 71 - Průběh zkoušky vzpěru

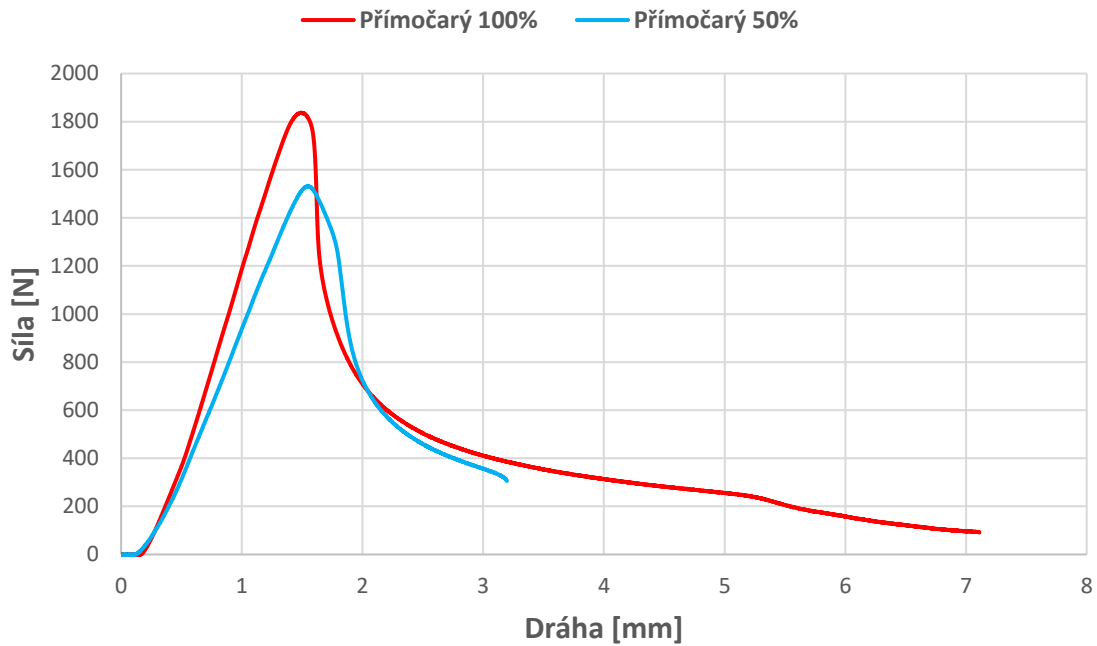
Výsledky

Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 24. Byly vytvořeny celkem čtyři grafy znázorňující průběh síly na dráze. Pro každou orientaci dílu na tiskové podložce byl vytvořen samostatný graf (viz. Obr. 72, Obr. 73, Obr. 74). Pro přehlednost je v grafu z každé skupiny vzorků zobrazen pouze reprezentativní vzorek. Následně je z každého z těchto tří grafů vybrán vzorek s nejvhodnější hustotou a typem infillu a tyto vzorky jsou spolu vzájemně porovnány pro zjištění optimální orientace v grafu (viz. Obr. 75).

Tab. 24 - Naměřené hodnoty ze zkoušky vzpěru

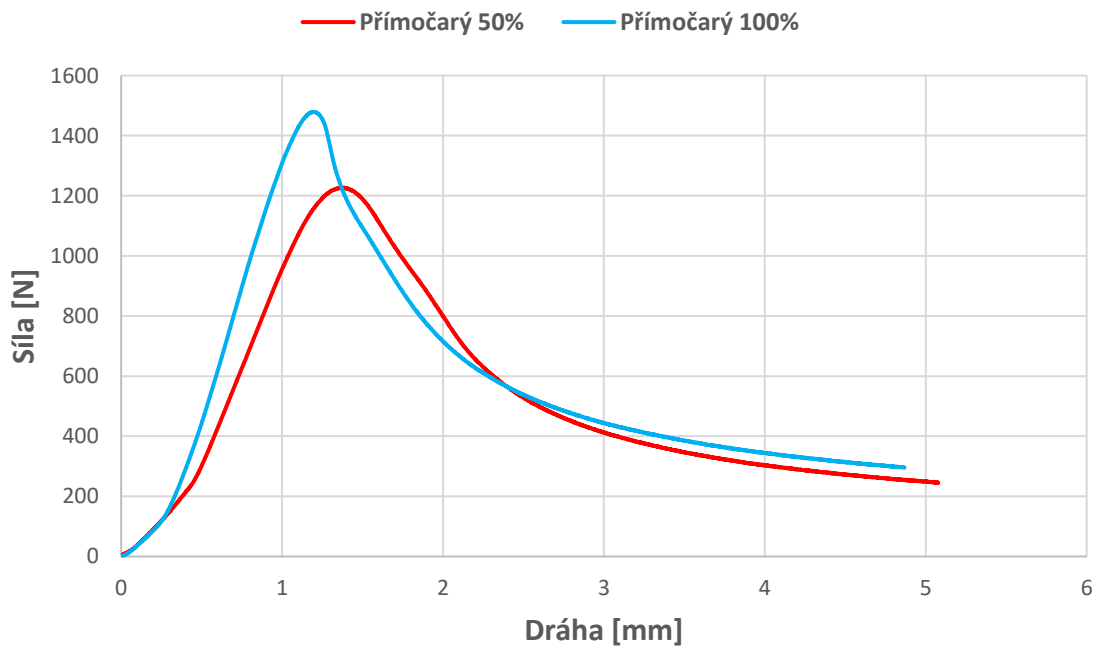
Vzorek	Hmotnost [g]	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Výška [mm]	Infill [%]	Typ výplně	Orientace tisku	Síla [N]	Pokles síly oproti ref. vzorku č. 32 [%]
1	4,02	9,89	4,92	70,03	100	přímočarý	na plocho	1815,9	1,2
2 – ref.	4,02	9,95	4,91	70,09	100	přímočarý	na plocho	1837,2	0,0
3	4,02	9,96	4,92	70,1	100	přímočarý	na plocho	1760,8	4,3
4	3,23	9,91	4,91	70,03	50	přímočarý	na plocho	1328,5	38,3
5	3,19	9,97	4,92	70,04	50	přímočarý	na plocho	1531,5	20,0
6	3,24	9,92	4,9	70,07	50	přímočarý	na plocho	1339,4	37,2
7	4,04	10,02	5,01	70,08	100	přímočarý	ve stoje	1514,1	21,3
8	4,04	10,02	5,02	70,06	100	přímočarý	ve stoje	1408,7	30,4
9	4,02	10,07	5,01	70,08	100	přímočarý	ve stoje	1761,9	4,3
10	3,27	10,01	5,01	70,06	50	přímočarý	ve stoje	1309,9	40,3
11	3,49	10,04	4,97	70,03	50	přímočarý	ve stoje	1306,1	40,7
12	3,35	10,03	4,98	70,06	50	přímočarý	ve stoje	1379,8	33,1
13	3,69	10	5,01	70,06	50	plástev	ve stoje	1460	25,8
14	3,66	10,03	5,03	70,07	50	plástev	ve stoje	1396,7	31,5
15	3,82	9,99	4,99	70,08	50	plástev	ve stoje	1579	16,4
16	3,66	10,01	4,96	70,03	50	kubická	ve stoje	1412,5	30,1
17	3,59	9,98	5	70,07	50	kubická	ve stoje	1469,3	25,0
18	3,61	10,02	5,01	70,08	50	kubická	ve stoje	1299	41,4
19	3,42	10,04	4,97	70,06	50	přímočarý	na hraně	1095,4	67,7
20	3,56	10,01	4,98	70,06	50	přímočarý	na hraně	1190,4	54,3
21	3,43	10,07	4,99	70,01	50	přímočarý	na hraně	1227	49,7
22	4,11	10,05	4,98	70,01	100	přímočarý	na hraně	1312,7	40,0
23	4,13	10,06	4,98	70,02	100	přímočarý	na hraně	1479,1	24,2
24	4,13	10,05	4,97	70,04	100	přímočarý	na hraně	1322,5	38,9

Zkouška vzpěru - orientace "na plocho"



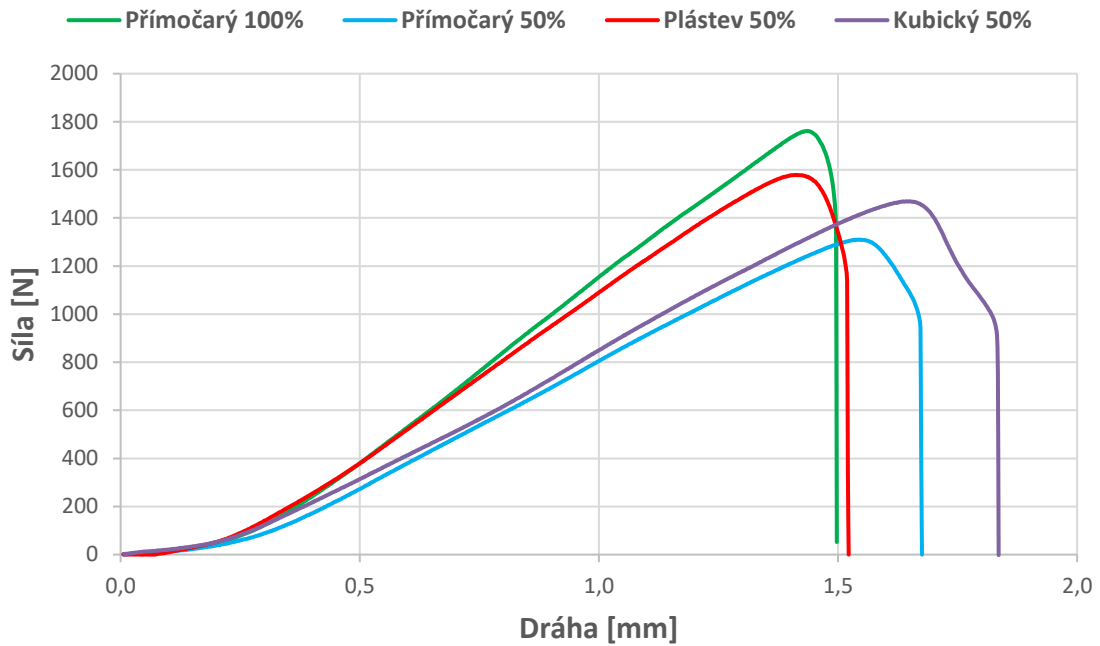
Obr. 72 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce vzpěru (orientace "na plocho")

Zkouška vzpěru - orientace "na hraně"



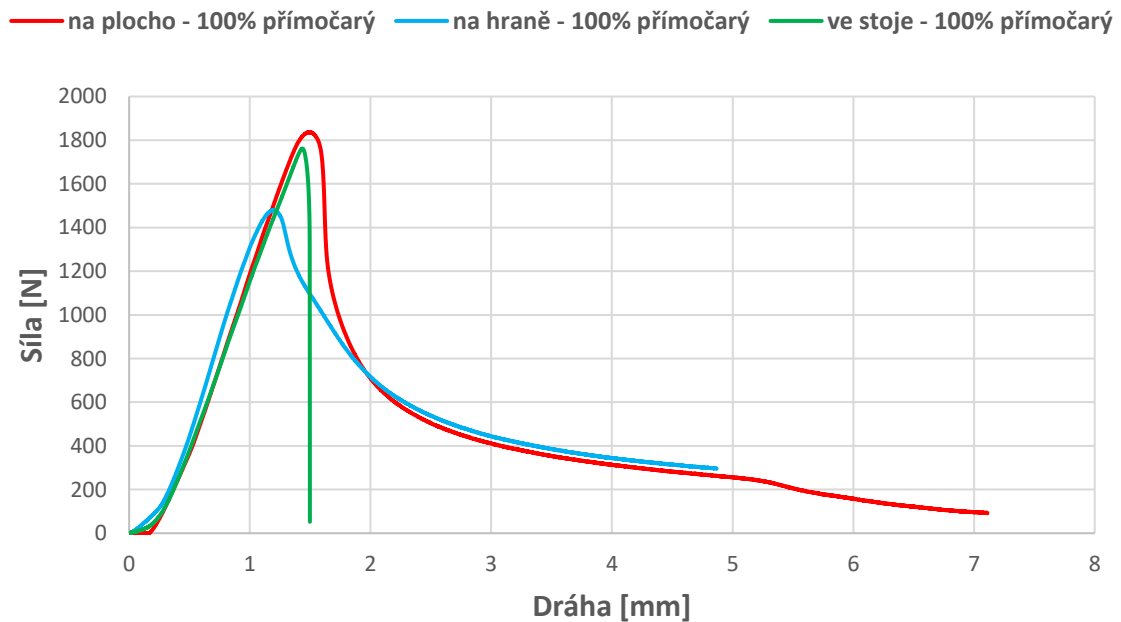
Obr. 73 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce vzpěru (orientace "na hraně")

Zkouška vzpěru - orientace "ve stoje"



Obr. 74 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce vzpěru (orientace "ve stoje")

Zkouška vzpěru - porovnání orientací tisku



Obr. 75 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce vzpěru (porovnání orientací)

Zhodnocení výsledků zkoušky vzpěru

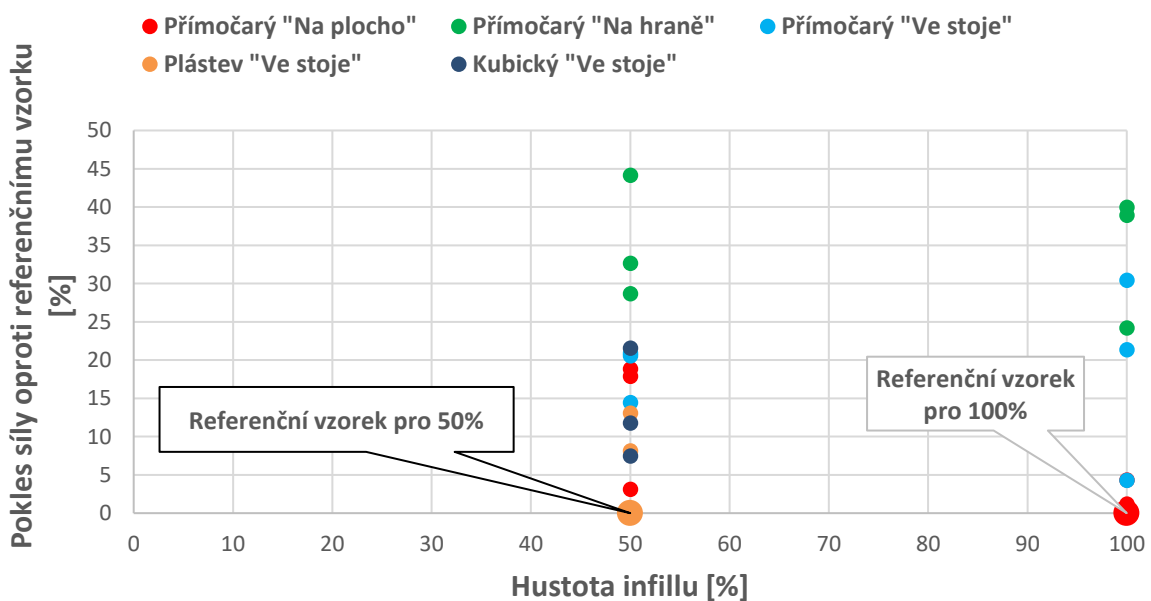
Při této zkoušce byl zkoumán vliv hustoty a typu infillu a orientace dílu na tiskové podložce na mechanické vlastnosti. Zkouška byla provedena na 24 vzorcích.

Nejlepší hodnoty vykazoval vzorek č. 2 (100 % infill, přímočarý, „na plocho“) a byl tedy zvolen jako referenční. Od něj byl následně vypočítán procentuální pokles síly u ostatních vzorků (uvedeno v Tab. 24). V grafu na Obr. 75 jsou porovnány nejlepší vzorky z každé orientace. Nejlépe dopadla orientace dílu na tiskové podložce „na plocho“. Tato orientace dosáhla nejvyšší maximální síly a zároveň i nejvyššího protažení.

Pro lepší znázornění rozdílů mezi jednotlivými vzorky, byl vybrán také nejlepší vzorek s 50 % infillem, což je vzorek č. 15. Společně se vzorkem č. 2 byly zvoleny jako referenční, byl od nich vypočítán procentuální pokles síly u ostatních vzorků z jejich skupiny. Výsledky jsou zobrazeny v grafu na Obr. 76.

Z grafu vyplývá, že jak u 50 % tak i u 100 % infillu je nejhorší orientace vzorků „na hraně“. Dále u 100 % infillu je naprosto nejlepší orientace vzorku „na plocho“. Těmto hodnotám se přiblížil pouze jeden vzorek z orientace „ve stoje“, který zaznamenal pouze o 4,3 % nižší maximální sílu. Ostatní vzorky z této skupiny vykazovaly pokles přes 20 %. Mezi vzorky s 50 % hustotou infillu si nejlépe vedla orientace „ve stoje“ navíc s typem infillu plástev. Ovšem vzorek z přímočarého infillu s orientací „na plocho“ byl pouze o 3,1 % horší. Ostatní vzorky z orientace „ve stoje“ se pohybovaly v podobném intervalu hodnot.

Vliv hustoty, typu infillu a orientace dílu na maximální sílu



Obr. 76 - Graf závislosti poklesu síly od referenčního vzorku na parametrech tisku

8.5 Zhodnocení mechanických zkoušek

Ze zkoušky tlakem bylo zjištěno, že z hlediska pevnosti je nejvhodnější typ infillu plástev s 95 % hustotou. Při návrhu nástroje bude potřeba zohlednit i dobu tisku. V případě delší doby tisku je možné využít také typ infillu přímočarý se 100 % hustotou, jež vykazoval pokles pevnosti pouze o 0,8 až 1,8 %. Co se týče výšky vrstvy, zde bylo dosaženo nejvíce konstantních optimálních výsledků při 0,3 mm. S touto variantou bude navíc dosaženo nejkratší doby tisku.

Pro tahové zatížení je nejvhodnější orientace součásti „na hraně“ a přímočarý infill se 100 % hustotou. V případě potřeby je možné uvažovat o orientaci součásti „na plocho“, která dosahovala téměř stejných maximální sil pouze se vyznačovala menším prodloužením.

Z hlediska ohybu je nejvhodnější orientací opět orientace „na hraně“ a součást by měla být vytvořena s přímočarým infillem se 100 % hustotou. Opět je možné využít orientaci „na plocho“, která se vyznačovala snížením maximální síly o méně než 8 %.

Ze zkoušky vzpěru vyplynula jako nejvhodnější orientace „na plocho“. Zde oproti orientaci „na hraně“ bylo dosaženo lepších výsledků o 24,2 až 40 %. Nejvhodnějším typem infillu byl přímočarý se 100 % hustotou.

Při návrhu nástroje je potřeba zjistit, jaké zatížení na něj bude působit. Podle toho je následně možné zvolit optimální orientaci. Dále pokud je známo, jak velké síly budou na nástroj působit, je možné zvolit vhodnou hustotu infillu pro snížení nákladů (čas, materiál, celková cena). Shrnutí zjištěných poznatků je uvedeno v Tab. 25.

Tab. 25 - Závěr z mechanických zkoušek

Zatížení	Orientace	Typ infillu	Hustota infillu [%]	Výška vrstvy [mm]
Tlakem	nezjišťováno	plástev	95	0,3
Tahem	na hraně	přímočarý	100	nezjišťováno
Ohybem	na hraně			
Vzpěrem	na plocho			

9 Nástroje

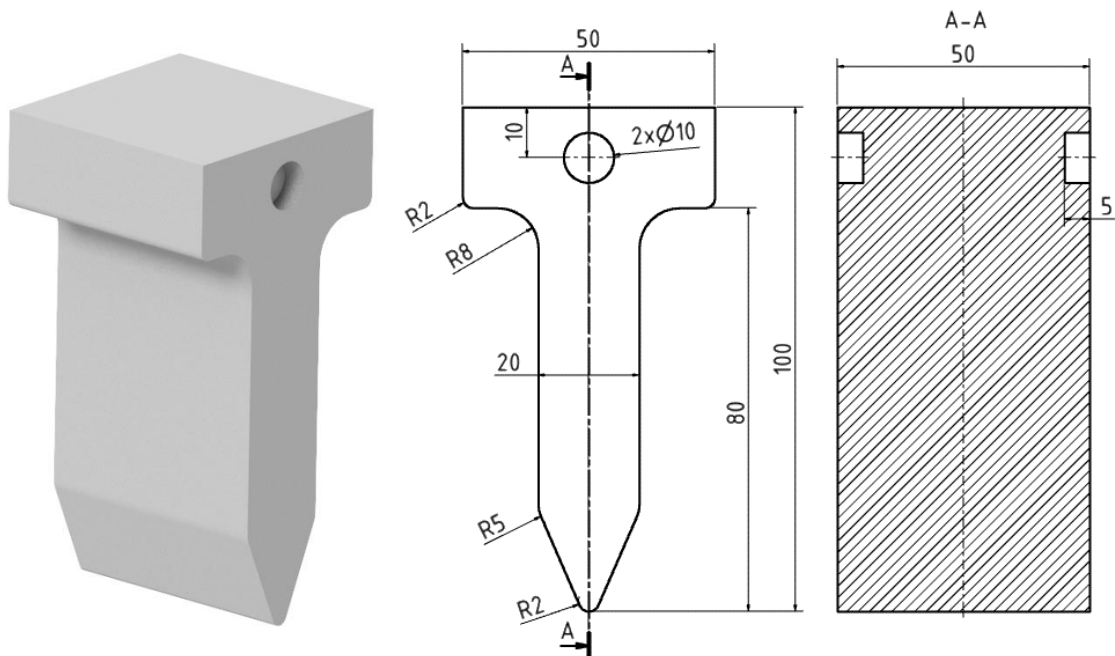
Z provedených mechanických zkoušek byly získány základní předpoklady pro návrh nástrojů. Budou navrženy celkem tři typy nástrojů. Pro každý nástroj je potřeba definovat parametry tisku. Následně budou nástroje vytištěny a bude na nich provedena zkouška pevnosti. Aby mohla být zkouška provedena, bude potřeba vyřešit, jak budou nástroje upnuty. Samotná zkouška bude spočívat v ohýbání plechů, jejichž tloušťka bude mít stoupající tendenci do chvíle, dokud nedojde k destrukci nástroje.

9.1 Návrh geometrie

Pro všechny nástroje byla zvolena výška 100 mm a šířka 50 mm. Dále je každý nástroj opatřen dvěma dírami o průměru 10 mm a hloubce 5 mm. Tyto díry budou využity pro upnutí v trhacím zařízení. Střed děr je 10 mm od horního okraje a je v ose se středem spodního poloměru, který je při zkoušce v kontaktu s plechem.

9.1.1 Nástroj č. 1

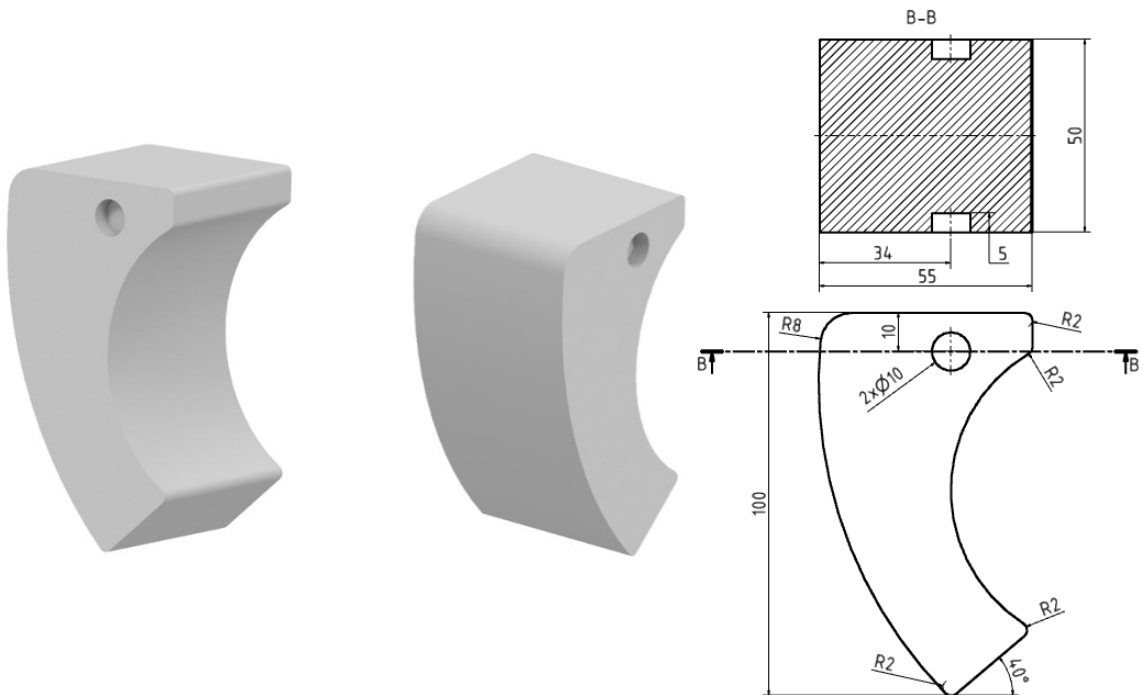
Na Obr. 77 je zobrazen výkres a 3D model navrženého nástroje č. 1.



Obr. 77 - 3D model a výkres nástroje č. 1

9.1.2 Nástroj č. 2

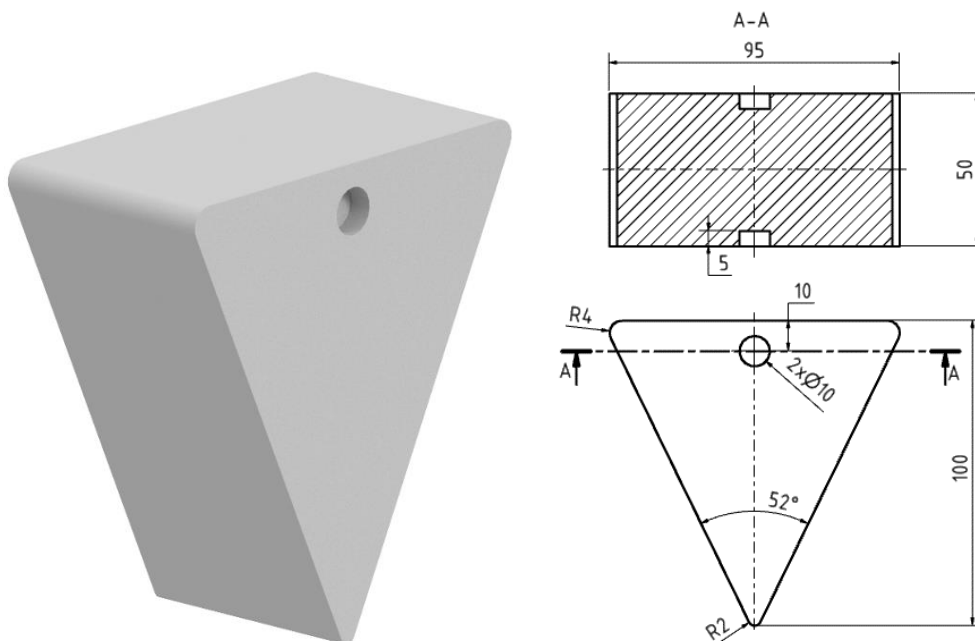
Na Obr. 78 je zobrazen výkres a 3D model navrženého nástroje č. 2.



Obr. 78 - 3D model a výkres nástroje č. 2

9.1.3 Nástroj č. 3

Na Obr. 79 je zobrazen výkres a 3D model navrženého nástroje č. 3.



Obr. 79 - 3D model a výkres nástroje č. 3

9.2 Návrh parametrů tisku

Pro každý nástroj byly zvoleny dvě orientace tisku každá v počtu jednoho kusu. Celkem tedy vznikne šest nástrojů. První orientace je „ve stoje“, kdy rovina tisku je kolmá na směr působení síly. Druhá orientace je „na plocho“, při které je rovina tisku rovnoběžná se směrem, ve kterém působí síla. Nástroje budou zatěžovány primárně tlakovou silou. Podle výsledků mechanických zkoušek byl zvolen typ infillu pláštěv. Při nastavování parametrů v programu PrusaSlicer bylo zjištěno, že použití 90 % infillu typu pláštěv navýší dobu tisku oproti 100 % infillu typu přímočarý o 160 % až 185 %. Z tohoto důvodu bude použit přímočarý infill se 100 % hustotou. Parametry tisku pro všechny nástroje jsou uvedeny v Tab. 26.

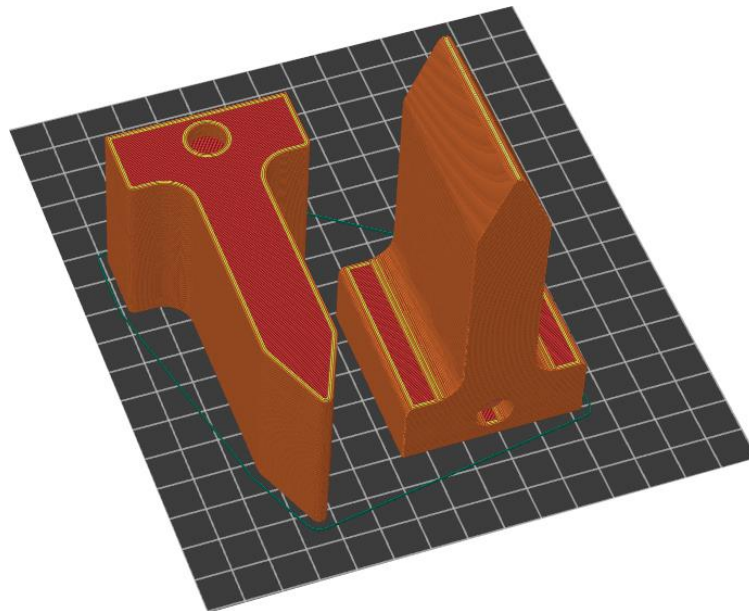
Tab. 26 - Fixní parametry pro tisk nástrojů

Parametr	Nastavení
Typ infillu	Přímočarý
Hustota infillu	100 %
Filament	PLA
Tiskárna	Ender 3 PRO
Teplota hotendu	210 °C
Teplota podložky	60 °C
Výška vrstev	0,30 mm
Počet perimetrů	3

9.2.2 Nástroj č. 1

Doba tisku dvou kusů nástroje č. 1 zobrazených na Obr. 80 je 9 hodin a 25 minut. Dále jsou na tomto obrázku uvedeny informace ohledně doby tisku jednotlivých částí (infill, perimetry, ...) a množství spotřebovaného filamentu.

Informace o slicování		Typ	Čas	Procentuálně	Použito filamentu
Použito Filamentu (g)	282,37	Perimetr	1h9m	12,2%	9,47 m 28,23 g
Použito Filamentu (m)	94,68	Vnější perimetr	52m	9,2%	5,98 m 17,82 g
Použito Filamentu (mm ³)	227720,34	Perimetr převisu	2s	0,0%	0,00 m 0,01 g
Náklady	112,67	Vnitřní výplň	6h50m	72,5%	75,95 m 226,52 g
Odhadovaný čas tisku: - normální režim	9h25m	Plná výplň	27m	4,8%	2,76 m 8,24 g
		Vrchní plně výplně	4m	0,7%	0,36 m 1,07 g
		Výplň mostů	30s	0,1%	0,03 m 0,10 g
		Výplň tenkých stěn	6s	0,0%	0,00 m 0,01 g
		Obrys/Límeč	36s	0,1%	0,04 m 0,12 g
		Podpěry	35s	0,1%	0,03 m 0,08 g
		Kontaktní vrstvy podpěr	10s	0,0%	0,01 m 0,02 g
		Vlastní	2m	0,3%	0,05 m 0,13 g

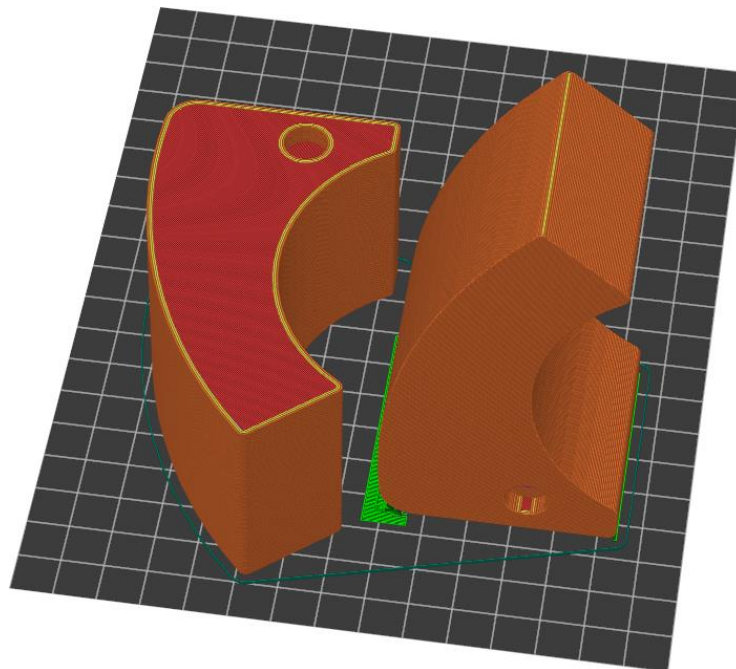


Obr. 80 - Parametry tisku nástroje č. 1

9.2.3 Nástroj č. 2

Doba tisku dvou kusů nástroje č. 2 zobrazených na Obr. 81 je 12 hodin a 11 minut. Dále jsou na tomto obrázku uvedeny informace ohledně doby tisku různých částí (infill, perimetry, ...) a množství spotřebovaného filamentu.

Informace o slicování		Typ	Čas	Procentuálně	Použito filamentu
Použito Filamentu (g)	389,26	Perimetr	1h13m	9,9%	10,17 m 30,34 g
Použito Filamentu (m)	130,51	Vnější perimetr	55m	7,5%	6,39 m 19,07 g
Použito Filamentu (mm ³)	313920,46	Perimetr převisu	14s	0,0%	0,02 m 0,05 g
Náklady	155,32	Vnitřní výplň	9h2m	74,1%	109,22 m 325,77 g
Odhadovaný čas tisku:		Plná výplň	49m	6,7%	4,04 m 12,06 g
- normální režim	12h11m	Vrchní plně výplně	4m	0,5%	0,37 m 1,10 g
		Výplň mostů	47s	0,1%	0,05 m 0,16 g
		Obrys/Límeč	38s	0,1%	0,04 m 0,13 g
		Podpěry	3m	0,4%	0,10 m 0,31 g
		Kontaktní vrstvy podpěr	2m	0,3%	0,05 m 0,15 g
		Vlastní	2m	0,2%	0,05 m 0,13 g
		Odhadované časy tisku:			
		První vrstva: 16m			
		Celkem: 12h11m			

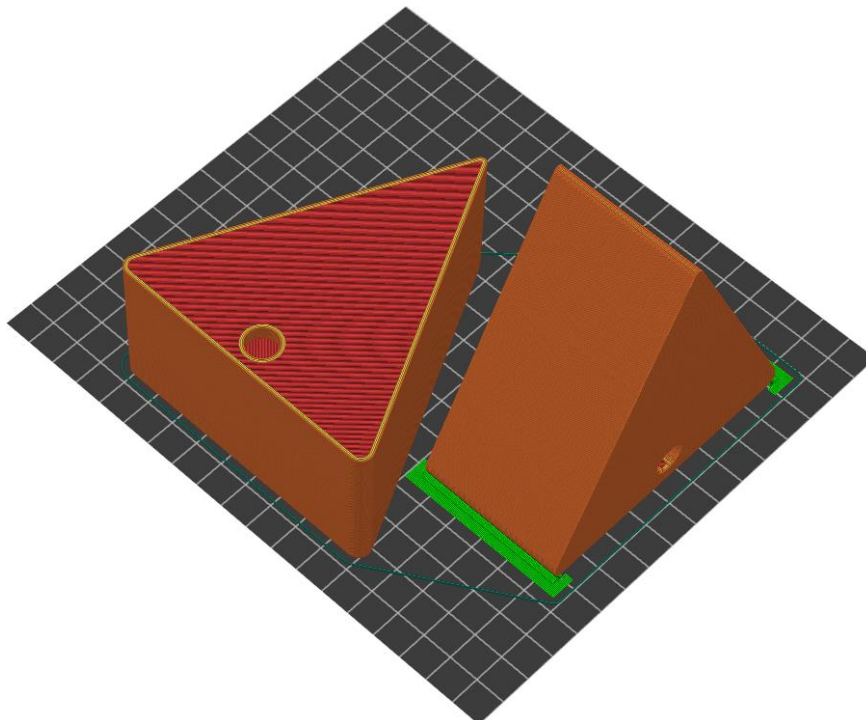


Obr. 81 - Parametry tisku nástroje č. 2

9.2.5 Nástroj č. 3

Doba tisku dvou kusů nástroje č. 3 zobrazených na Obr. 82 je 16 hodin a 52 minut. Dále jsou na tomto obrázku uvedeny informace ohledně doby tisku různých částí (infill, perimetry, ...) a množství spotřebovaného filamentu.

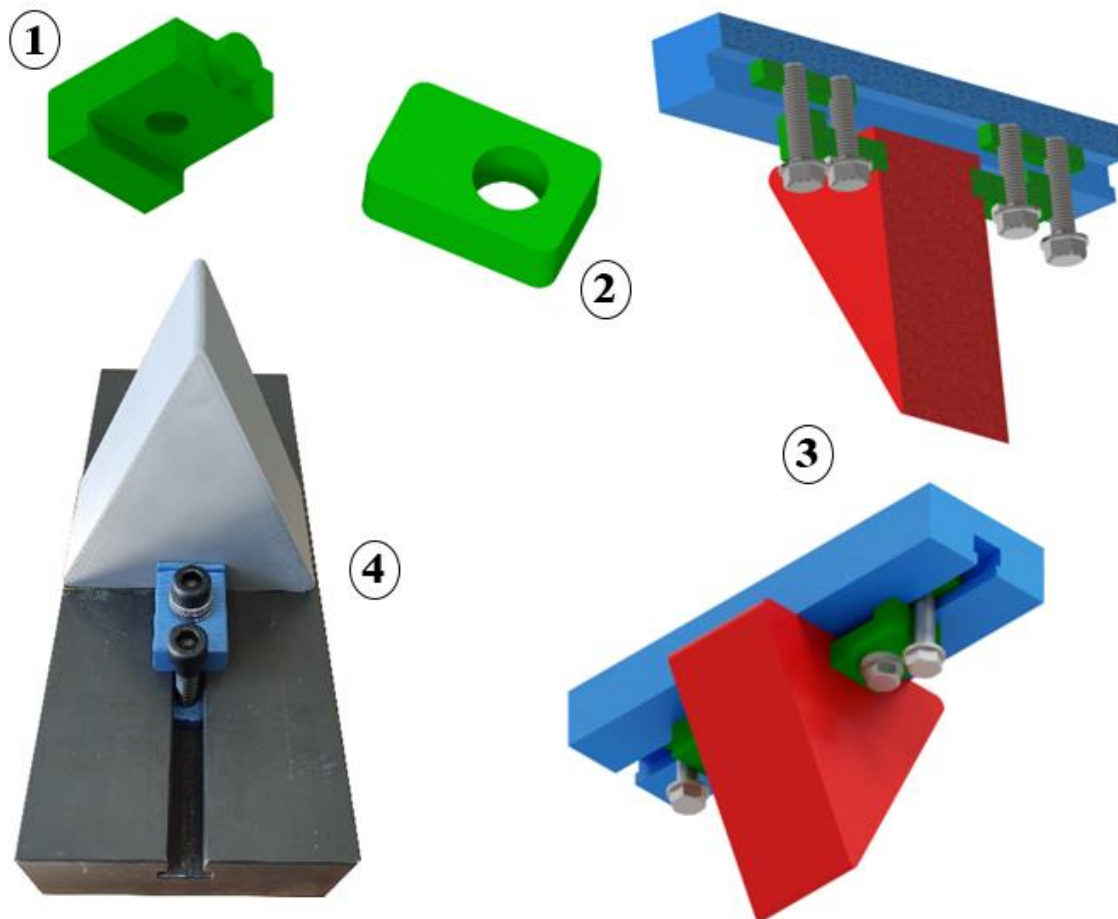
Informace o slicování		Typ	Čas	Procentuálně	Použito filamentu
Použito Filamentu (g)	588,77	Perimetr	1h25m	8,4%	11,91 m 35,52 g
Použito Filamentu (m)	197,40	Vnější perimetr	1h4m	6,3%	7,47 m 22,27 g
Použito Filamentu (mm ³)	474812,86	Perimetr převisu	9s	0,0%	0,01 m 0,03 g
Náklady	234,92	Vnitřní výplň	13h30m	80,0%	172,59 m 514,77 g
Odhadovaný čas tisku: - normální režim	16h52m	Plná výplň	41m	4,0%	4,59 m 13,69 g
		Vrchní plná výplně	6m	0,5%	0,56 m 1,68 g
		Výplň mostů	32s	0,1%	0,04 m 0,11 g
		Výplň tenkých stěn	3s	0,0%	0,00 m 0,00 g
		Obrys/Límeč	47s	0,1%	0,05 m 0,16 g
		Podpěry	3m	0,3%	0,11 m 0,33 g
		Kontaktní vrstvy podpěr	1m	0,1%	0,02 m 0,07 g
		Vlastní	2m	0,1%	0,05 m 0,13 g



Obr. 82 - Parametry tisku nástroje č. 3

9.3 Návrh upnutí

Pro systém upínání byly všechny nástroje v horní části opatřeny otvory o průměru 10 mm a hloubce 5 mm. Těmito otvory je zajištěna fixace nástroje k horní čelisti pomocí navržených upínek. Jedna část upínky je umístěna v otvoru v nástroji, druhá část se opírá o čelist. Skrz upínku prochází šroub, který je fixován v kameni uvnitř T drážky v čelisti. Do T drážky jsou vloženy ještě další dva kameny, v nichž jsou fixovány šrouby zamezující horizontálnímu pohybu upínek. Díky tomu je možné nástroj vystředit a zafixovat v dané poloze. Na Obr. 83 jsou zobrazeny navržená upínka (1), kámen (2), schéma upnutí nástroje (3) a nakonec je zobrazeno reálné upnutí nástroje během experimentu (4).

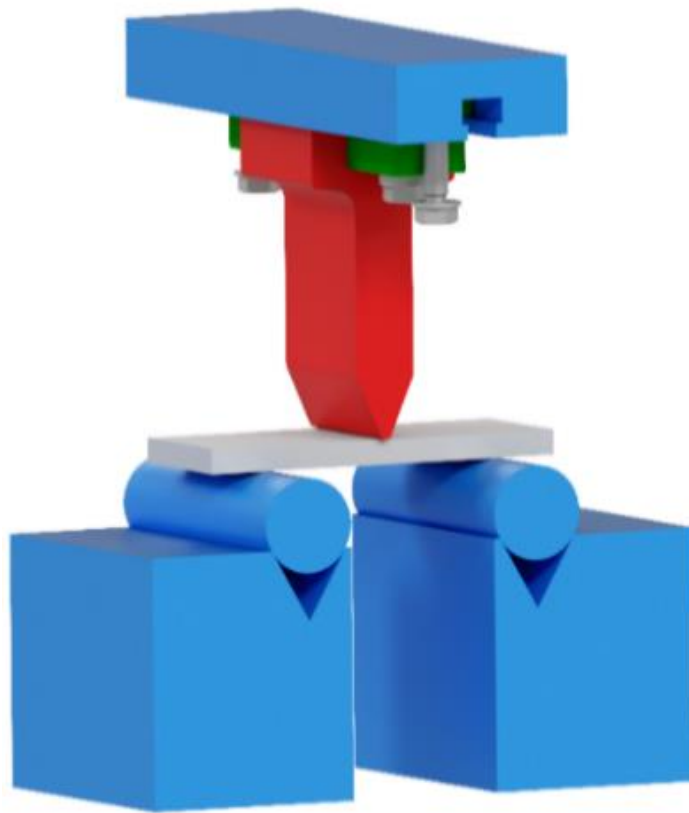


Obr. 83 - Systém pro upínání nástrojů

9.4 Realizace zkoušky

Během zkoušky bude ohnuto celkem šest typů plechu, přičemž od plechu S355 (b) budou pro kontrolu ohnuty dva kusy a z ostatních typů vždy jen jeden kus. Zkouška bude ukončena, jakmile dojde k destrukci daného nástroje. Plechy pro zkoušku jsou zobrazeny na Obr. 85 a jejich charakteristiky jsou uvedeny v tabulce.

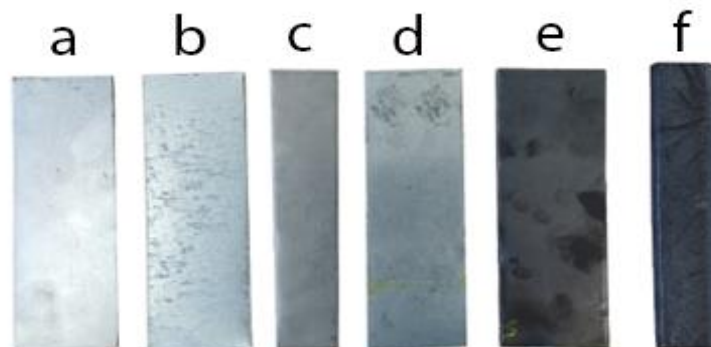
Nyní bude popsán průběh zkoušky. Na spodní čelisti jsou upnuty dvě podpěry. Každá podpěra je kvádr, v jehož horní části je umístěn válec. Vzdálenost mezi středy těchto válců je nastavena na 80 mm. Na válcích je položen plech. V horní čelisti je upnut nástroj, který se po spuštění zkoušky pohybuje směrem dolů a začne ohýbat plech, dokud není dosaženo některého z kritérií pro ukončení zkoušky. Tato kritéria zahrnují dráhu, maximální sílu a procentuální pokles síly a jsou uvedena u každého nástroje. Na Obr. 84 je znázorněno schéma zkoušky.



Obr. 84 - Schéma zkoušky nástrojů

Tab. 27 - Charakteristika plechů pro zkoušky nástrojů

Značení	Materiál plechu	Tloušťka [mm]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Norma	Rozměry š x d [mm]
a	HX 180 BD	0,7	180-230	330-400	DIN EN 10 152	50 x 120
b	S355	0,7	355	470-630	ČSN EN 10025-2: 2005	
c	Dogal 780 CP	1,5	500-700	780-950	ČSN EN 10338	
d	Korozivzdorná ocel AISI 304	2	190	500-700	ČSN EN 10088-3	40 x 120
e	S235	4	235	360-510	ČSN EN 10025-2	50 x 120
f	S235	8	235	360-510		30 x 120



Obr. 85 - Druhy plechů pro zkoušky nástrojů

9.4.1 Nástroj č. 1

Na Obr. 86 je zobrazen nástroj č. 1 při začátku zkoušky.

- **Parametry zkoušky:**
 - **Rychlost pohybu horní čelisti:**
 - 100 mm/min
 - **Kritérium ukončení zkoušky:**
 - Dráha 50 mm
 - Dosažení síly 80 000 N
 - Pokles síly o 75 %

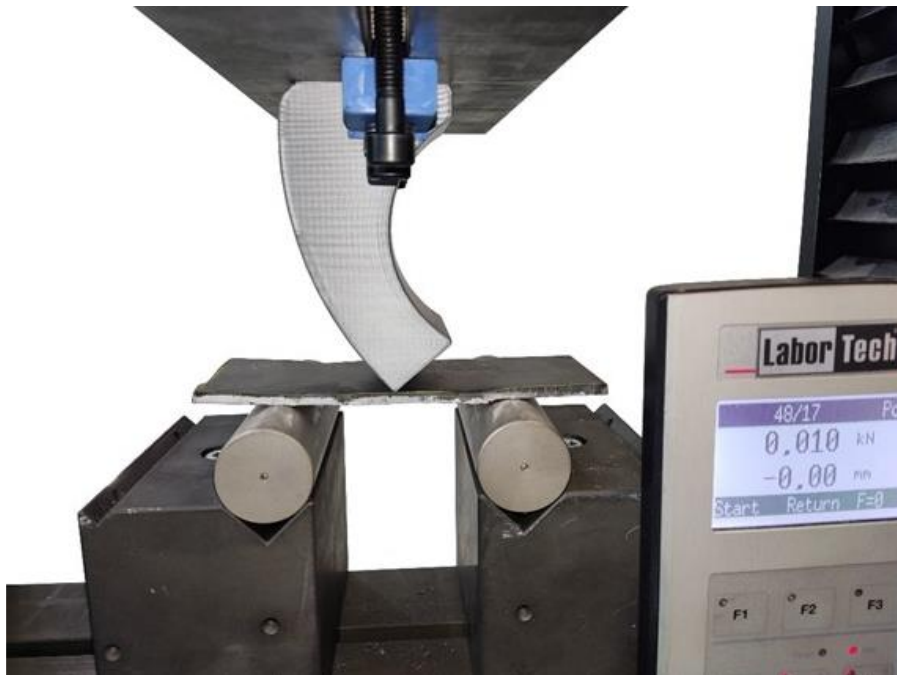


Obr. 86 - Nástroj č. 1 při zkoušce

9.4.2 Nástroj č. 2

Na Obr. 87 je zobrazen nástroj č. 2 při začátku zkoušky.

- **Parametry zkoušky:**
 - **Rychlost pohybu horní čelisti:**
 - 100 mm/min
 - **Kritérium ukončení zkoušky:**
 - Dráha 40 mm
 - Dosažení síly 80 000 N
 - Pokles síly o 75 %



Obr. 87 - Nástroj č. 2 při zkoušce

9.4.3 Nástroj č. 3

Na Obr. 88 je zobrazen nástroj č. 3 při začátku zkoušky.

- **Parametry zkoušky:**
 - **Rychlost pohybu horní čelisti:**
 - 100 mm/min
 - **Kritérium ukončení zkoušky:**
 - Dráha 50 mm
 - Dosažení síly 80 000 N
 - Pokles síly o 75 %



Obr. 88 - Nástroj č. 3 při zkoušce

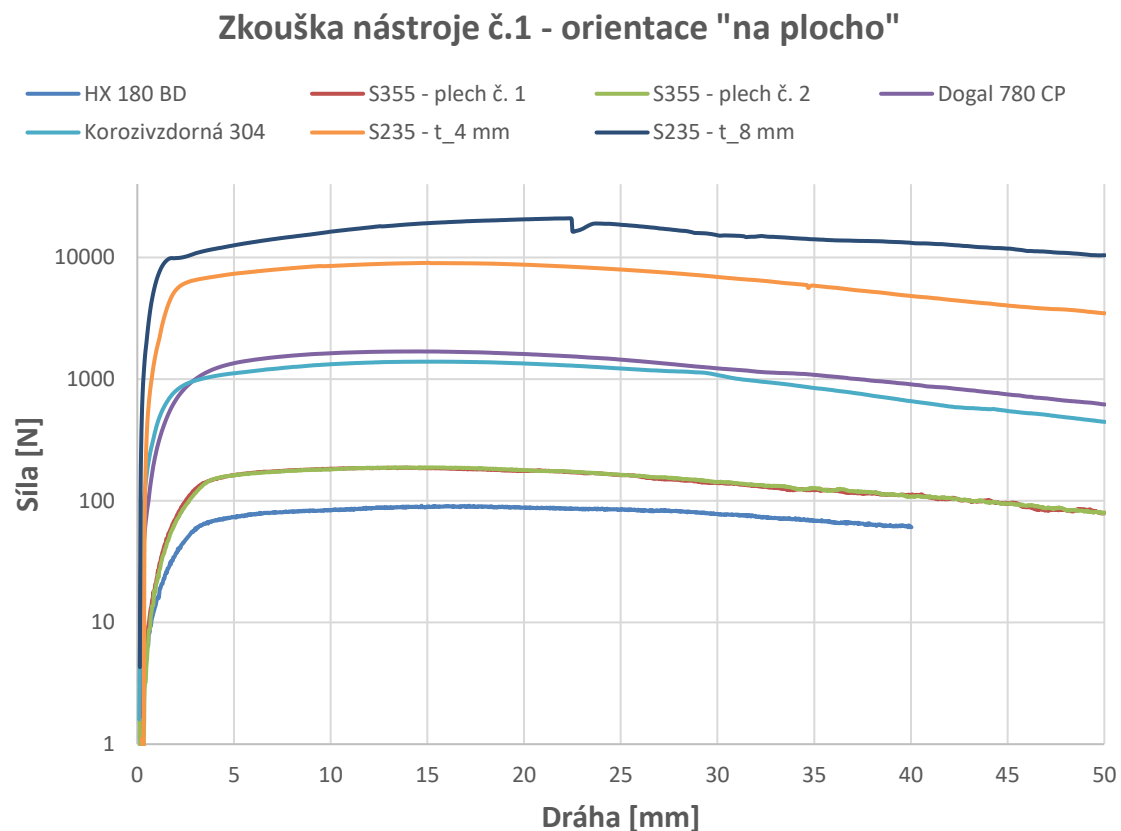
9.5 Výsledky

Výsledky jsou uvedeny zvlášť pro každou orientaci daného nástroje. Grafy zobrazují průběh síly na dráze pro všechny zkoušené plechy a jsou zobrazeny v logaritmickém měřítku, protože nejnižší z maximálních hodnot sil dosahují okolo 100 N a nejvyšší z maximálních hodnot sil se pohybují až do 21 000 N. V běžném grafu nebylo možné některé průběhy sil pozorovat.

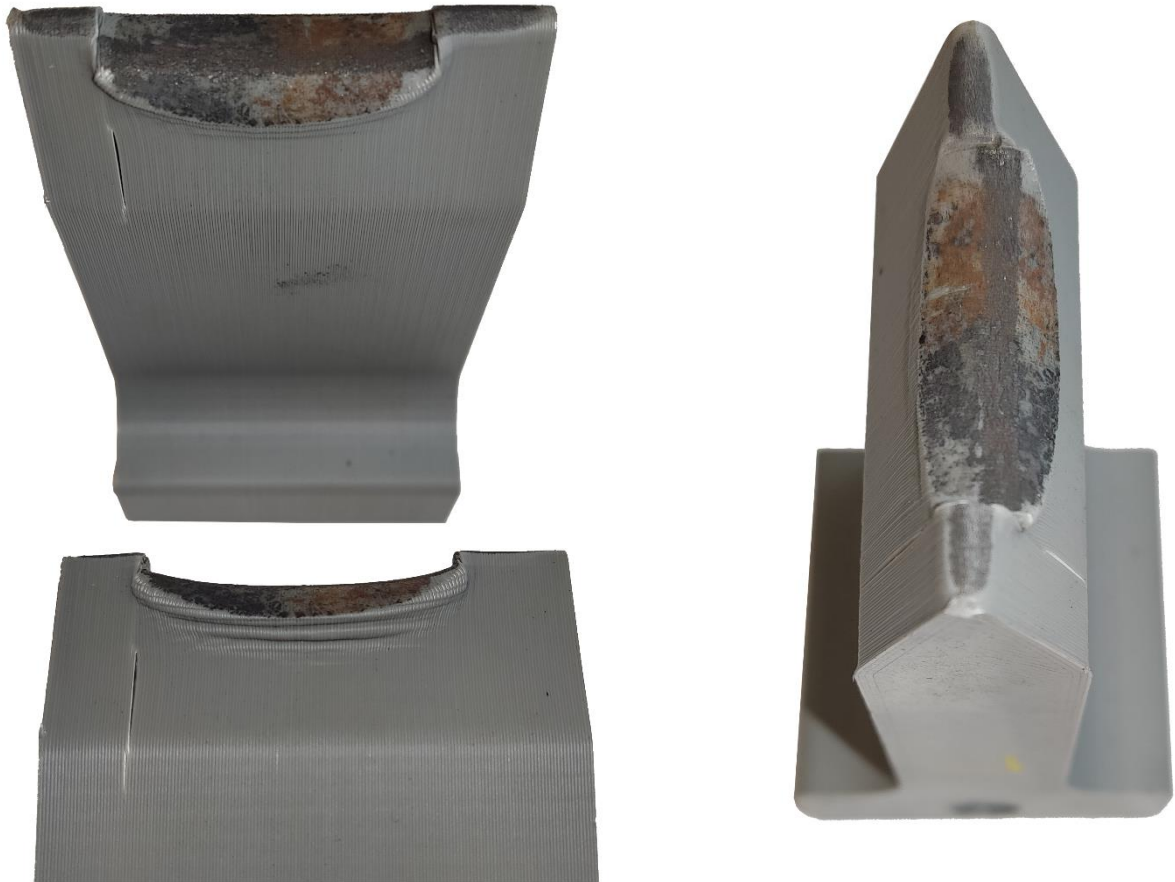
9.5.1 Nástroj č. 1

Orientace „na plocho“

Při zkoušce zvládl tento nástroj plechy (a) až (d) bez jakéhokoliv porušení. Při ohýbání plechu (e) došlo na špičce nástroje k drobným otlakům (okolo 5 750 N). Při posledním plechu (f) již při prvním kontaktu nastalo přechování špičky nástroje (těsně pod hranicí 10 000 N). Po vyjmutí nástroje byla následně objevena i trhlina pod upěchovanou oblastí, ovšem i přesto zůstala zachována celistvost nástroje. Bylo by tedy zajímavé zvětšit kontaktní rádius nástroje a provést zkoušku znova. Průběh zkoušky je zobrazen v grafu na Obr. 89. Na Obr. 90 je nástroj po ukončení zkoušky.



Obr. 89 - Graf zkoušky nástroje č. 1 - orientace "na plocho"

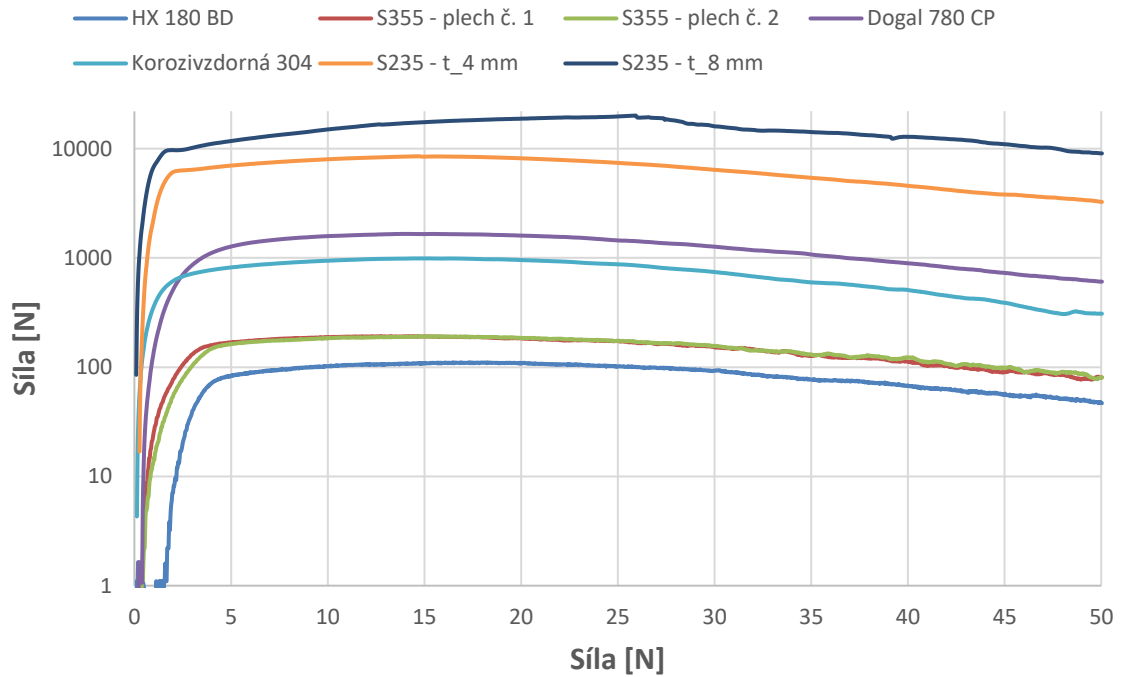


Obr. 90 - Destrukce nástroje č. 1 - orientace "na plocho"

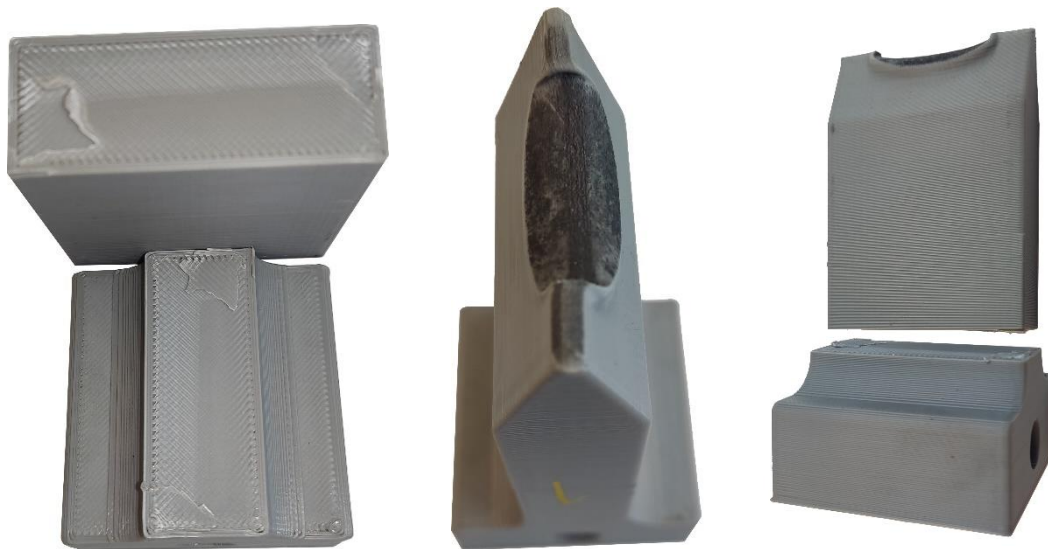
Orientace „ve stoje“

Při zkoušce zvládl tento nástroj plechy (a) až (d) bez jakéhokoliv porušení. Při ohýbání plechu (e) došlo na špičce nástroje k drobným otlakům. Při posledním plechu (f) již nastalo přechování špičky nástroje (při síle okolo 9 500 N), a následně maximální síla dosáhla až k hranici 20 100 N. Později při poklesu síly, došlo k rozlomení nástroje zhruba na hranici 12 500 N. Pro nástroj č. 1 se ukázala tato orientace jako nevhodná. Průběh zkoušky je zobrazen v grafu na Obr. 91. Dále na Obr. 92 a Obr. 93 je nástroj po ukončení zkoušky.

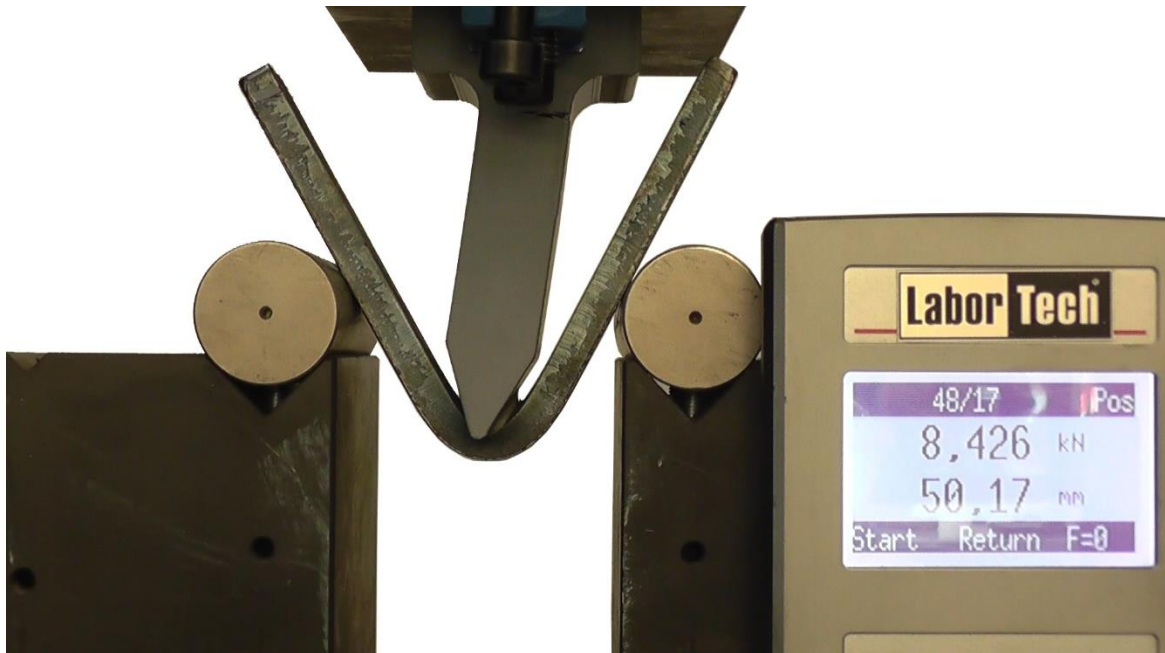
Zkouška nástroje č.1 - orientace "ve stoje"



Obr. 91 - Graf zkoušky nástroje č. 1 - orientace "ve stoje"



Obr. 92 - Destrukce nástroje č. 1 - orientace "ve stoje"

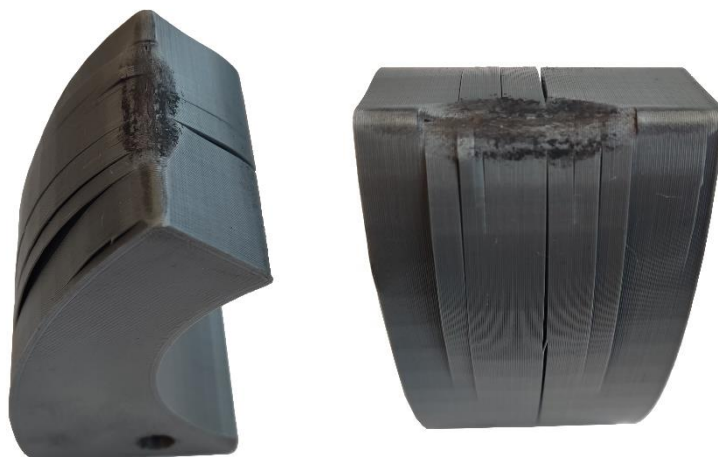


Obr. 93 - Nástroj č. 1 (orientace "ve stoje") v konečné poloze při zkoušce

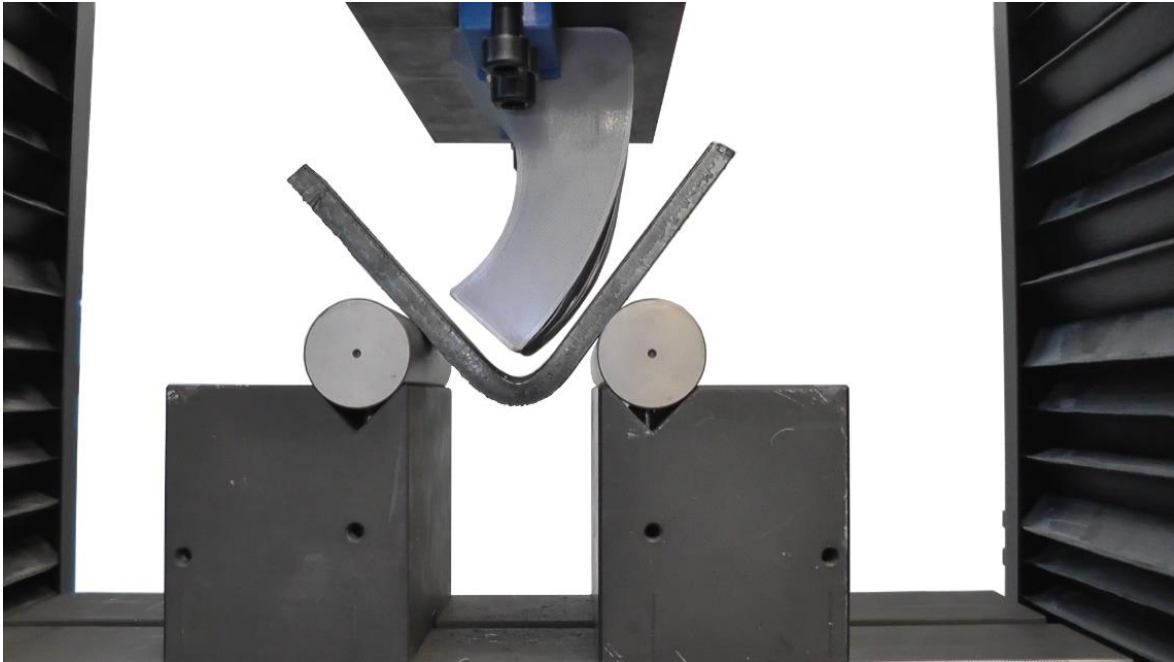
9.5.2 Nástroj č. 2

Orientace „na plocho“

Při zkoušce zvládl tento nástroj ohnout plechy (a) až (d) bez jakéhokoliv porušení. Při ohýbání plechu (e) došlo již od prvního kontaktu s plechem k odlupování jedné vrstvy materiálu, přičemž plocha, na které toto vzniklo, se během zkoušky rozšiřovala. Při posledním plechu (f) došlo téměř ihned při kontaktu k prasknutí dalších vrstev (při síle lehce nad hranicí 8 000 N). Ovšem i takto poškozený nástroj dokázal plech o síle 8 mm ohnout do požadovaného tvaru. Síla se vyšplhala až k hranici 15 000 N. Na Obr. 94 a Obr. 95 je nástroj po ukončení zkoušky. Průběh zkoušky je zobrazen v grafu na Obr. 96

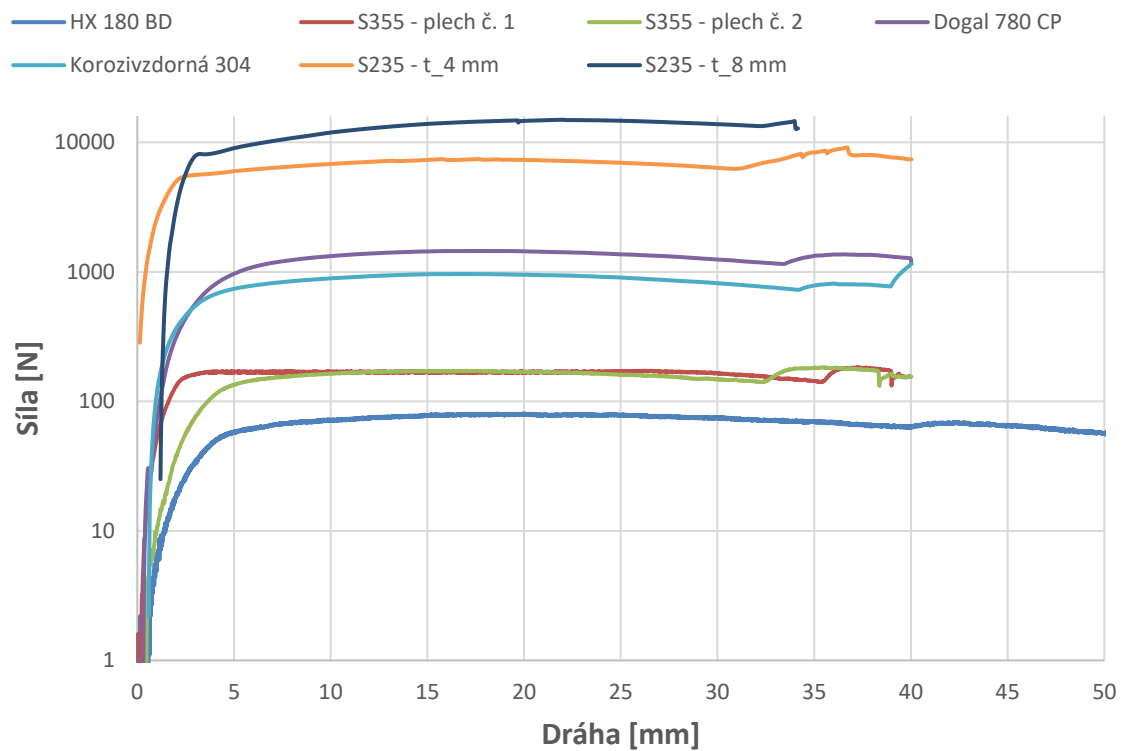


Obr. 94 - Destrukce nástroje č. 2 - orientace "na plocho"



Obr. 95 – Nástroj č. 2 (orientace „na plocho“) po skončení zkoušky

Zkouška nástroje č.2 - orientace "na plocho"

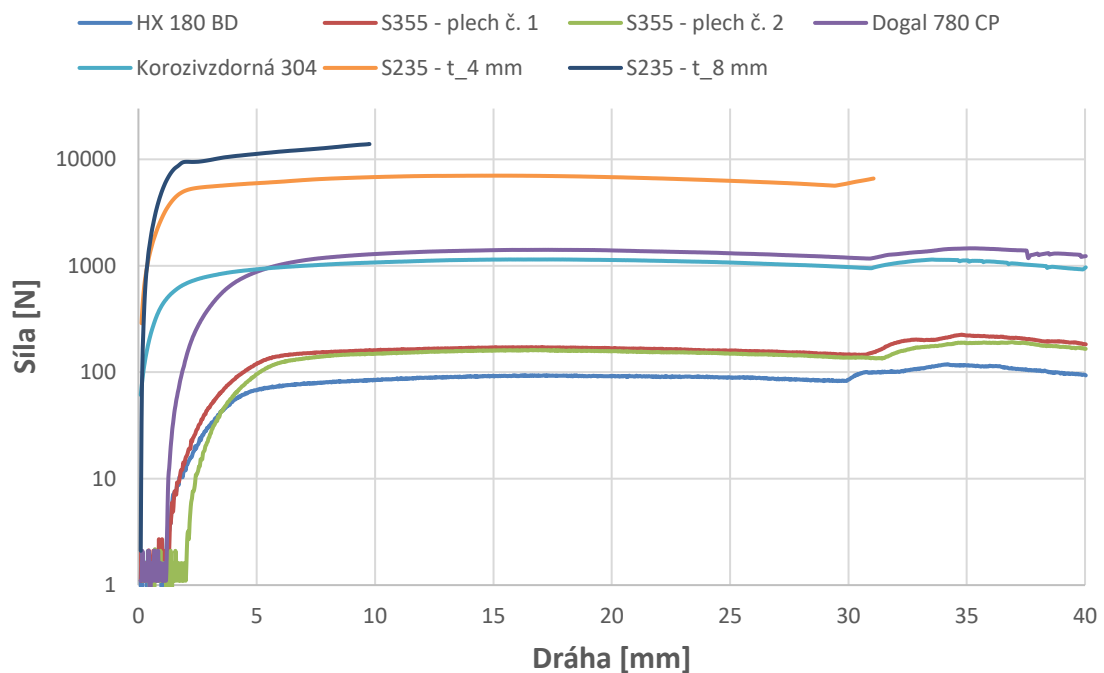


Obr. 96 - Graf zkoušky nástroje č. 2 - orientace "na plocho"

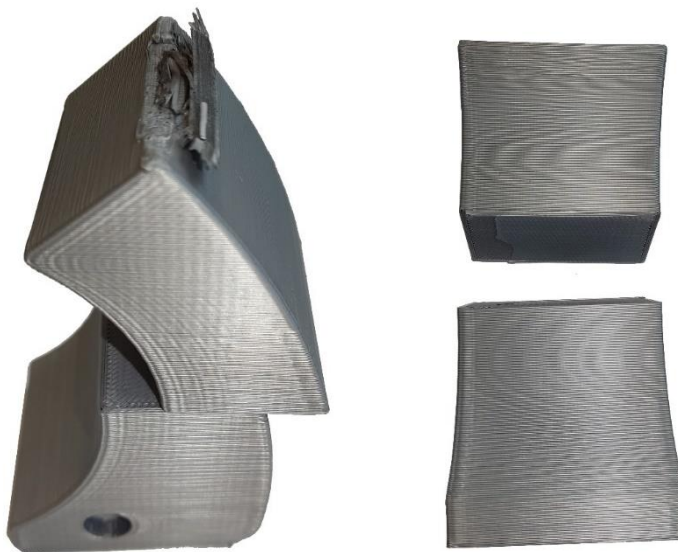
Orientace „ve stoje“

Při zkoušce zvládl tento nástroj ohnout plechy (a) až (d) bez jakéhokoliv porušení. Při ohýbání plechu (e) došlo na špičce nástroje k otlakům. Při posledním plechu (f) došlo k rozpůlení nástroje (při síle 13 900 N). Stalo se tak těsně před překonáním dráhy 10 mm. Jedná se o první nástroj, který nedokončil celou předem definovanou dráhu. Stejně jako u nástroje č. 1, se i zde ukázala tato orientace jako nevhodná. Průběh zkoušky je zobrazen v grafu na Obr. 97. Dále na Obr. 98 je zobrazen nástroj po ukončení zkoušky.

Zkouška nástroje č. 2 - orientace "ve stoje"



Obr. 97 - Graf zkoušky nástroje č. 2 - orientace "ve stoje"

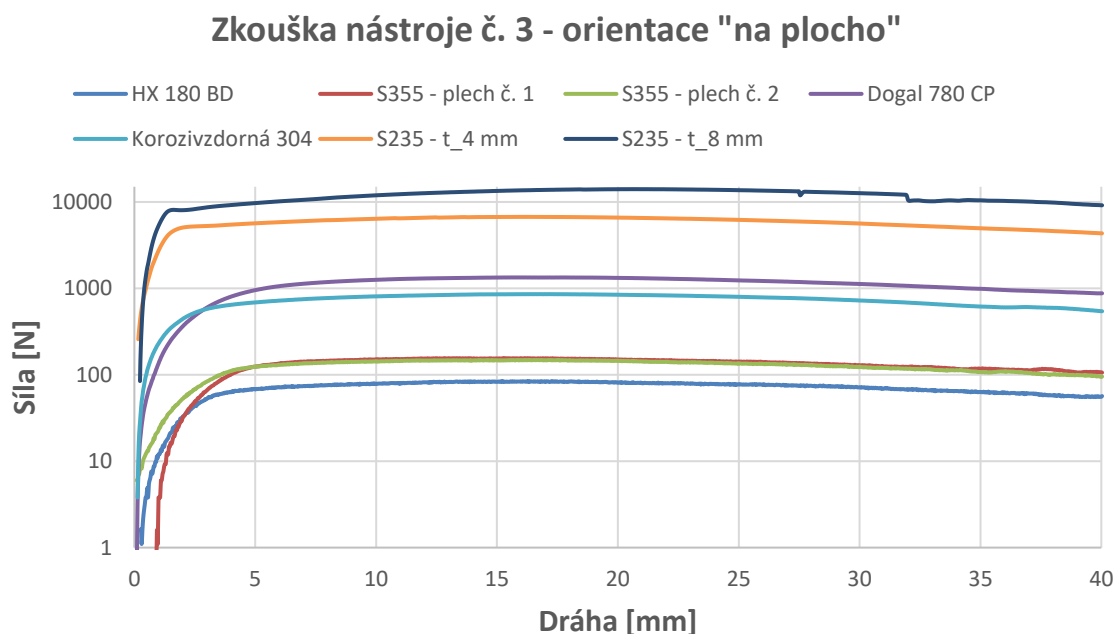


Obr. 98 – Destrukce nástroje č. 2 - orientace "ve stoje"

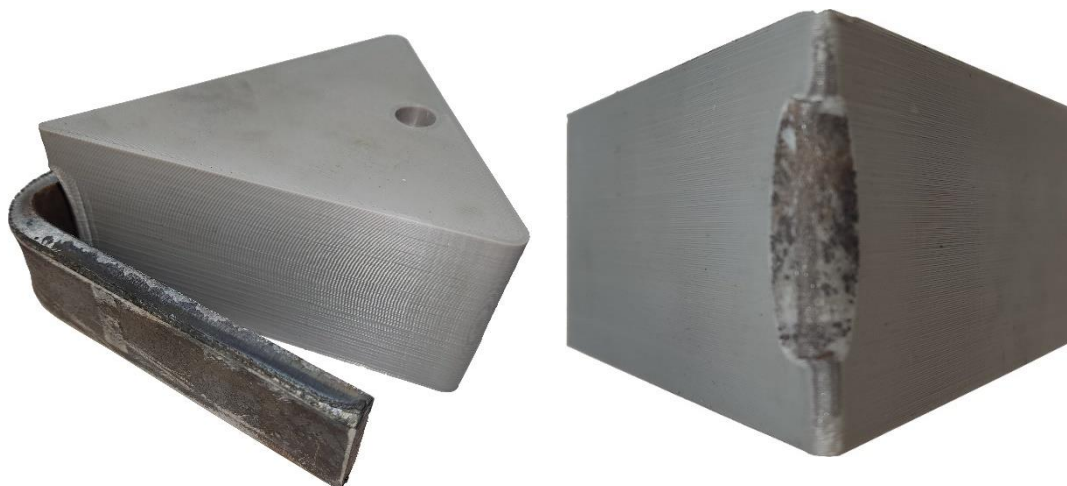
9.5.3 Nástroj č. 3

Orientace „na plocho“

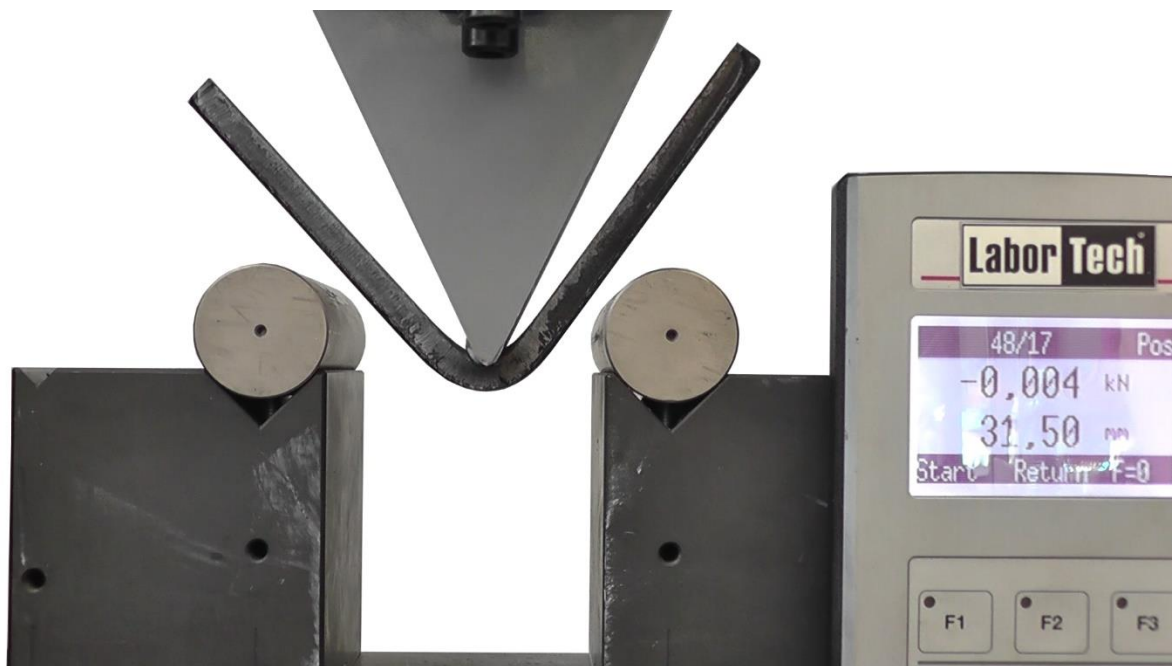
Při zkoušce zvládl tento nástroj ohnout plechy (a) až (d) bez jakéhokoliv porušení. Při ohýbání plechu (e) došlo na špičce nástroje k drobným otlakům. Při ohýbání posledního plechu (f) již při prvním kontaktu nastalo pěchování špičky nástroje (okolo 8 100 N). Nástroj pokračoval v ohýbání plechu, přičemž maximální síla dosáhla přes 14 000 N. Následně byl nástroj vyjmut a nebylo zjištěno žádné další poškození kromě již zmíněného napěchovaného kontaktního rádiusu. Zejména u tohoto nástroje by bylo vhodné navrhnout větší rádius a zkoušku zopakovat. Průběh zkoušky je zobrazen v grafu na Obr. 99. Dále na Obr. 100 a Obr. 101 je nástroj po ukončení zkoušky.



Obr. 99 - Graf zkoušky nástroje č. 3 - orientace "na plocho"



Obr. 100 - Destrukce nástroje č. 3 - orientace "na plocho"

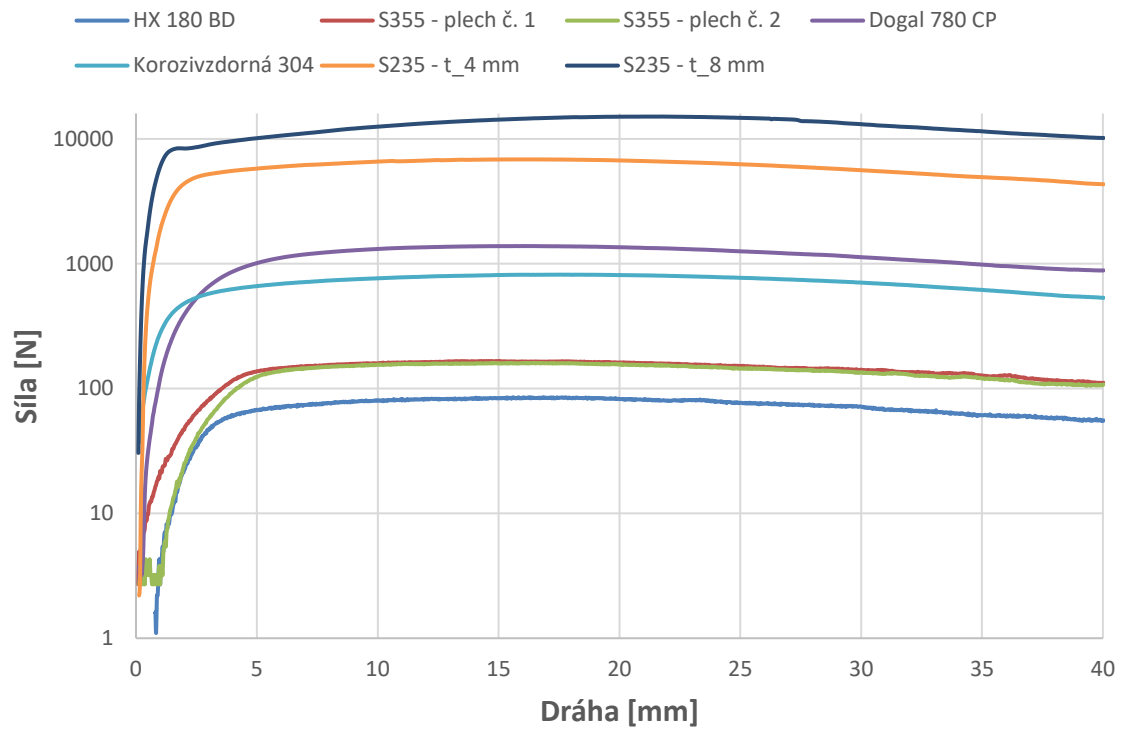


Obr. 101 - Nástroj č. 3 - (orientace "na plocho")

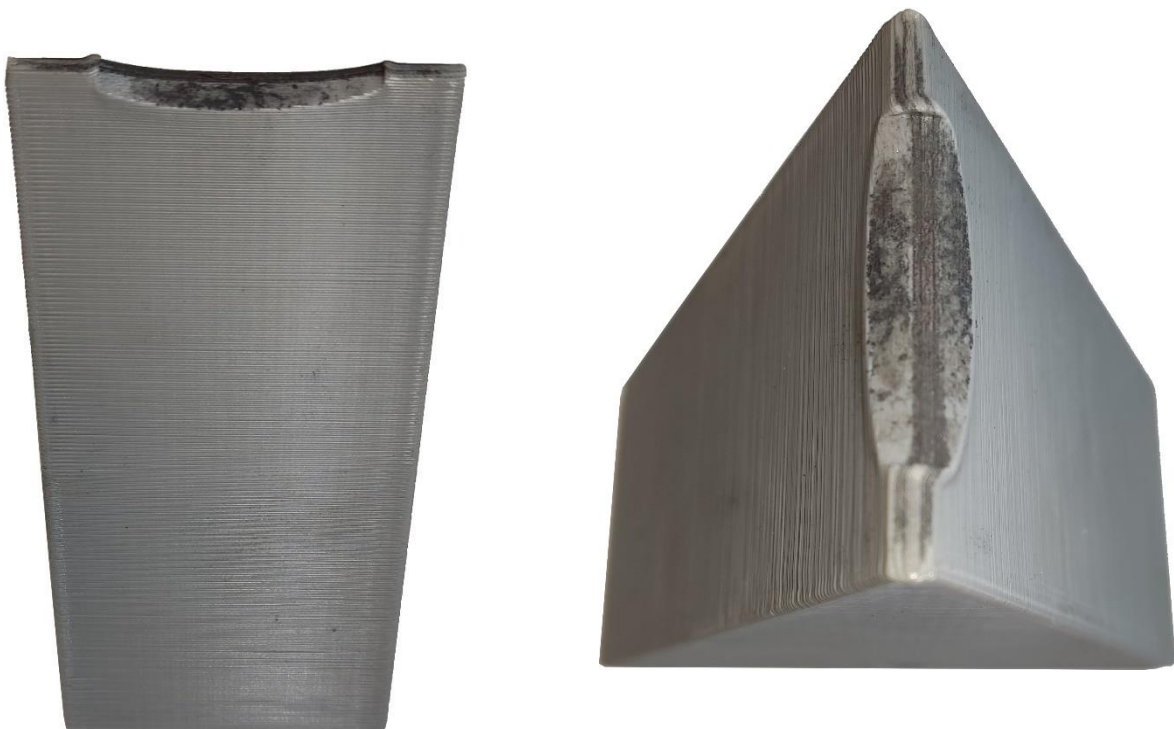
Orientace „ve stoje“

Při zkoušce zvládl tento nástroj ohnout plechy (a) až (d) bez jakéhokoliv porušení. Při ohýbání plechu (e) došlo na špičce nástroje k drobným otlakům. Při posledním plechu (f) již při prvním kontaktu nastalo pěchování špičky nástroje (okolo 8 400 N). Nástroj pokračoval v ohýbání plechu, přičemž maximální síla dosáhla přes 15 100 N. Následně byl nástroj vyjmut a nebylo zjištěno žádné další poškození kromě již zmíněného napěchovaného kontaktního rádiusu. Zejména u tohoto nástroje by bylo vhodné navrhnout větší rádius a zkoušku zopakovat. Průběh zkoušky je zobrazen v grafu na Obr. 102. Dále na Obr. 103 je nástroj po ukončení zkoušky.

Zkouška nástroje č. 3 - orientace "ve stoje"



Obr. 102 - Graf zkoušky nástroje č. 3 - orientace "ve stoje"



Obr. 103 - Destrukce nástroje č. 3 - orientace "ve stoje"

9.5.4 Zhodnocení výsledků zkoušek nástrojů

Všechny zkoušené nástroje dokázaly ohnout plechy z materiálů **HX 180 BD** (a), **S355** (b), **Dogal 780 CP** (c) i z **korozivzdorné oceli AISI 304** (d) bez známek opotřebení.

U nástroje č. 1 (obě orientace tisku) došlo při ohýbání plechu z materiálu **S235 o tloušťce 4 mm** (e) k drobným otlakům kontaktního rádiusu. Následně při ohýbání posledního plechu z materiálu **S235 o tloušťce 8 mm** (f) došlo u obou nástrojů k okamžitému přechování špičky. U nástroje tisknutého „ve stoje“ došlo ke konci zkoušky k rozlomení. Nástroj tisknutý „na plocho“ si zachoval svou celistvost, ale pod upěchovanou částí byla nalezena trhlinka. Přesto oba nástroje dokázaly tento plech ohnout.

U nástroje č. 2 došlo při ohýbání plechu z materiálu **S235 o tloušťce 4 mm** (e) k rozdílům mezi orientacemi. U nástroje tisknutého „ve stoje“ došlo pouze k otlakům kontaktního rádiusu. K těmto otlakům došlo i u nástroje, tisknutého „na plocho“. Navíc se ale začala odlupovat vrstva filamentu (z boční strany nástroje). Pro tento typ plechu je tedy vhodnější orientace „ve stoje“. Změna nastala při ohýbání posledního plechu z materiálu **S235 o tloušťce 8 mm** (f). Nástroj s orientací „ve stoje“ se téměř ihned po začátku zkoušky rozlomil napůl a plech neohnul. Naopak u nástroje s orientací „na plocho“ došlo k prasknutí několika vrstev filamentu, ale přesto dokázal plech ohnout.

U nástroje č. 3 (obě orientace tisku) došlo při ohýbání plechu z materiálu **S235 o tloušťce 4 mm** (e) k drobným otlakům kontaktního rádiusu. Následně při ohýbání posledního plechu z materiálu **S235 o tloušťce 8 mm** (f) nastalo u obou nástrojů přechování špičky. U nástroje tisknutého „na plocho“ nastalo přechování při síle okolo 8 100 N a u nástroje tisknutého „ve stoje“ nastalo přechování při síle okolo 8 400 N. Jinak zůstaly oba nástroje bez dalšího poškození a jejich masivní tvar se ukázal jako nejvhodnější.

Tab. 28 – Maximální hodnoty dosažených sil při zkouškách nástrojů

Nástroj	Materiál plechu						
	HX 180 BD	S355 plech č. 1	S355 plech č. 2	Dogal 780 CP	Korozivzdorná ocel AISI 304	S235 t_4mm	S235 t_8mm
1P	91,1	187,2	188,3	1685,8	1390	9010,1	20922,8
1V	110,9	192,6	192,1	1660,7	991,5	8530,4	20109
2P	80,8	172,4	169,9	1452,8	968,4	7494,6	14762,9
2V	93,7	172,6	161,7	1412,1	1147,1	7027,3	13900,2
3P	84,6	156,1	148,4	1338,7	857,8	6722,8	14069,5
3V	85,1	166,4	161	1386,1	818,5	6856,5	15110,8

Poznámka: V tabulce jsou uvedeny hodnoty maximálních sil v [N], čísla 1,2,3 udávají číslo nástroje, písmeno P udává orientaci tisku „na plocho“ a písmeno V udává orientaci „ve stoje“.

10 Závěr

Cílem diplomové práce je porovnání různých, 3D tiskem vyráběných nástrojů pro ohýbání plechů. Na začátku teoretické části je provedeno seznámení s technologií 3D tisku podrobněji zaměřené na metodu FFF (Fused Filament Fabrication). Významná pozornost je věnována vlivu parametrů tisku na mechanické vlastnosti součásti, přičemž mezi ty nejvýznamnější se řadí orientace dílu na tiskové podložce a hustota a typ infillu. Dále jsou stručně popsány mechanické zkoušky tahem, tlakem, v tříbodovém ohybu a ve vzpěru. Následuje vysvětlení metody digitální korelace obrazu (DIC) na jejíž principu funguje optický systém ARAMIS využívaný pro pozorování deformačních dějů u zatěžovaného tělesa v reálném čase. Závěr teoretické části je věnován rozsáhlé rešerši současného stavu v oblasti tváření plechů s využitím nástrojů vyráběných 3D tiskem. V této rešerši jsou shrnuty poznatky z pěti studií, u nichž byl kladen důraz na vzájemnou rozdílnost, a bylo tak pokryté širší spektrum této oblasti.

V experimentální části byly ověřeny poznatky nabyté provedenou rešerší. Byly stanoveny čtyři mechanické zkoušky (tahem, tlakem, tříbodovým ohybem a vzpěrem), pro něž byly navrženy zkušební tělesa, parametry tisku, a nakonec parametry samotných zkoušek. Tělesa byla vtištěna na domácí tiskárně ENDER 3 PRO od značky Creality. Výsledky těchto zkoušek ukázaly, že v sérii vzorků se stejnými parametry se objevuje určitá variabilita. Za tuto skutečnost je zodpovědná samotná kvalita tisku. Přesto byly zkouškami získány užitečné informace. Použití přímočarého infillu přineslo jedny z nejlepších mechanických vlastností oproti jiným typům infillu, a zároveň dosahuje nejrychlejších dob tisku.

Orientaci součásti na tiskové podložce je nutné volit s ohledem na typ a směr předpokládaného zatížení, a také na tvar dané součásti. Pro vzorky navržené v této práci se pro tahové a ohybové zatížení ukázala jako nejlepší orientace „na hraně“. Pro zatížení vzpěrem to byla orientace „na plochu“. Pro tlakové zatížení nebyl tento parametr ověřován a zatěžující síla působila kolmo na rovinu tisku zkušebního vzorku. Dle předpokladů dosahovala nejlepších hodnot 100 % hustota infillu. V této práci byly zjišťovány maximální možné hodnoty zatížení. Při navrhování součásti v praxi by bylo vhodné navrhnout tento parametr s ohledem na velikost působícího zatížení a využitím nižší hustoty infillu ušetřit čas, materiál, a s tím související náklady.

V poslední části této práce byly z uvažovaných geometrií vybrány tři ohýbací nástroje. Každý nástroj byl navržen ve dvou orientacích („na plocho“ a „ve stoje“) určených podle jejich tvaru. Byl použit přímočarý infill se 100 % hustotou a materiál PLA od výrobce Creality. Zkouška nástrojů probíhala na šesti typech plechu o tloušťce v rozmezí 0,7 mm až 8 mm. U každého nástroje byly pro kontrolu ohnuty dva kusy plechu z materiálu S355 a z ostatních typů plechů vždy po jednom kusu. Pevnost zvolených plechů měla stoupající tendenci a zkouška by byla ukončena, pokud by nastala destrukce nástroje. Po každé zkoušce byla zkontrolována funkční plocha nástroje, zda jeví známky porušení. Pokud by byl nástroj porušen, provedl by se výtisk nového nástroje.

Z výsledků je patrné, že volba orientace je velice individuální, neboť vhodná orientace pro jeden typ nástroje není vhodnou orientací pro jiný. U všech nástrojů došlo k otlacení jejich špičky při ohýbání plechu z materiálu S235 o tloušťce 4 mm. Tyto drobné otlaky nezpůsobily změnu geometrie a nebylo pozorováno ani jiné porušení. Bylo rozhodnuto, že se tyto nástroje použijí i pro poslední zkoušku. Při ohýbání posledního plechu z materiálu S235 o tloušťce 8 mm došlo k destrukci všech nástrojů. Ovšem i přes destrukci dokázala většina nástrojů tento plech ohnout do požadované polohy. Pouze nástroj č. 2 s orientací „ve stoje“ byl rozlomen v samotném počátku zkoušky.

Použité nástroje měly rozměr kontaktního rádiusu 2 mm. S ohledem na dosažené výsledky v této práci bych pro její pokračování navrhoval provést zkoušku se zvětšeným kontaktním rádiusem. Tím by bylo možné zjistit, zda nástroj dokáže ohnout plech z materiálu S235 o tloušťce 4 mm, aniž by došlo k drobným otlakům. Dále navrhuji pokusit se navržené nástroje vyztuzit pomocí kovových tělísek (plech, čep). Návrh využití výtuzí na nástrojích z této práce je zobrazen na Obr. 104 a Obr. 105. Dalším způsobem vyztužení nástrojů by mohlo být použití výtuzí při samotném tisku (uhlíková nebo skleněná vlákna). V poslední řadě navrhuji provést numerické simulace a získané výsledky následně experimentálně ověřit.



Obr. 104 - Nástroj č. 2 s dutinami pro výztuž ve formě čepů



Obr. 105 - Nástroj č. 3 s dutinou pro výztuž ve formě plechu

Seznam použité literatury

- [1] CHACÓN, J.M., M.A. CAMINERO, E. GARCÍA-PLAZA a P.J. NÚÑEZ. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design* [online]. 2017, 124, 143-157 [cit. 2022-08-11]. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.matdes.2017.03.065>
- [2] QAMAR TANVEER, Md., Gautam MISHRA, Siddharth MISHRA a Rohan SHARMA. Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed Parts – a current review. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 62, 100-108 [cit. 2022-08-11]. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.matpr.2022.02.310>
- [3] BERÁNEK, Libor. Aditivní a alternativní technologie, České vysoké učení technické v Praze, fakulta strojní, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie. 2020 [cit. 2022 08 11].
- [4] Types of 3D printing technology [online]. GLOBAL3D.pl, 2018 [cit. 2022-08-12]. Dostupné z: <https://global3d.pl/en/module/psblog/module-psblog-blog?id=18>
- [5] FDM (Fused deposition modeling) [online]. Praha: Cotu [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/134/fdm-fused-deposition-modeling>
- [6] STRÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA, Martin BACH a Petr Memory DRAGON. Základy 3D tisku s Josefem Průšou [online]. Praha: Prusa Research a.s, 2019 [cit. 2022-07-06].
- [7] Polární tiskárna obrázek: Polar 3D Launches Unique Polar Coordinate-Based FFF 3D Printer at CES 2022. 3D print.com: 3D Printer and 3D Printing News [online]. 2022 [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: <http://3dprint.com/35656/polar-3d-printer-ces-2022/>
- [8] JAIN, R. a N. GUPTA. Design optimization of PLA lattice in 3D printing. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 59, 1577-1583 [cit. 2022-08-11]. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.matpr.2022.02.186>

- [9] DOSHI, Manav, Ameya MAHALE, Suraj KUMAR SINGH a Samadhan DESHMUKH. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 50, 2269-2275 [cit. 2022-08-11]. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.matpr.2021.10.003>
- [10] MAURYA, Shreesh, Bharatveer MALIK, Praduman SHARMA, Ajay SINGH a Rupesh CHALISGAONKAR. Investigation of different parameters of cube printed using PLA by FDM 3D printer. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 64, 1217-1222 [cit. 2022-08-11]. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.matpr.2022.03.700>
- [11] ATAKOK, Gurcan, Menderes KAM a Hanife Bukre KOC. Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: A statistical investigation. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2022, 18, 1542-1554 [cit. 2022-08-11]. ISSN 22387854. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.jmrt.2022.03.013>
- [12] NAIK, Mahesh, D.G. THAKUR a Sunil CHANDEL. An insight into the effect of printing orientation on tensile strength of multi-infill pattern 3D printed specimen: Experimental study. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 62, 7391-7395 [cit. 2022-08-11]. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.matpr.2022.02.305>
- [13] SRIYA AMBATI, Shivani a Ravindra AMBATIPUDI. Effect of infill density and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed PLA parts. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 64, 804-807 [cit. 2022-08-11]. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.matpr.2022.05.312>
- [14] TANG, Can, Junwei LIU, Yang YANG, Ye LIU, Shiping JIANG a Wenfeng HAO. Effect of process parameters on mechanical properties of 3D printed PLA lattice structures. *Composites Part C: Open Access* [online]. 2020, 3 [cit. 2022-08-11]. ISSN 26666820. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.jcomc.2020.100076>

- [15] LOKESH, N., B.A. PRAVEENA, J. SUDHEER REDDY, Vikram Kedambadi VASU a S. VIJAYKUMAR. Evaluation on effect of printing process parameter through Taguchi approach on mechanical properties of 3D printed PLA specimens using FDM at constant printing temperature. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 52, 1288-1293 [cit. 2022-08-11]. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.matpr.2021.11.054>
- [16] HIKMAT, Mohammed, Sarkawt ROSTAM a Yassin Mustafa AHMED. Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology. *Results in Engineering* [online]. 2021, 11 [cit. 2022-08-11]. ISSN 25901230. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.rineng.2021.100264>
- [17] MANI, M., A.G. KARTHIKEYAN, K. KALAISELVAN, P. MUTHUSAMY a P. MURUGANANDHAN. Optimization of FDM 3-D printer process parameters for surface roughness and mechanical properties using PLA material. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022 [cit. 2022-08-11]. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.matpr.2022.05.422>
- [18] MILSIMER, PETR. Vliv perimetrů na mechanické vlastnosti plastových 3D tištěných dílů [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-08-12]. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Vladislav Andronov.
- [19] PRIYANKA, GTL, Kamlesh KUMAR, V. Guru Prathap REDDY a T. TADEPALLI. Mechanical reliability of extruded PLA filaments. *Materialia* [online]. 2021, 16 [cit. 2022-08-11]. ISSN 25891529. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.mtla.2021.101075>
- [20] FOLTAS, TOMÁŠ. Materiály pro 3D tisk [online]. TriLAB Group, 2021 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://trilab3d.com/cs/magazin/materialy-pro-3d-tisk/>
- [21] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování termoplastů, biologicky odbouratelné plasty – bioplasty, část 1. – 3. [online]. 2014 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.sk/sk/vstrikovani-termoplastu-biologicky-odbouratelne-plasty-bioplasty-1-cast/c/2274/>
- [22] GUTIERREZ, Rocío Jaimes. All You Need To Know About PLA [online]. *Bioplastics NEWS*, 2019 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://bioplasticsnews.com/2019/07/02/all-you-need-to-know-about-pla/>

- [23] Materiálový slovník [online]. MATERIAL PRO 3D [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>
- [24] O'CONNELL, Jackson. PLA Plastic / Material – The Ultimate Guide. All3DP [online]. 2021 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-pla-plastic-material-properties/>
- [25] Ruiz-Hitzky E, Fernandes FM (2013) Progress in bionanocomposites: from green plastics to biomedical applications. Prog Polym Sci 38:1391
- [26] GROSS, Richard A. a Bhanu KALRA. Biodegradable Polymers for the Environment. Science [online]. 2002, 297(5582), 803-807 [cit. 2022-08-11]. ISSN 0036-8075. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1126/science.297.5582.803>
- [27] Chemical structure of poly(lactic acid) [online]. In: . [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structure-of-poly\(lactic-acid\)_fig1_322920139](https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structure-of-poly(lactic-acid)_fig1_322920139)
- [28] TECHNICKÝ LIST: Prusament PLA. https://prusament.com/media/2020/05/PLA_TechSheet_CZ_22052020.pdf. Prusa Polymers, 2018.
- [29] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery: Kapitola 9 - Mechanické vlastnosti polymerů - statické namáhání [online]. Střední odborné učiliště Svitavy, 2016 [cit. 2022-08-11]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [30] Ductile Material Stress - Strain Curve [online]. In: . [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/materials-science/material-properties/strength/hookes-law/>
- [31] JANDA, LUDĚK. TAHOVÁ ZKOUŠKA TRUBEK [online]. Brno, 2015 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=104795. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce EVA PETERKOVÁ.
- [32] GARSTKA, Aleš. ZKOUŠKA PEVNOSTI V TAHU [online]. 2012 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/KOM_Zkou%C5%A1ka-pevnosti-v-tahu_PL.pdf

- [33] Technologie, Analytické metody: Zkouška tahem [online]. NCK MATCA [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/zkouska-tahem/>
- [34] HLADKÝ, Ing. Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení [online]. In: . [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: http://www.pf.jcu.cz/structure/departments/kaft/wp-content/uploads/Ing_Hladky_4.pdf
- [35] SMETANOVÁ, Anna. Zkoušky technických materiálů [online]. In: . SOŠ a SOU Kuřim [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: https://www.zamekkurim.cz/security/Dum%20-%20Digitalni%20ucebni%20materialy/13_Sada_Materialy_2/VY_32_INOVACE_13_04_Zkousky_materialu_rozdeleni.pdf
- [36] Kontrolní a zkušební metody: Statické zkoušky krátkodobé. Ústav fyziky a materiálového inženýrství [online]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: https://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [37] E. HOFER, Kenneth. Materials testing [online]. Encyclopædia Britannica [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/materials-testing>
- [38] MACKENZIE, Scott. Back to basics: Mechanical testing – the tensile test [online]. Gear Solutions, 2020 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://gearsolutions.com/departments/hot-seat/back-to-basics-mechanical-testing-the-tensile-test/>
- [39] G.U.N.T., Gerätebau GmbH 2022. Materials testing: Mechanical testing methods [online]. [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: https://www.gunt.de/images/download/mechanical_testing_methods_english.pdf
- [40] HANDELS GMBH – ORGANIZAČNÍ SLOŽKA, SHIMADZU. Stanovení ohybových vlastností – zkouška třibodovým ohybem na plastech dle EN ISO 178 [online]. 2020 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/stanoveni-ohybovych-vlastnosti-%E2%80%93-zkouska-tribodovym-ohybem-na-plastech-dle-en-iso-178/c/6901/>
- [41] ZAJÍČEK, M. a V. ADÁMEK. VZPĚR PŘÍMÝCH PRUTŮ [online]. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta aplikovaných věd, katedra mechaniky [cit. 2022-08-12]. Dostupné z: <https://www.kme.zcu.cz/kmet/pp2/vzper-primych-prutu/shrnuti.pdf>

- [42] WIRATAMY, Caesara. ANALISIS BUCKLING [online]. In: . [cit. 2022-08-12]. Dostupné z: <https://www.aeroengineering.co.id/2021/01/analisis-buckling/>
- [43] Multikamerové DIC měření. Dantec Dynamics [online]. LABTECH [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.mereni-deformaci.cz/multikamerove-dic/>
- [44] Metrology systems: ARAMIS [online]. GOM [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/aramis.html>
- [45] Metrology systems: ARAMIS for Education [online]. GOM [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/education/aramis-for-education.html>
- [46] HORÁK, Lukáš. Zjištění křivek přetvárné pevnosti pomocí optického systému ARAMIS [online]. 2011 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/11867/mgr_22690.pdf?sequence=1. Diplomová práce. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Vedoucí práce Jiří Sobotka.
- [47] Výsledek tahové zkoušky prostřednictvím GOM ARAMIS, systému DIC a měřicího vzorku s tenzometrem připojeným ke konvenční metodě měření [online]. In: . 2020 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://m.blog.naver.com/iamju1212/221933743760>
- [48] Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software. In: Correlated Solutions [online]. s. 56 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/condensed-shortcourse.pdf>
- [49] ZARAGOZA, Veronica Geraldine, Kedarnath RANE, Matteo STRANO a Michele MONNO. Manufacturing and performance of 3D printed plastic tools for air bending applications. Journal of Manufacturing Processes [online]. 2021, 66, 460-469 [cit. 2022-07-26]. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.jmapro.2021.04.045>
- [50] NAKAMURA, Naotaka, Ken-ichiro MORI, Fumie ABE a Yohei ABE. Bending of sheet metals using plastic tools made with 3D printer. Procedia Manufacturing [online]. 2018, 15, 737-742 [cit. 2022-07-26]. ISSN 23519789. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.promfg.2018.07.312>
- [51] ZARAGOZA, Veronica Geraldine, Matteo STRANO, Lorenzo IORIO a Michele MONNO. Sheet metal bending with flexible tools. Procedia Manufacturing [online].

- 2019, 29, 232-239 [cit. 2022-07-26]. ISSN 23519789. Dostupné z:
<https://doi.org/doi:10.1016/j.promfg.2019.02.131>
- [52] SCHUH, Günther, Georg BERGWEILER, Philipp BICKENDORF, Falko FIEDLER a Can COLAG. Sheet Metal Forming Using Additively Manufactured Polymer Tools. *Procedia CIRP* [online]. 2020, 93, 20-25 [cit. 2022-07-27]. ISSN 22128271. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.procir.2020.04.013>
- [53] Kuznetsov VE, Solonin AN, Urzhumtsev OD, Schilling R, Tavitov AG. Strength of PLA Components Fabricated with FDM Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process; 2018.
- [54] TONDINI, Fabio, Ulfar ARINBJARNAR, Alberto BASSO a Chris Valentin NIELSEN. 3D printing to facilitate flexible sheet metal forming production. *Procedia CIRP* [online]. 2021, 103, 91-96 [cit. 2022-07-27]. ISSN 22128271. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.procir.2021.10.014>

Seznam obrázků

Obr. 1 - Rozdělení aditivních technologií podle použitého materiálu [3].....	- 1 -
Obr. 2 - Rozdělení 3D tiskáren (zleva: kartézská, delta, polar) [6; 7].....	- 2 -
Obr. 3 – Extrudér [6]	- 3 -
Obr. 4 - Princip 3D tisku [4].....	- 4 -
Obr. 5 - Typy infillu	- 6 -
Obr. 6 - Vzájemné porovnání hustot infillu.....	- 8 -
Obr. 7 - Vliv rychlosti tisku na mez pevnosti a mez pružnosti v tahu [14].....	- 9 -
Obr. 8 - Vliv teploty hotendu na mez pevnosti a mez pružnosti v tahu [14].....	- 9 -
Obr. 9 – Vhodný směr zatěžování součásti vzhledem k orientaci tisku	- 10 -
Obr. 10 – Nevhodný směr zatěžování součásti vzhledem k orientaci tisku	- 10 -
Obr. 11 - Chemická struktura polymeru PLA [27].....	- 12 -
Obr. 12 - Schéma výroby polymeru PLA [21]	- 12 -
Obr. 13 - Rozdělení mechanických charakteristik [29].....	- 14 -
Obr. 14 - Diagram mechanické zkoušky [30].....	- 15 -
Obr. 15 – Zkušební těleso (vlevo) a schéma zkoušky tahem (vpravo) [39].....	- 16 -
Obr. 16 - Schéma zkoušky tříbodovým ohybem [39]	- 16 -
Obr. 17 - Schéma zkoušky tlakem [39]	- 17 -
Obr. 18 - Schéma zkoušky vzpěru [42]	- 17 -
Obr. 19 - Schéma systému ARAMIS [47].....	- 18 -
Obr. 20 - Posun sledované fazety během deformačního procesu [48]	- 19 -
Obr. 21 - Sekvence experimentální části: (a) 3D model nástroje; (b) 3D tisk nástroje; (c) Zkouška ohybu; (d) Vzorky po zkoušce ohybu (e) Měření charakteristik vzorků po zkoušce ohybu [49]	- 21 -
Obr. 22 - Proces ohýbání plechu [50].....	- 22 -
Obr. 23 - Kvalita povrchu plechů pro různé kombinace nástrojů [50].....	- 22 -
Obr. 24 – (a) Velikost přírůstku úhlu k úhlu ohybu pro různé kombinace nástrojů; (b) velikost odpružení pro různé kombinace nástrojů [50].....	- 22 -
Obr. 25 - (a) Koncepce ohýbání vzduchem zhotovená ze standardního kovového pouzdra a rychle vyměnitelné polymerní vložky ve tvaru V; (b) výkres průřezu kovového rámu; (c) rozměry nylonové vložky; (d) rozměry polyuretanové vložky; (e) rozměry polykarbonátové vložky; (f) a (g) rozměry pryžových vložek [51]	- 24 -
Obr. 26 - Ukázka zpevňujících prvků; (a) šroubové elementy; (b) přídatné vrstvy [52] .-	25

-	
Obr. 27 - Vliv přídavných vrstev na průběh zatěžující síly [52]	- 25 -
Obr. 28 - 3D sestava lisovacího nástroje [54]	- 26 -
Obr. 29 – Návrh výrobku [54]	- 26 -
Obr. 30 - Postupný průběh lisování (zleva doprava) [54]	- 27 -
Obr. 31 - Hotový výrobek [54].....	- 27 -
Obr. 32 - Definice orientace vzorku na tiskové podložce	- 28 -
Obr. 33 - Zkušební těleso pro zkoušku tlakem (zleva: 3D model, výkres).....	- 29 -
Obr. 34 - Volba typu infillu	- 31 -
Obr. 35 – Vzorky pro zjišťování vlivu typu a hustoty infillu na mechanické vlastnosti	- 31 -
Obr. 36 - Rozdílné výšky vrstvy.....	- 32 -
Obr. 37 - Vytištěné vzorky pro zkoušku tlakem.....	- 33 -
Obr. 38 - Vážení vzorků	- 33 -
Obr. 39 - Univerzální zkušební trhací stroj LabTest Model 5.100SP1	- 34 -
Obr. 40 - Graf vlivu hustoty infillu na průběh síly	- 35 -
Obr. 41 - Graf vlivu výšky vrstvy na průběh síly	- 38 -
Obr. 42 - Graf závislosti poklesu síly od referenčního vzorku na hustotě infillu (zkouška tlakem).....	- 40 -
Obr. 43 – Graf závislosti poklesu síly od referenčního vzorku na výšce vrstvy (zkouška tlakem).....	- 40 -
Obr. 44 - Zdeformované vzorky po zkoušce tlakem	- 40 -
Obr. 45 – Zkušební těleso pro zkoušku tahem (nahore 3D model, dole výkres)	- 41 -
Obr. 46 - Vytištěné vzorky pro zkoušku tahem.....	- 42 -
Obr. 47 - Kontrolované rozměry na zkušebním tělese pro zkoušku tahem.....	- 43 -
Obr. 48 - Akrylový sprej od výrobce MoTip (vlevo bílý, vpravo černý).....	- 43 -
Obr. 49 - Zkušební tělesa pro zkoušku tahem opatřena černobílým patternem	- 43 -
Obr. 50 - Kamerový systém ARAMIS	- 44 -
Obr. 51 - Upnuté zkušební těleso při zkoušce tahem	- 45 -
Obr. 52 – Ukázka výsledků ze systému ARAMIS	- 45 -
Obr. 53 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce tahem (orientace "ve stoje").....	- 47 -
Obr. 54 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce tahem (orientace "na plocho").....	- 47 -
Obr. 55 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce tahem (orientace "na hraně").....	- 48 -
Obr. 56 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce tahem (porovnání orientací).....	- 48 -
Obr. 57 - Graf závislosti poklesu síly od referenčního vzorku na parametrech tisku	

(zkouška tahem).....	- 49 -
Obr. 58 - Vzorky po zkoušce tahem	- 50 -
Obr. 59 - Zkušební těleso pro zkoušku tříbodovým ohybem (nahore 3D model, dole výkres)	- 51 -
Obr. 60 - Vytištěné vzorky pro zkoušku tříbodovým ohybem.....	- 52 -
Obr. 61 - Kontrolované charakteristiky na zkušebním tělese pro zkoušku tříbodovým ohybem	- 53 -
Obr. 62 - Výchozí poloha pro zkoušku tříbodovým ohybem.....	- 54 -
Obr. 63 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce tříbodovým ohybem (orientace "na plocho")	- 56 -
Obr. 64 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce tříbodovým ohybem (orientace "na hraně").....	- 56 -
Obr. 65 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce tříbodovým ohybem (orientace "ve stoje")	- 57 -
Obr. 66 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce tříbodovým ohybem (porovnání orientací)	- 57 -
Obr. 67 - Graf závislosti poklesu síly od referenčního vzorku na parametrech tisku	- 58 -
Obr. 68 - Zkušební těleso pro zkoušku vzpěru (nahore 3D model, dole výkres).....	- 59 -
Obr. 69 - Vytištěné vzorky pro zkoušku vzpěru.....	- 60 -
Obr. 70 - Kontrolované charakteristiky na zkušebním tělese pro zkoušku vzpěru	- 61 -
Obr. 71 - Průběh zkoušky vzpěru	- 61 -
Obr. 72 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce vzpěru (orientace "na plocho")	- 64 -
Obr. 73 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce vzpěru (orientace "na hraně")	- 64 -
Obr. 74 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce vzpěru (orientace "ve stoje").....	- 65 -
Obr. 75 - Graf závislosti síly na dráze při zkoušce vzpěru (porovnání orientací).....	- 65 -
Obr. 76 - Graf závislosti poklesu síly od referenčního vzorku na parametrech tisku	- 66 -
Obr. 77 - 3D model a výkres nástroje č. 1	- 68 -
Obr. 78 - 3D model a výkres nástroje č. 2	- 69 -
Obr. 79 - 3D model a výkres nástroje č. 3	- 69 -
Obr. 80 - Parametry tisku nástroje č. 1	- 71 -
Obr. 81 - Parametry tisku nástroje č. 2	- 72 -
Obr. 82 - Parametry tisku nástroje č. 3	- 73 -
Obr. 83 - Systém pro upínání nástrojů.....	- 74 -
Obr. 84 - Schéma zkoušky nástrojů.....	- 75 -

Obr. 85 - Druhy plechů pro zkoušky nástrojů	- 76 -
Obr. 86 - Nástroj č. 1 při zkoušce.....	- 77 -
Obr. 87 - Nástroj č. 2 při zkoušce.....	- 78 -
Obr. 88 - Nástroj č. 3 při zkoušce.....	- 79 -
Obr. 89 - Graf zkoušky nástroje č. 1 - orientace "na plocho".....	- 80 -
Obr. 90 - Destrukce nástroje č. 1 - orientace "na plocho"	- 81 -
Obr. 91 - Graf zkoušky nástroje č. 1 - orientace "ve stoje"	- 82 -
Obr. 92 - Destrukce nástroje č. 1 - orientace "ve stoje"	- 82 -
Obr. 93 - Nástroj č. 1 (orientace "ve stoje") v konečné poloze při zkoušce.....	- 83 -
Obr. 94 - Destrukce nástroje č. 2 - orientace "na plocho"	- 83 -
Obr. 95 – Nástroj č. 2 (orientace „na plocho“) po skončení zkoušky	- 84 -
Obr. 96 - Graf zkoušky nástroje č. 2 - orientace "na plocho".....	- 84 -
Obr. 97 - Graf zkoušky nástroje č. 2 - orientace "ve stoje"	- 85 -
Obr. 98 – Destrukce nástroje č. 2 - orientace "ve stoje".....	- 85 -
Obr. 99 - Graf zkoušky nástroje č. 3 - orientace "na plocho"	- 86 -
Obr. 100 - Destrukce nástroje č. 3 - orientace "na plocho"	- 86 -
Obr. 101 - Nástroj č. 3 - (orientace "na plocho")	- 87 -
Obr. 102 - Graf zkoušky nástroje č. 3 - orientace "ve stoje"	- 88 -
Obr. 103 - Destrukce nástroje č. 3 - orientace "ve stoje"	- 88 -
Obr. 104 - Nástroj č. 2 s dutinami pro výztuž ve formě čepů	- 92 -
Obr. 105 - Nástroj č. 3 s dutinou pro výztuž ve formě plechu	- 92 -

Seznam tabulek

Tab. 1 - Typy infillu	- 6 -
Tab. 2 - Závislost doby tisku na hustotě a typu infillu	- 7 -
Tab. 3 - Závislost spotřebovaného množství materiálu na hustotě a typu infillu.....	- 7 -
Tab. 4 - Výšky vrstvy nejběžněji používané v programu PrusaSlicer.....	- 11 -
Tab. 5 - Přibližné vlastnosti polymeru PLA [23; 28]	- 13 -
Tab. 6 - Vlastnosti zkoušených plechů [50]	- 21 -
Tab. 7 - Vlastnosti materiálů použitých pro výrobu nástrojů [51]	- 23 -
Tab. 8 - Vlastnosti zkoušených plechů [52]	- 24 -
Tab. 9 – Proměnlivé parametry tisku pro zkoušku tlakem (vliv hustoty infillu).....	- 30 -
Tab. 10 - Fixní parametry tisku pro zkoušce tlakem (vliv hustoty infillu).....	- 30 -

Tab. 11 – Proměnlivé parametry tisku	- 32 -
Tab. 12 - Fixní parametry tisku	- 32 -
Tab. 13 - Naměřené hodnoty ze zkoušky tlakem (vliv hustoty infillu).....	- 36 -
Tab. 14 - Naměřené hodnoty ze zkoušky tlakem (vliv hustoty infillu) - pokračování...	- 37 -
Tab. 15 - Naměřené hodnoty ze zkoušky tlakem (vliv výšky vrstvy).....	- 39 -
Tab. 16 - Proměnlivé parametry tisku pro zkoušku tahem.....	- 42 -
Tab. 17 - Fixní parametry tisku pro zkoušku tahem.....	- 42 -
Tab. 18 - Naměřené hodnoty ze zkoušky tahem	- 46 -
Tab. 19 - Fixní parametry tisku pro zkoušku tříbodovým ohybem.....	- 51 -
Tab. 20 - Proměnlivé parametry tisku pro zkoušku tříbodovým ohybem.....	- 52 -
Tab. 21 - Naměřené hodnoty ze zkoušky tříbodovým ohybem.....	- 55 -
Tab. 22 - Fixní parametry tisku pro zkoušku vzpěru.....	- 59 -
Tab. 23 - Proměnlivé parametry tisku pro zkoušku vzpěru.....	- 60 -
Tab. 24 - Naměřené hodnoty ze zkoušky vzpěru	- 63 -
Tab. 25 - Závěr z mechanických zkoušek	- 67 -
Tab. 26 - Fixní parametry pro tisk nástrojů	- 70 -
Tab. 27 - Charakteristika plechů pro zkoušky nástrojů	- 76 -
Tab. 28 – Maximální hodnoty dosažených sil při zkouškách nástrojů.....	- 89 -

Seznam použitých programů

Inventor Professional 2022 a 2023

Microsoft Office Word 2021

Microsoft Office Excel 2021

PrusaSlicer 2.4.1

ARAMIS Professional 2019

Adobe Photoshop 2021

Test & Motion