

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ  
PRÁCE**

**Petr  
Milsimer**

**2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Milsimer** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **482614**  
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:

**Vliv typu a hustoty infillu na mechanické vlastnosti 3D tištěného lisovacího nástroje**

Název diplomové práce anglicky:

**Effect of infill type and density on mechanical properties of a 3D printed press tool**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je pro zadaný výlisek navrhnout konstrukční řešení nástroje, který bude následně vyroben metodou FFF 3D tisku. Zároveň pro tento nástroj bude upravena tiskárna Creality Ender 5 Plus na Mercury One. Lisovatelnost bude poté ověřena pomocí navrženého 3D tištěného nástroje.

- 1) Seznámení s problematikou FDM/FFF 3D tisku a výroby výlisků
- 2) Charakteristika vytípaného dílu, návrh konstrukčního řešení nástroje
- 3) Úprava 3D tiskárny Ender 5 Plus na Mercury One.
- 4) Návrh metodiky testování a provedení experimentu
- 5) Výroba nástroje, ověření jeho funkčnosti při reálném lisování
- 6) Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN ISO 604  
ASM Handbook 14B  
Základy 3D tisku  
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Vít Novák ústav strojírenské technologie FS**

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

**Ing. Lukáš Chrástanský, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS**

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

Ing. Vít Novák  
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

## Abstrakt

V teoretické části této diplomové práce je popisována metoda FDM (FFF) 3D tisku, kdy byly rozebírány hlavní části 3D tiskáren a byly rozděleny dle jednotlivých typů a principů jejich fungování. V další kapitole byly charakterizovány nejpoužívanější tiskové materiály a jejich mechanické vlastnosti. Dále byly popsány hlavní parametry, které ovlivňují kvalitu 3D tištěných dílů. V poslední části byla zpracována teorie plošného tváření a teorie tlakové zkoušky.

Praktická část byla zaměřena na metodiku testování vhodného materiálu, typu a hustoty infillu pro lisovací nástroje. Výsledky tohoto experimentu byly ověřeny na lisovacím nástroji pro dvojitý ohyb a na nástroji pro lisování příruby, který byl optimalizován pro správné vtahování plechu. Za účelem snížení doby tisku byla přestavěna školní 3D tiskárna, kde byl na základě předchozího experimentu vytvořen dvouřadý lisovací nástroj.

### Klíčová slova:

FDM, 3D tisk, prototypové tvářecí nástroje, tváření za studena, tiskové parametry

## Abstract

In the theoretical part of this thesis, the FDM (FFF) 3D printing method is described, where the main parts of 3D printers were analyzed and divided according to their individual types and principles of operation. In the next chapter, the most used printing materials and their mechanical properties were characterized. Furthermore, the main parameters that affect the quality of 3D printed parts were described. In the last section, the theory of surface forming and the theory of compression testing were elaborated.

The practical part was focused on the methodology of testing the appropriate material, type and density of infill for press tools. The results of this experiment were verified on a double bend press tool and a flange press tool that was optimized for proper drawing in of the sheet metal. In order to reduce the printing time, the school's 3D printer was rebuilt to create a double-flange crimping tool based on the previous experiment.

### Keywords:

FDM, 3D printing, prototype forming tools, cold forming, printing parameters

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma **Vliv typu a hustoty infillu na mechanické vlastnosti 3D tištěného lisovacího nástroje** vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že 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 .....

.....

Jméno, Příjmení

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Vítovi Novákovi za ochotu, cenné rady, trpělivost a čas věnovaný mně a této práci. Dále bych rád poděkoval své přítelkyni a rodině za podporu během mého studia.

# Obsah

Úvod.....	10
1 Úvod do aditivních technologií .....	11
1.1 Metoda FDM (FFF).....	12
1.2 Rozdělení FDM 3D tiskáren podle typu, jejich části a princip fungování .....	13
1.2.1 Kartézská tiskárna .....	14
1.2.2 Delta tiskárna.....	18
1.2.3 Polar tiskárna.....	18
1.2.4 Speciální typ tiskárny .....	19
1.3 Materiály pro FDM 3D tisk.....	20
1.3.1 PLA .....	21
1.3.2 PETG.....	22
1.3.3 ABS .....	23
1.3.4 PC.....	24
1.3.5 Porovnání materiálů z hlediska mechanických vlastností.....	25
1.4 Parametry ovlivňující kvalitu 3D tištěných dílů .....	26
1.4.1 Orientace výtisku a teplota.....	27
1.4.2 Výška vrstvy.....	28
1.4.3 Hustota a vzor infillu.....	29
1.4.4 Počet perimetrů.....	30
1.4.5 Rychlost tisku .....	30
1.4.6 Barva materiálu .....	31
2 Teorie plošného tváření .....	33
2.1 Ohýbání plechu .....	33
3 Teorie tlakové zkoušky.....	36
4 Návrh metodiky testování a provedení experimentu.....	38

4.1	Metodika testování vhodného infillu .....	38
4.2	Vyhodnocení testování vhodného infillu .....	39
4.2.1	Materiál PLA .....	39
4.2.2	Materiál PET-G .....	42
4.2.3	Materiál ABS.....	45
4.2.4	Porovnání materiálů .....	47
4.3	Testování nástroje na dvojitý ohyb .....	50
4.4	Vyhodnocení testování nástroje na dvojitý ohyb .....	52
4.4.1	Vyhodnocení 20% infillu .....	52
4.4.2	Vyhodnocení 80% infillu .....	53
4.5	Testování 3D tištěného nástroje verze 1 .....	54
4.6	Vyhodnocení 3D tištěného nástroje verze 1.....	56
4.7	Vyhodnocení 3D tištěného nástroje verze 2 (final).....	59
5	Stavba tiskárny pro dvouřadý nástroj .....	62
6	Návrh a tisk dvouřadého nástroje .....	68
7	Závěr.....	71
8	Bibliografie.....	74
	Seznam obrázků .....	80
	Seznam tabulek .....	82



## Seznam zkratek

ABS	Acrylnitril butadien styrol
ASA	Acrylonitrile styrene acrylate
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
PEEK	Polyether ether ketone
PET-G	Polyethylene terephthalate glycol
PLA	Polylactic acid
SLA	Stereolithography - metoda tisku
STL	Stereolithography - formát 3D modelu

# Úvod

Aditivní technologie jsou v dnešní době hojně využívané a uplatnění nachází převážně v rapid prototypingu. Existuje více typů konstrukcí FDM 3D tiskáren, které se odvíjí od účelu dané 3D tiskárny. Trh nabízí různé typy materiálů pro FDM 3D tisk, jejichž výběr závisí na požadovaných mechanických vlastnostech, chemické či teplotní odolnosti.

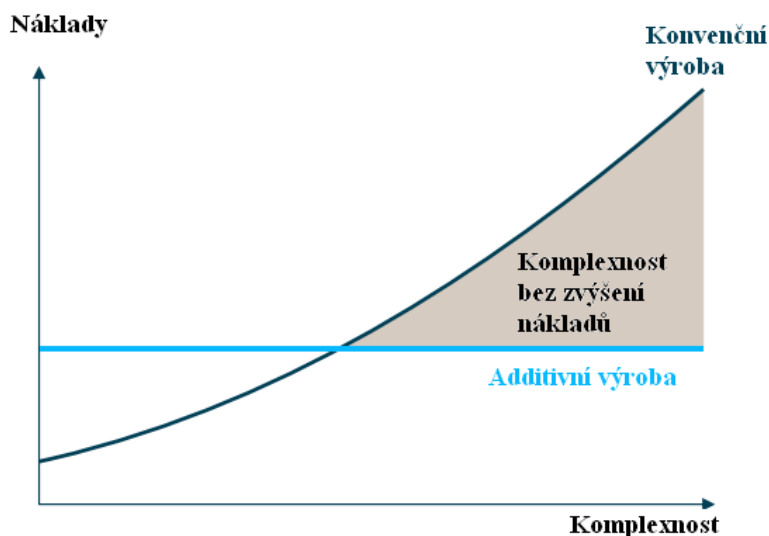
Lisování plechů je jeden z procesů tváření za studena, kdy dochází ke změně tvaru plechu do požadovaného tvaru pomocí lisovacího nástroje. V průmyslu se využívají lisovací nástroje, které jsou konvenčně obráběny a jsou vyráběné z kovu. Problém těchto nástrojů je vysoká cena a s tím spojená vysoká sériovost výroby. Pro malosériovou výrobu může kovový lisovací nástroj výrazně prodražit výsledný výlisek. Tyto nástroje mohou být nahrazeny 3D tištěnými plastovými díly, díky čemuž může dojít k výraznému snížení ceny výlisku při malosériové výrobě a zároveň mohou být včas odhaleny rozměrové chyby v nástroji či chyby v návrhu.

V praxi je důležitou veličinou ovlivňující cenu výrobku doba výroby. Z toho důvodu jsem upravil tiskárnu Creality Ender 5 Plus, která tiskla 3D tištěné lisovací nástroje, na mód Mercury One. Tento mód využívá pouze původní hliníkové konstrukce tiskárny. Výhodou oproti původní tiskárně je kinematika CoreXY, lineární vedení, direct tisková hlava a vzdálený přístup k tiskárně. Tyto úpravy umožňují výrazně zkrátit dobu tisku nástroje se zachováním tiskové kvality, zefektivnit tavení materiálu v hotendu a nabízí uživateli možnost kontroly tisku v reálném čase.

# 1 Úvod do aditivních technologií

Aditivní technologie vznikly začátkem 80. let 20. století. Jedná se o nekonvenční technologie, jejichž princip spočívá v nanášení materiálu po vrstvách. Tímto procesem je dosahováno požadovaného tvaru objektu. Základní stavební materiál bývá obvykle ve formě struny, prášku či kapaliny. [1] [2]

Nespornou výhodou aditivních technologií je fakt, že složitost výrobku nehraje tak velikou roli jako u konvenčních metod (viz Obrázek 1), kterými jsou například frézování či soustružení. Z ekonomického pohledu má největší vliv velikost součástí a s tím spojená doba tisku. Nejvíce je aditivní výroba využívána u rapid prototypingu. Rapid prototyping je metoda, pomocí které je možné 3D model převést do skutečného vytištěného objektu. Rapid prototyping se využívá nejčastěji pro ověření tvaru a funkčnosti daných dílů, neboť tisk těchto součástí je velmi rychlý a ekonomicky nenáročný. Zároveň je také možné daný díl rychle a efektivně optimalizovat a vytisknout více verzí prototypů. [1] [2]



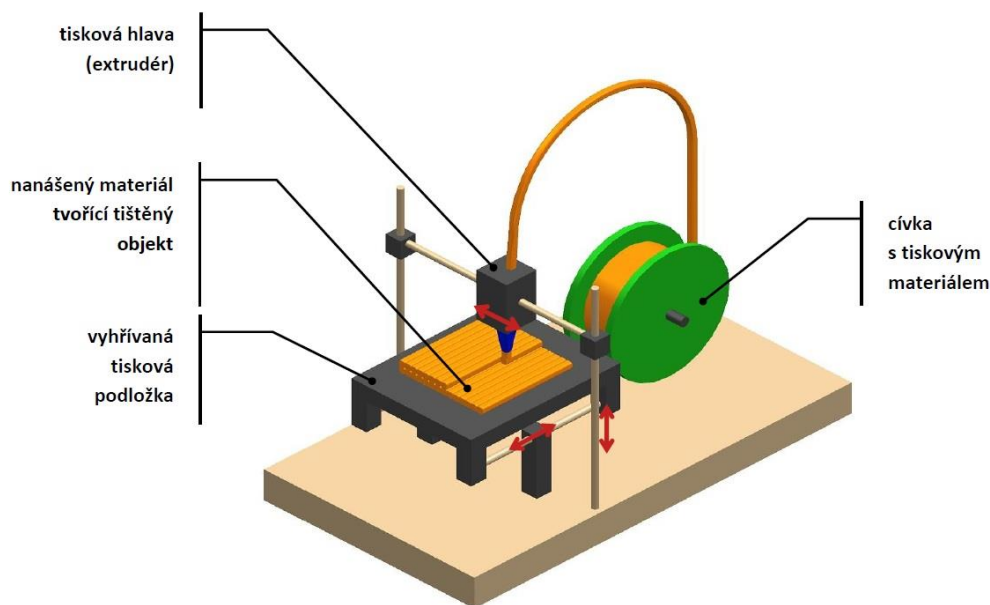
Obrázek 1 Porovnání konvenční a nekonvenční technologie z ekonomického hlediska [2]

Mezi nevýhody aditivních technologií v porovnání s konvenčními technologiemi patří anizotropie. Jedná se o rozdíl mechanických vlastností v různých tiskových orientacích. Zatímco modely vyrobené konvenčními technologiemi mají ve všech orientacích podobnou pevnost, u aditivních technologií, zejména FDM (Fused Deposition Modeling)/FFF 3D tisku je nejmenší pevnost v ose tisku. Další nevýhodou je potřeba použití podpěr u modelů, které mají velký úhel. U těchto výtisků dochází ke špatnému povrchu v místech, kde byly podpěry, a je tak důležitý následný postprocessing. [1] [2]



slicery. Nejpoužívanějšími slicery jsou PrusaSlicer a Ultimaker Cura. V této práci bude používán slicer PrusaSlicer. 3D model je ve formátu STL importován do sliceru a následně se zde nastavují veškeré tiskové parametry, po jejichž nastavení slicer vygeneruje gcode, který je následně poslán do 3D tiskárny. [4] [5] [6]

Během tisku dochází k odmotávání tiskové struny, které se také říká filament. Filament prochází horkým tělesem, který se nazývá hotend. Zde dochází k roztavení a vytlačování taveniny tenkou tryskou na tiskovou podložku. Tryska i tisková podložka jsou řízené počítačem, který převádí rozměry předmětu do souřadnic X, Y a Z. Tryska se u metody FDM pohybuje nad tiskovou podložkou vodorovně a svisle a vykresluje příčný řez 3D modelu. Jakmile je vrstva dokončena, přesouvá se tryska na další vrstvu (viz Obrázek 3). [4] [5] [6]

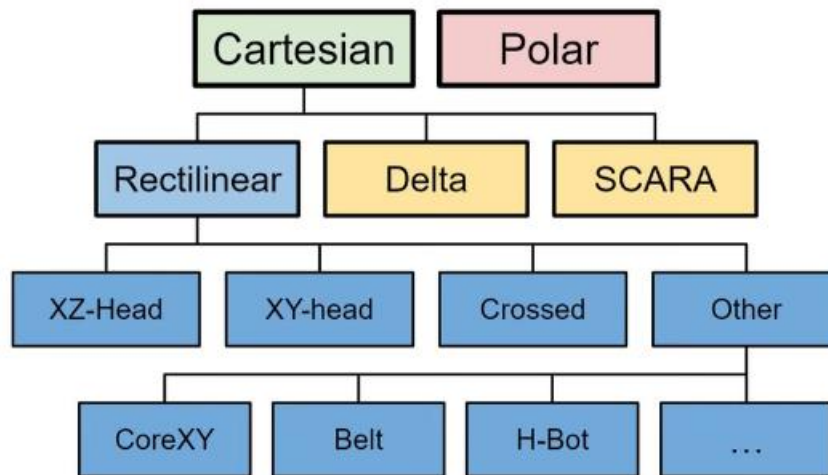


Obrázek 3 Princip FDM (FFF) technologie [7]

## 1.2 Rozdělení FDM 3D tiskáren podle typu, jejich části a princip fungování

Přestože je 3D tisková metoda FDM u všech tiskáren stejná, existuje několik základních typů FDM 3D tiskáren (viz Obrázek 4). Jejich rozdělení se liší podle používání souřadnic a jejich kinematiky. To je spojeno s určitými výhodami a nevýhodami. Přestože

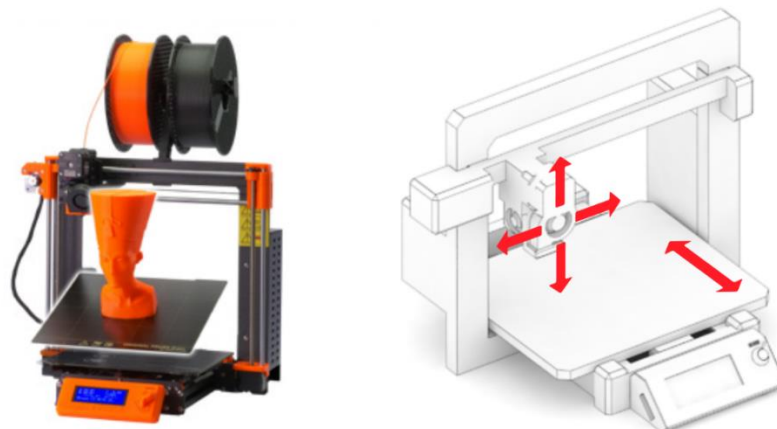
jsou 3D tiskárny odlišné, všechny mají některé základní prvky stejné. Mezi ně patří například tisková struna (filament), hotend a tisková podložka. [8]



Obrázek 4 Jedno z možných rozdělení 3D tiskáren [8]

### 1.2.1 Kartézská tiskárna

Jedná se o nejrozšířenější typ 3D tiskárny, jejíž princip funguje na kartézských souřadnicích. Pohyb je zajištěn ve třech osách, které označujeme jako osy X, Y, Z (viz Obrázek 5). [9] [10] [11]

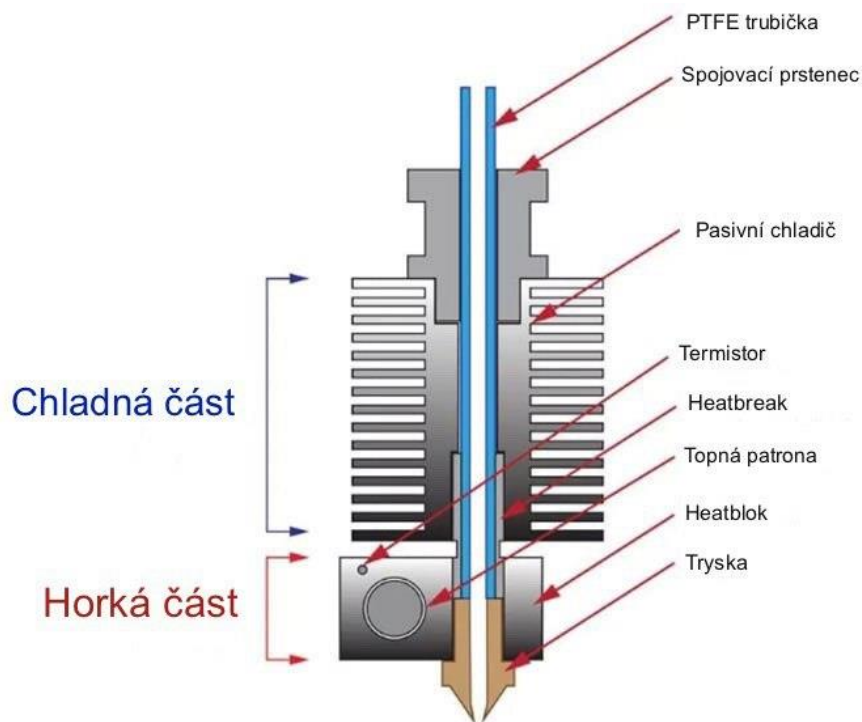


Obrázek 5 Kartézská 3D tiskárna [9]

Základní částí tiskárny je tuhý rám, který je obvykle tvořen hliníkovými profily. Na rámu se ve spodní části nachází tisková podložka, která se pohybuje v ose Y. Tisková podložka je vyhřívána pro lepší adhezi tiskového materiálu k podložce. Vedení tiskové podložky je zajištěno čtveřicí ložisek, které se pohybují po hlazených tyčích. O posuv se stará krokový motor, který pomocí řemenu pohybuje s tiskovou podložkou. Na tiskovou

podložku se umisťuje tiskový plát, aby při sundávání výtisku nedošlo k poškození výhřevu podložky. Tisková podložka má obvykle tvar čtverce nebo obdélníku a velikost se liší dle velikosti rámu, výrobce a předpokládaného využívání tiskárny. [9] [10] [11]

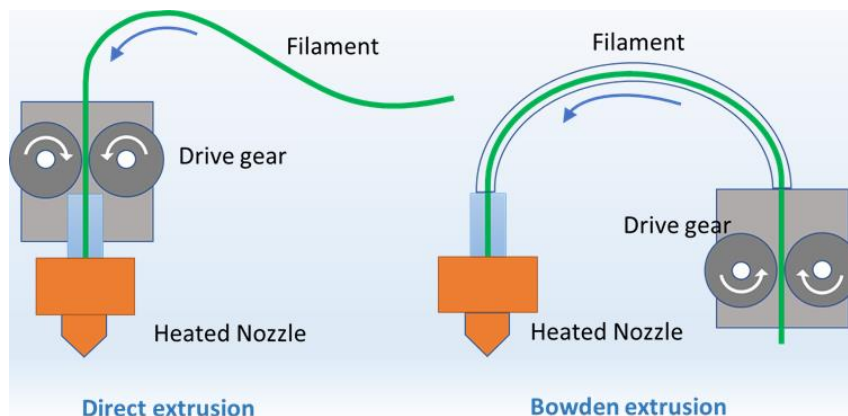
Nad tiskovou podložkou se pohybuje tisková hlava ve směru X. Tisková hlava je uchycena na příčném hliníkovém profilu, který umožňuje s tiskovou hlavou pohybovat v ose Z. Tisková hlava je tvořena hotendem (viz Obrázek 6). Ten se skládá z mnoha částí. První částí, kudy vstupuje filament je heatsink. Jedná se o hliníkový pasivní chladič, jehož chladičí funkce je ještě doplněna aktivním ventilátorem. Úlohou heatsinku je odvádět teplo z horké části (heatblocku), aby nedocházelo k předčasnému měknutí tiskového materiálu. Další částí je již zmiňovaný heatblock. V heatblocku je přítomno topné tělísko, které je zdrojem tepla. Zároveň se zde nachází termistor pro měření teploty. V této části dochází k roztavení filamentu. Heatblock a heatsink spojuje část zvaná heatbreak. Jak již název napovídá, jde o tenkou trubičku, jejíž cílem je minimalizovat přechod tepla z heatbreaku do heatsinku. Poslední částí je tryska, která slouží k vytlačování roztaveného filamentu. Její průměr bývá obvykle 0,4 mm, ale existují menší i větší trysky. Tryska bývá obvykle z mosazi kvůli dobrému vedení tepla. O pohyb tiskové hlavy v ose X se stará opět krokový motor, který pohání řemen tiskové hlavy. Pohyb v ose Z je zajištěn taktéž krokovým motorem, který je připevněn k závitové tyči. [9] [10] [11]



Obrázek 6 Složení hotendu [12]

Existují dvě verze tiskových hlav. Direct a bowden (viz Obrázek 7). Rozdíl je v umístění pohonu tiskové struny. Pohon tiskové struny se nazývá extruder. V extruderu se nachází krokový motor, který pomocí ozubených koleček zajišťuje posun materiálu. V případě direct tiskové hlavy se nachází těsně nad hotendem. Výhodou tohoto řešení je přesnější dávkování materiálu a kratší dráha mezi extruderem a hotendem. Nevýhodou je naopak vyšší váha tiskové hlavy a s tím spojené nižší rychlosti tiskové hlavy. Druhým řešením je umístění extruderu na rám tiskárny, kdy je extruder a hotend propojený teflonovou trubičkou. Nevýhodou tohoto řešení je velká vzdálenost mezi hotendem a extruderem a tím spojená menší přesnost dávkování materiálu. Zároveň se zvyšuje třecí odpor mezi filamentem a teflonovou trubičkou. Výhodou tohoto řešení je lehká tisková hlava, která se může pohybovat vyšší rychlostí. [9] [10] [11]

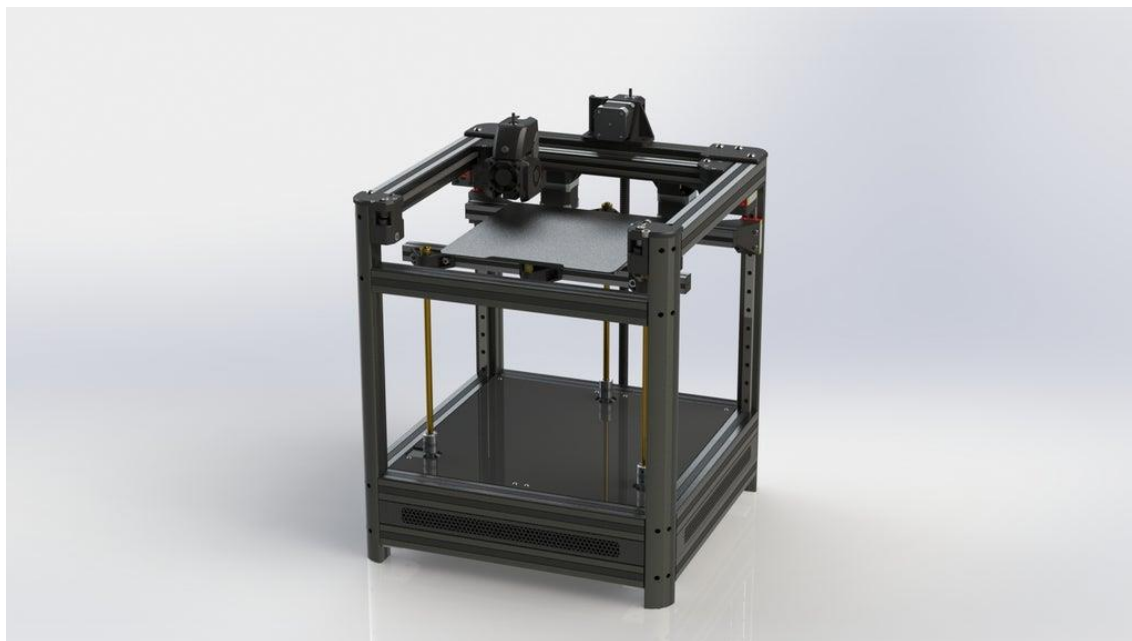




Obrázek 7 Direct a bowden extruder [13]

Poslední částí je umístění filamentu. Filament je namotán v podobě struny na cívku. Cívka se obvykle nachází na rámu tiskárny, ale je možné ji umístit i zcela mimo tiskárnu.

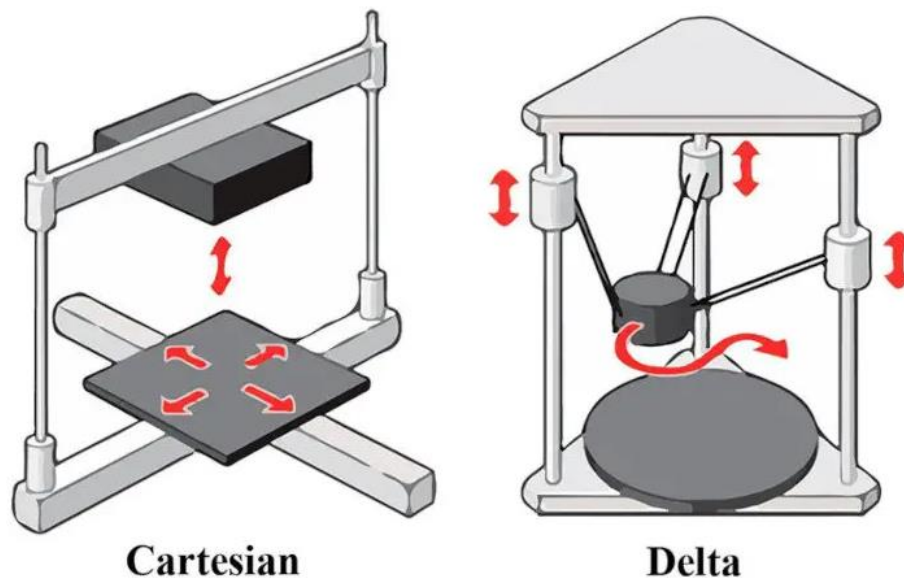
Existuje i verze kartézské tiskárny, kde se tisková hlava pohybuje v ose X a Y. Pohyb v ose Z je zajištěný postupným sjížděním tiskové podložky. Tomuto typu konstrukce se říká kostka (cube) viz Obrázek 8. Výhodou této konstrukce je vyšší přesnost tisku u vyšších či masivnějších dílů. Důvodem je fakt, že při sjezdu tiskové podložky v ose Z nedochází k rozkývání výtisku na tiskové podložce, jako se děje u kartézské tiskárny, která je popsána výše. [9] [10] [11]



Obrázek 8 Cube konstrukce kartézské 3D tiskárny [14]

### 1.2.2 Delta tiskárna

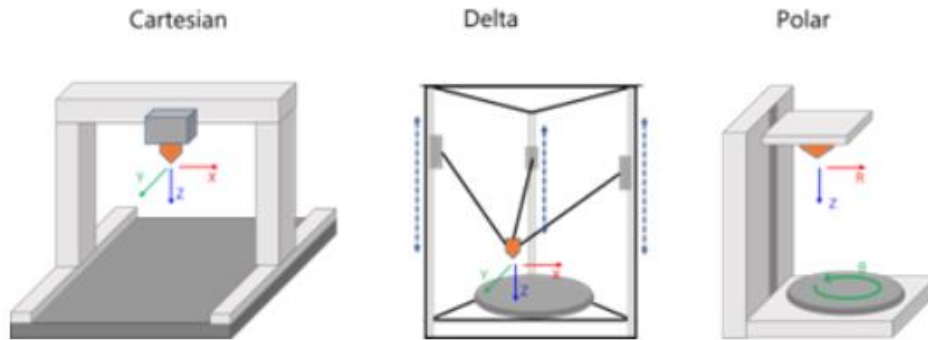
Rám této 3D tiskárny je opět tvořen hliníkovými profily, avšak konstrukce bývá obvykle vyšší než u kartézských tiskáren. Konstrukce v ose Z je tvořena třemi profily, po kterých se pohybují ložiska. Tyto ložiska slouží k pohybu ramen, na kterých je uchycena tisková hlava. Princip hotendu a extruderu zůstává stejný jako u kartézské tiskárny, avšak tisková hlava se zde pohybuje ve všech osách, zatímco tisková podložka zůstává přichycena k rámu. Díky této konstrukci a lehké tiskové hlavě je možné dosahovat vysokých tiskových rychlostí se zachováním vysoké přesnosti tisku. Delta tiskárna je však mnohem náročnější na přesnost složení tiskárny kvůli její náročné geometrii. Výhodou této tiskárny je možnost škálování v ose Z, kde záleží pouze na délce profilů konstrukce, ale nevýhodou je kulatá podložka, která má v porovnání s obdélníkovou či čtvercovou podložkou vždy menší tiskový prostor (viz Obrázek 9). [9] [10] [11]



Obrázek 9 Princip kartézské tiskárny (vlevo) a delta tiskárny (vpravo) [10]

### 1.2.3 Polar tiskárna

Tato tiskárna svým vzhledem kombinuje kartézskou a delta tiskárnu (viz Obrázek 10). Zatímco rám je podobný jako u kartézské tiskárny, podložka je kulatá jako u tiskárny typu delta. Tato tiskárna má pouze jedno rameno pro osu Z a tisková hlava se pohybuje pouze v jedné ose. Další pohyb zde vykonává tisková podložka, které rotuje. Přestože je konstrukce této tiskárny velmi jednoduchá, převedení 3D modelu do jazyka tiskárny (gcode) je velmi složitý proces. Z tohoto důvodu se tento typ tiskárny již téměř nepoužívá. [9] [10] [11]

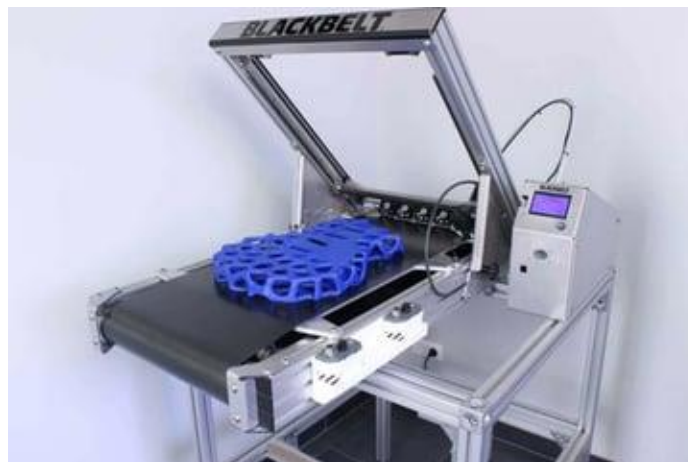


Obrázek 10 Typy FDM 3D tiskáren [15]

#### 1.2.4 Speciální typ tiskárny

V současné době se začal rozšiřovat trh FDM 3D tiskáren, které se svojí konstrukcí liší od všech výše zmíněných typů. Jedná se o 3D tiskárny, které mají místo klasické tiskové podložky pás, který se posouvá. Zároveň osa Z není kolmá na podložku, ale nachází se pod úhlem 45 stupňů. S tímto nápadem přišla společnost Blackbelt (viz Obrázek 11). Jednalo se o 3D tiskárnu, která měla pásový dopravník a tři tiskové hlavy. Dnes tento typ tiskárny prodávají i další výrobci jako Creality, díky čemuž je tento typ tiskárny více dostupný i hobby uživatelům. [16]

Výhodou tohoto řešení je možnost sériové výroby či velmi dlouhých modelů, pro než je možné k tiskovému pásu připojit válečkový dopravník. Ten podepírá již vytisknutou část modelu, která se nyní nachází už mimo tiskový pás. Naopak při vysoké sériovosti je možné k pásu připevnit sběrný koš, do kterého vytištěné modely padají. Tímto způsobem je možné zajistit kontinuální chod tiskárny bez potřeby obsluhy. [16]

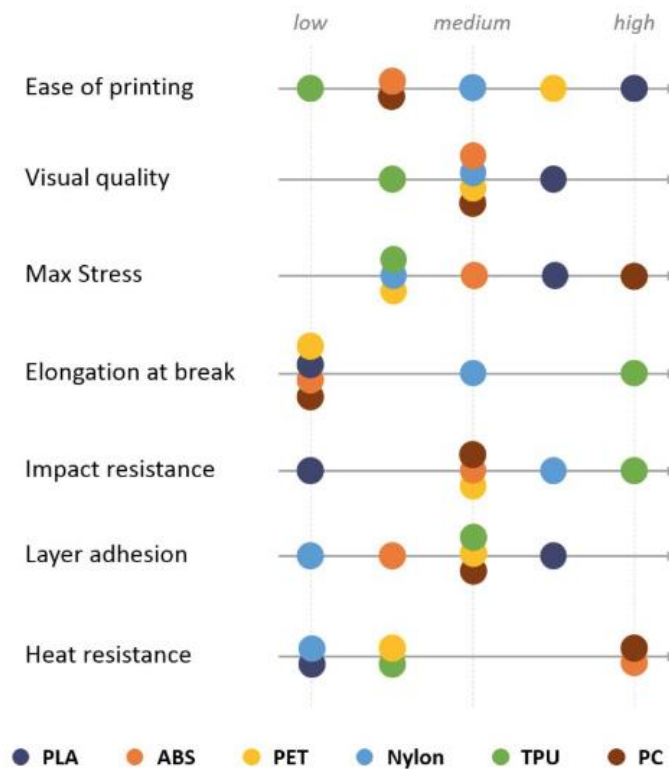


Obrázek 11 Blackbelt pásová tiskárna [16]

### 1.3 Materiály pro FDM 3D tisk

Materiály používané pro FDM 3D tisk nazýváme termoplasty. Jedná se o plasty, které je možné opakovaně roztavit a následně použít. Tyto materiály mají nízkou či nižší teplotní odolnost, a proto je možné je tavit již kolem teplot 200 °C. Díky vysoké oblíbenosti FDM tisku se neustále vyvíjí nové polymerní materiály včetně různých příměsí, které mají zlepšit mechanické, tepelné ale i vzhledové vlastnosti vytištěných modelů. [17] [18] [19]

Každý materiál má své specifické vlastnosti (viz Obrázek 12) a je třeba podle toho uzpůsobit samotný tisk. Zároveň volba materiálu závisí na faktorech jako je např. cena, mechanické vlastnosti, tepelná odolnost, využití dané součásti a další. Mezi nejrozšířenější materiály patří PLA, PET-G, ABS, ASA a další. Má práce se bude zaměřovat na materiály PLA, PET-G a ABS. [17] [18] [19]



Obrázek 12 Vlastnosti tiskových materiálů [19]

Materiálem je tisková struna, která se nazývá filament, který je navinut na cívku. Dříve byl průměr filamentu 2,85 mm, avšak kvůli nízké přesnosti dávkování filamentu a špatné manipulaci se přešlo na filament o průměru 1,75 mm. Filamentem je pohybováno pomocí extruderu, který tlačí tiskovou strunu do hotendu. Zde dochází k roztavení filamentu a pomocí trysky k nanášení na tiskovou podložku. [6]

### 1.3.1 PLA

PLA či kyselina polyléčná je polymerní materiál, který se používá pro FDM/FFF 3D tisk. Jedná se o rozložitelný materiál, který se získává z bramborového či kukuřičného škrobu, případně z cukrové třtiny. PLA je ze všech materiálů nejpoužívanější, neboť vyniká přívětivou cenou a nízkou náročností na tisk díky nízké teplotě tavení. Zároveň se jedná o velmi tvrdý materiál, který dosahuje dobré kvality povrchu, a není tak potřeba použít postprocessing. Oproti jiným materiálům se během chlazení nesmršťuje, a je tak rozměrově stabilní. Zároveň je možné ho tisknout v domácích podmínkách, neboť nezapáchá a nepotřebuje vyhřívanou komoru při tisku. Přestože je materiál velmi tvrdý, je také křehký a nedoporučuje se ho používat pro tisk mechanicky namáhaných dílů. [20] [21] [22]

Mezi nevýhody PLA patří již výše zmíněná křehkost a s tím spojené malé využití pro mechanicky namáhané díly. Další nevýhodou je náchylnost na degradaci působením UV záření. V neposlední řadě má PLA velmi nízkou teplotu skelného přechodu, která se nachází kolem 50–60 °C. PLA se tedy využívá v průmyslu pro rapid prototyping rozměrově přesných dílů, prototypů či konceptů. Své uplatnění ale najde i v hobby sféře pro tisk nejrůznějších domácích doplňků od krabiček po sošky. [23]

PLA je možné recyklovat, avšak s každou další recyklací se zhoršují jeho mechanické vlastnosti. Lanzotti et al [24] provedli měření, ve kterém srovnávali mechanické vlastnosti nerecyklovaného a recyklovaného PLA. Při testování smykové pevnosti mezi jednotlivými vrstvami zjistili, že 2x recyklovaný materiál zvládne udržet dobré mechanické vlastnosti, avšak s další recyklací se mechanické vlastnosti začaly silně zhoršovat (viz Tabulka 1). Recyklovaný materiál je ale možné využít pro technologii vstřikování. Tato studie dokázala, že recyklace je možná alternativa pro ekologickou stránku. [24]

*Tabulka 1 Vliv recyklace na smykovou pevnost [24]*

PLA filament	Smyková pevnost [MPa]
základní	119,1 ± 6,6
1x recyklovaný	106,8 ± 9,0
2x recyklovaný	108,5 ± 9,9
3x recyklovaný	75,0 ± 16,2

### 1.3.2 PETG

PETG je houževnatý materiál, který má univerzální využití ve všech oblastech. Je tedy vhodný i pro mechanicky namáhané díly. Základním materiálem je PET (Polyethylentereftalát), což je nejpoužívanější plast na světě. Vyrábí se z něj lahve, oděvní vlákna, nádoby a obaly na potraviny. Písmeno G ve zkratce PETG označuje glykol, který se během výroby PETG přidává, aby byl výsledný materiál méně křehký, snadněji se tiskl a byl více průhledný. PETG má malou teplotní roztažnost, díky čemuž nedochází ke smršťování materiálu a výsledný objekt si tak zachovává rozměrovou přesnost stejně jako u PLA, zároveň tisk z tohoto materiálu je obdobně snadný, avšak oproti PLA má tento materiál tendenci takzvaně stringovat. Stringování je nechtěné vytékání materiálu z trysky během přejezdu tiskové hlavy mezi jedním objektem k druhému. Výtisky z PETG je možné použít v interiéru i exteriéru, neboť oproti PLA lépe odolává vnějším povětrnostním vlivům. Zároveň u mechanických dílů nedojde k prasknutí součástí, ale pouze k dočasnému prohnutí. [25] [26]

PETG je svými vlastnostmi perfektní univerzální materiál (viz Obrázek 13). Je vhodný pro tisk mechanicky náročných dílů, Během tisku je stejně jako PLA téměř bez zápachu, má malou teplotní roztažnost díky čemuž si výsledný objekt zachovává rozměrovou stálost a přesnost a jeho tisk je velice jednoduchý. Zároveň je stejně recyklovatelný jako PET. [25] [26]

Výhody	Nevýhody
✓ Vysoká tepelná odolnost	✗ Není vhodné pro tisk malých částí
✓ Snadný tisk	✗ Možnost stringování
✓ Malá tepelná roztažnost	✗ Slabé přemostování
✓ Houževnatost	✗ Silná přilnavost k podložce - buďte opatrní při sundávání výtisku
✓ Pevnost	✗ Nelze vyhladit acetonem jako ABS
✓ Jednoduché broušení	✗ Obtížnější odstraňování podpor
✓ Při tisku takřka bez zápachu	✗ Náchylnější k poškrábání (v porovnání s PLA)
✓ Lesklý a hladký povrch výtisku	
✓ Dobré propojování vrstev	
✓ Neabsorbuje vodu	
✓ Recyklovatelnost	

Obrázek 13 Vlastnosti materiálu PETG Prusament [26]

### 1.3.3 ABS

ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) je termoplastický průmyslový kopolymer, který má skvělé mechanické vlastnosti a je tak vhodný pro mechanicky namáhané díly. Z ABS se vyrábí běžné mechanické díly jako LEGO kostičky, díly do aut v automobilovém průmyslu, kryty telefonů apod. ABS je velmi houževnatý materiál, který je zároveň teplotně i chemicky odolný. Teplota skelného přechodu je mezi 80 - 90 °C. Velkou výhodou tohoto materiálu je možnost vyhlazení povrchu acetonem, čímž dojde k zakrytí jednotlivých vrstev. [27] [28] [29]

ABS má ale i velké množství nevýhod (viz Obrázek 14). Jelikož má velmi vysokou teplotní roztažnost, dochází k problémům během tisku, kdy kvůli teplotnímu smrštění dojde k odlepení výtisku od podložky. Pro zvýšení šance úspěšného tisku je tedy mít 3D tiskárnu s uzavřenou komorou, ve které se bude nacházet po celou dobu tisku stabilní teplota alespoň 50 °C. Další nevýhodou je silný zápach během tisku. Kvůli tomu je opět vhodné používat uzavřenou komoru, protože právě kvůli výše zmiňovanému teplotnímu smršťování není možné místnost větrat. Zároveň je u velkých objektů kvůli smršťování potřeba brát v potaz rozměrovou kompenzaci tištěného tělesa. [27] [28] [29]

Dnes se ABS pomalu nahrazuje materiálem ASA. Tento materiál odstraní všechny negativní vlastnosti ABS a všechny pozitivní vlastnosti si zachoval. Tímto materiálem se ale nebudu více zabývat, neboť v této diplomové práci nebude použit.

Klady	Zápory
✓ Vysoká houževnatost a mechanická odolnost	✗ Silné kroucení
✓ Vysoká teplotní odolnost	✗ Vyžaduje kryt tiskárny
✓ Snadný postprocessing	✗ Potenciálně nebezpečné výpary (styrene)
✓ Možnost lepení a vyhlazení acetonem	

Obrázek 14 Klady a zápory materiálu ABS [29]

### 1.3.4 PC

PC (Polykarbonát) je termoplast, který se mezi filamenty pro 3D tisk považuje za jeden z nejodolnějších materiálů. Velmi často bývá alternativou ABS kvůli podobným mechanickým vlastnostem či se používá jako kompozitní materiál PC/ABS. [30] [31] [32] [33]

Polykarbonát je známý pro svoji vysokou pevnost, houževnatost a mechanickou a teplotní odolnost (viz Obrázek 15). Polykarbonát se opět využívá v automobilovém průmyslu např. pro výrobu automobilových světlometů. V 3D tisku se využívá pro velice namáhané mechanické díly, které se využívají i ve strojírenském průmyslu. Polykarbonát má vysokou rázovou houževnatost, vysokou pevnost a tuhost a vysokou odolnost proti deformaci. Teplotní odolnost je až 150 °C. Zároveň má dobrou odolnost proti otěru, a velmi dobré elektroizolační a dielektrické vlastnosti. [30] [31] [32] [33]

Podobně jako ABS má i tento materiál své nevýhody. Mezi největší patří náchylnost k deformaci stejně jako u materiálu ABS. Je tedy opět potřeba tisk v komoře za stálé okolní vysoké teploty. Další nevýhodou je rychlá absorpce vlhkosti ze vzduchu. Polykarbonát je třeba pečlivě uskladňovat a nevystavovat ho vysoké vlhkosti. Po absorpci vlhkosti se stává materiál téměř nepoužitelným. [30] [31] [32] [33]

Výhody	Nevýhody
✓ Vysoká teplotní odolnost až do 113 °C (pro srovnání PLA se začíná deformovat při teplotě okolo 55 °C)	✗ Náchylný ke kroucení při tisku větších modelů
✓ Výborná mechanická odolnost – velmi pevný a tuhý materiál	✗ Vysoké tiskové teploty podložky i trysky
✓ Odolný proti nárazům	✗ Vyšší cena
✓ Houževnatý a ohebný i za nízkých teplot	✗ Mírný zápach během tisku
✓ Velmi dobrá rozměrová stálost v porovnání s jinými polykarbonáty na nezakrytované tiskárně	✗ Nutnost přípravy tiskové podložky / separační vrstva
✓ Dobrá odolnost proti tečení při mechanickém namáhání	
✓ Neobsahuje styren	
✓ Dobrá přilnavost k tiskové podložce	
✓ Vylepšené tiskové vlastnosti oproti běžným polykarbonátům – při tisku se méně krotí a jen velmi výjimečně se objevují praskliny ve vrstvách	
✓ Není třeba před tiskem vysoušet (je minimálně hygroskopický)	
✓ Dobré elektrické izolační vlastnosti	

Obrázek 15 Výhody a nevýhody materiálu PC [33]



### 1.3.5 Porovnání materiálů z hlediska mechanických vlastností

V této kapitole se budu zabývat přímým porovnáním mezi materiály PLA, PET-G a ABS (viz Tabulka 2), neboť tyto materiály dále využiji v praktické části diplomové práce.

Materiál PLA je nejčastěji používaný materiál, neboť je velmi snadný pro tisk. Je velmi pevný a tvrdý. Oproti ABS či PET-G však nedosahuje takové tuhosti a pružnosti. Zároveň se jedná o materiál, který není odolný vůči UV záření a nehodí se tak do venkovních podmínek. PLA má také nejnižší teplotní odolnost ze všech tří zmíněných materiálů. Při teplotě 50 – 55 °C začne měknout a není tak vhodný pro aplikace, které vyžadují vysoké teploty. PLA je málo citlivý na vlhkost.

PET-G je houževnatý materiál, který je pevnější a tužší než PLA. Má velmi dobrou adhezi ve vrstvách a je odolný proti praskání. PET-G má také vyšší teplotní odolnost než PLA (začíná měknout při teplotě 70 – 80 °C) a odolává UV záření. PET-G se často využívá na mechanicky namáhané díly, kde je potřeba houževnatost.

ABS je ze všech tří materiálů nejnáročnější pro tisk. Vzhledem k jeho smršťování je třeba přizpůsobit podmínky tisku. ABS je univerzální materiál, který se mechanickými vlastnostmi nachází mezi PLA a PET-G. Přestože nedosahuje takové pevnosti jako materiál PLA, jeho výhodou je vysoká teplotní odolnost v kombinaci s odolností proti UV záření. ABS nachází využití u mechanicky namáhaných dílů, které jsou vystaveny vysokým teplotám (až 100 °C) a zároveň mohou být vystaveny UV záření.

Tabulka 2 Srovnání materiálů PLA, PET-G a ABS [22] [26] [29]

Parametr	Prusament PLA	Prusament PET-G	Prusament ABS
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1,24	1,27	1,05
Teplota tepelné deformace (1,80 MPa) [°C]	55	68	101
Mez pevnosti v tahu pro filament [MPa]	57 ± 1	46 ± 1	-
Tvrdość - Shore D	81	74	-
Přilnavost mezi vrstvami [MPa]	17 ± 3	18 ± 4	-
Pevnost v tahu horizontálně [MPa]	51 ± 3	47 ± 2	43
Pevnost v tahu vertikálně [MPa]	59 ± 2	50 ± 1	43
Modul pružnosti v tahu horizontálně [GPa]	2,3 ± 0,1	1,5 ± 0,1	2,14
Modul pružnosti v tahu vertikálně [GPa]	2,4 ± 0,1	1,6 ± 0,1	2,14
Prodloužení na mezi kluzu horizontálně [%]	2,9 ± 0,3	5,1 ± 0,1	2,7
Prodloužení na mezi kluzu vertikálně [%]	3,2 ± 1,0	5,1 ± 0,1	2,7
Pevnost v ohybu horizontálně [MPa]	83 ± 6	66 ± 2	65
Pevnost v ohybu vertikálně [MPa]	99 ± 1	70 ± 1	65
Modul pružnosti horizontálně [GPa]	3,1 ± 0,1	1,7 ± 0,1	2,05
Modul pružnosti vertikálně [GPa]	3,2 ± 0,1	1,6 ± 0,1	2,05

#### 1.4 Parametry ovlivňující kvalitu 3D tištěných dílů

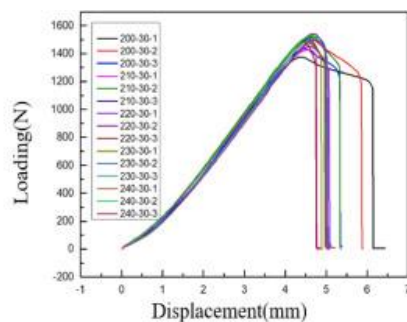
Po vytvoření 3D modelu je potřeba ve sliceru nastavit tiskové parametry, které mají velký vliv na úspěšnost a kvalitu samotného tisku. Tiskové parametry a jejich hodnoty se odvíjí od typu konstrukce tiskárny, použití konkrétního materiálu, ale i délce tisku a použití daného dílu v praxi. Příkladem je nastavení vhodného počtu perimetrů či hustoty výplně, neboť tyto hodnoty mají vliv na mechanické vlastnosti vytištěného tělesa, a je tedy třeba již předem znát účel použití daného výtisku.

Většina slicerů dnes obsahuje uživatelské rozhraní, ve kterém si uživatel zvolí, zda je začátečník, pokročilý či expert. Podle tohoto nastavení se uživateli nabídnou tiskové parametry, které jsou pro jeho znalost potřebné, a zároveň se tímto eliminuje chyba, kdy by začátečník špatně pochopil nastavení, které by mohlo mít fatální důsledky pro tisk či tiskárnu samotnou.

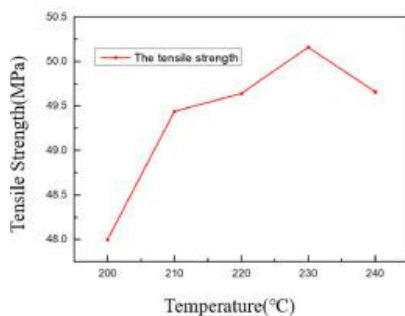
### 1.4.1 Orientace výtisku a teplota

Orientace tištěného dílu na podložce je velmi zásadní pro úspěšný a funkční výtisk. Je třeba brát v úvahu v jakém směru bude výtisk nejvíce namáhán a podle toho zvolit správnou orientaci modelu. Nejmenší pevnost je vždy při namáhání kolmo na vrstvy, protože dojde k oddělení jednotlivých vrstev od sebe. Jestliže nejde model orientovat jinak než v orientaci, kdy bude probíhat zatěžování ve vrstvách, doporučuje se použít místo ostrých úhlů zaoblení, díky čemuž dojde k rozložení koncentrace napětí. [34]

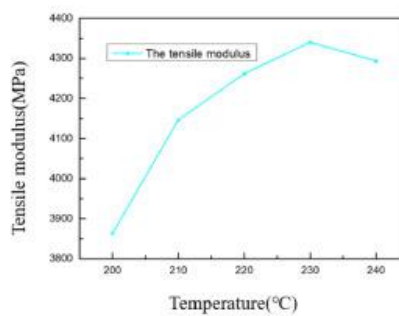
Správně zvolená teplota hotendy a tiskové podložky je velmi zásadní parametr pro úspěšný tisk. Teplota podložky zajišťuje dostatečnou adhezi vyextrudovaného materiálu k podložce a teplota hotendy zajišťuje dostatečné a správné tavení filamentu. Tang et al [35] se ve své studii zabýval mechanickými vlastnostmi v tahu a tlaku za použití materiálu PLA (viz Obrázek 16). Zjistil, že při zvýšení teploty hotendy nejprve vzroste a následně klesá pevnost v tahu a modul pružnosti. Při použití rozsahu teplot od 200 °C do 230 °C se zvýší modul pružnosti o 11,06 % a pevnost v tahu vzroste o 4,3 %. Při teplotách od 230 °C do 240 °C dojde k poklesu pevnosti v tahu o 1,02 % a modul pružnosti klesne o 3,32 %. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při teplotě 230 °C. Při příliš nízké teplotě nedojde k dostatečnému roztavení materiálu a ten se následně na sebe špatně váže. Naopak při příliš vysoké teplotě dojde k pomalému ochlazení čímž se způsobí, že na nedostatečně zchlazenou vrstvu pokládáme další vrstvu. [35]



(a) Load displacement curves



(b) Tensile strength



(c) Tensile elastic modulus

Obrázek 16 Vliv tiskové teploty na pevnost v tahu [35]

#### 1.4.2 Výška vrstvy

Výška vrstvy je parametr, který znatelně ovlivňuje dobu tisku a rozlišení výtisku. Určité výšky vrstev bývají již přednastavené v tiskových profilech pro určité tiskárny s jistým průměrem trysky.

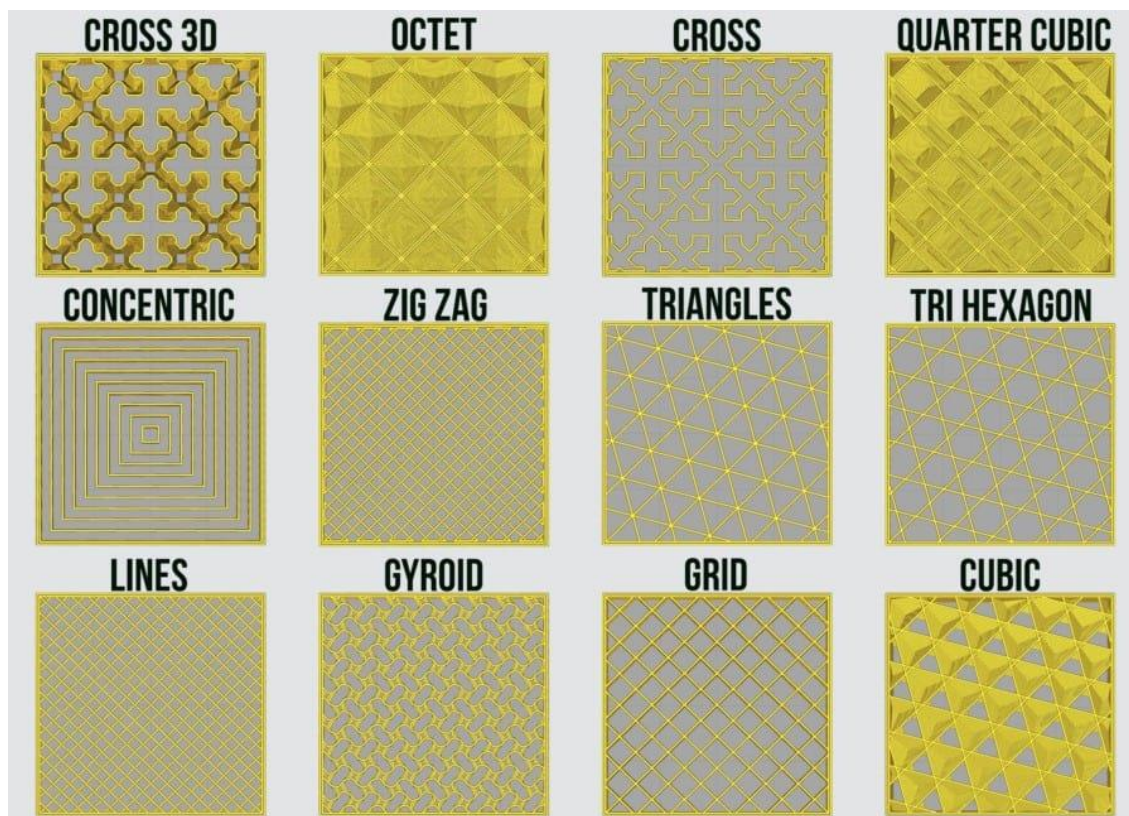
Nejčastější výškou vrstvy je dle Prusa příručky 0,15 mm [6]. U aditivní technologie je ale třeba dbát důraz na dostatečné propojení jednotlivých vrstev. Wenzheng et al [36] vytvořili studii, ve které se věnují vlivu výšky vrstvy a dalších parametrů na materiál PEEK (viz Obrázek 17), který patří mezi nejpevnější a nejodolnější materiály pro plastový 3D tisk. V jejich studii testovali pevnost v tahu, tlaku a ohybu, kdy nejlepších mechanických výsledků bylo dosaženo při výšce vrstvy 0,3 mm. S podobným závěrem přišli i Mohamed et al [37], kteří zkoumali vybrané tiskové parametry včetně výšky vrstvy za účelem nalezení nejvhodnějšího nastavení parametrů. Dle jejich studie byla nejlepší výška vrstvy pro maximální dynamické namáhání 0,3302 mm. [6] [36] [37]

Factors		Tensile strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Compressive strength (MPa)
Layer Thickness ( $\mu\text{m}$ )	200	40.1	52.1	53.6
	300	56.6	56.1	60.9
	400	32.4	48.7	54.1
Raster Angle ( $^{\circ}$ )	$0^{\circ}/90^{\circ}$	56.6	56.1	-
	$30^{\circ}/-60^{\circ}$	41.8	48.5	-
	$45^{\circ}/-45^{\circ}$	43.3	43.2	-

Obrázek 17 Testované výšky vrstvy za použití materiálu PEEK [36]

### 1.4.3 Hustota a vzor infillu

3D tištěný objekt se skládá z počtu obvodových stěn (perimetrů) a určité výplně (infillu). Infill slouží jako vnitřní struktura, která snižuje spotřebu materiálu, snižuje dobu tisku a zároveň zachovává potřebné mechanické vlastnosti. Existuje mnoho vzorů infillů (viz Obrázek 18) a jejich hustota se udává v procentech. Průša udává jako nejlepší vzor infillu v PrusaSliceru Gyroid, který je trojrozměrný, čímž poskytuje stejnou pevnost ve všech směrech. Christian Lubombo a Michael A. Huneault [38] ve své studii zjistili, že použitím stejné procentuální hustoty infillu akorát s jiným vzorem infillu došlo ke zvýšení pevnosti až o 82 %. [6] [38]



Obrázek 18 Typy vzorů infillu [39]

Typ infillu můžeme také rozdělit na 2D infill a 3D infill. Toto označení přímo souvisí s patternem, který daný infill vytváří. Příkladem 2D infillů je například mřížka, triangle, lines apod. Tento typ infillu zůstává stejný od první do poslední vrstvy. Jednotlivé vrstvy se na sebe pokládají ve stejném uspořádání. 2D infill se hodí pouze pro modely, které budou zatěžovány pouze v ose Z, neboť pouze v této ose nabízejí určitou pevnost. 3D infill oproti 2D infillu nabízí pevnost ve všech třech osách. Během tisku vytváří trojrozměrný objekt, který tuto pevnost zajišťuje. Příkladem 3D infillu je gyroid nebo cubic. Jedná se o typy infillů, které se s výškou mění a vytváří tak určitý obrazec.

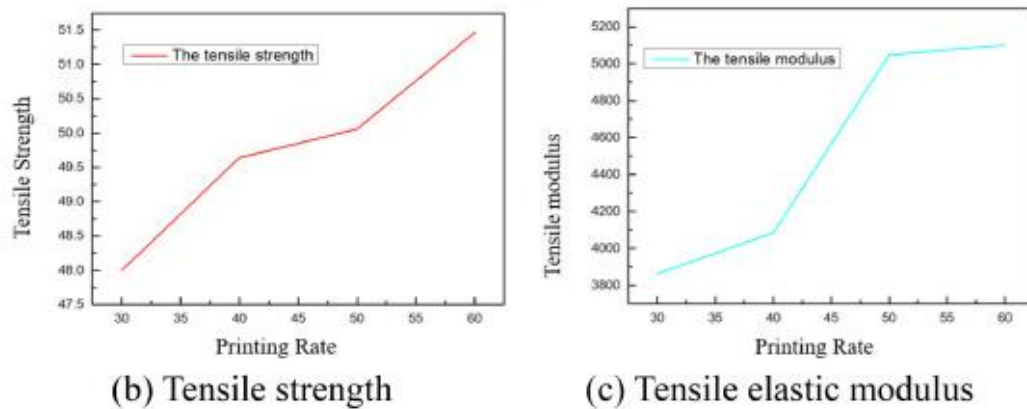
#### **1.4.4 Počet perimetrů**

Perimetry jsou obvodové stěny modelu. Jejich počet závisí na požadované tloušťce stěny modelu. Jejich šířka závisí na průměru trysky. Obecně se udává šířka perimetru stejná, jako je průměr trysky. Perimetry mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti vytištěného tělesa. Christian Lubombo a Michael A. Huneault [38], které jsem zmiňoval v kapitole o infillu, došli k závěru, že se pevnost zvýšila za použití stejného procentuálního infillu ale jiného vzoru, avšak došli také k závěru, že při použití většího množství perimetrů se stejným vzorem a hustotou infillu se zlepšily mechanické vlastnosti až o 84 %. Zaman et al [40] se ve své studii zabývali vlivem jednotlivých tiskových parametrů na pevnost. Zjistili, že procento infillu byl nejvíce dominující faktor na mechanické vlastnosti výtisku. Studie od Mishra et al [41] říká, že perimetry jsou důležitým parametrem, neboť pomáhají přenést zónu koncentrace napětí z vnějšího okraje do středu při tahovém namáhání. [38] [40] [41]

#### **1.4.5 Rychlost tisku**

Rychlost tisku je dalším důležitým parametrem, který ovlivňuje mechanické vlastnosti a rozměrovou přesnost tělesa. Pro správné zvolení tiskové rychlosti je třeba myslet na zvolený průměr trysky a tím spojeného množství vytlačovaného materiálu. Při příliš vysoké rychlosti tisku a nízké teplotě hotendu dojde k nedostatečnému tavení materiálu a následně špatné adhezi jednotlivých vrstev k sobě. Zároveň je rychlost tisku ovlivněna konstrukcí samotné tiskárny, neboť při nedostatečně tuhém rámu tiskárny může docházet k vibracím a tím spojeným problémem špatně navazujících vrstev. V neposlední řadě se rychlost tisku odvíjí i od zvoleného tiskového materiálu a hmotnosti tiskové hlavy. Obvykle se rychlost tisku udává v milimetrech za sekundu. Nejde ale zapomenout ani na objemovou rychlost tisku, jejíž nastavení nám umožňuje vynechat

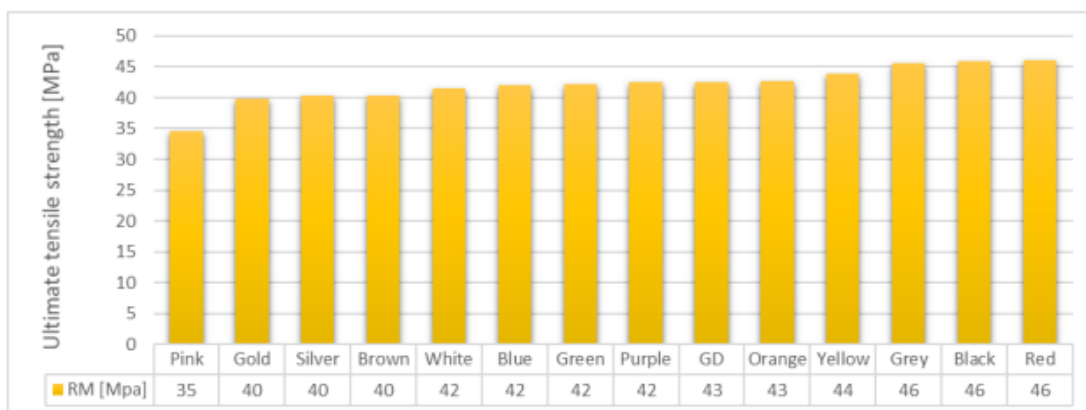
výpočet rozsahu rychlostí pro kombinace různých výšek vrstev, průměrů trysek apod. Průša u své tiskárny Prusa i3 MK3/S, která používá hotend E3D V6 uvádí rychlost tisku 15 mm<sup>3</sup>/s pro materiál PLA a 8 mm<sup>3</sup>/s pro materiál PETG. Tang et al [35], jejichž studii jsem zmiňoval v kapitole o orientaci tisku a teplotě, zkoumali také vliv rychlosti tisku na mechanické vlastnosti výtisku. Došli k závěru, že při konstantní teplotě 200 °C s použitím proměnlivé rychlosti se s vyšší rychlostí tisku zvyšovaly hodnoty meze pevnosti a modulu pružnosti v tahu. Při zvýšení rychlosti z 30 mm/s na rychlost 60 mm/s se pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu zvýšili o 10,33 % (viz Obrázek 19). [35] [42]



Obrázek 19 Vliv rychlosti tisku na pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu [35]

#### 1.4.6 Barva materiálu

Překvapivým parametrem, který má vliv na mechanické vlastnosti výtisku je i barva samotného filamentu. Pandzic et al [43] zkoumali vliv barvy materiálu PLA na mechanické vlastnosti výtisku. Zvolili filament od značky 3D Republika ve 14 různých barvách. Následně vytištěné vzorky podrobili zkoušce tahem. Nejlepších mechanických hodnot (modul pružnosti, mez kluzu, pevnost v tahu) dosahoval filament červené barvy. Oproti tomu filament růžové barvy dosahoval nejhorších výsledků, avšak v poměrném prodloužení byl zcela nejlepší. Zatímco rozdíl v modulu pružnosti apod. se u jednotlivých barev lišily oproti červené o maximálně 10 %, růžový filament v poměrném prodloužení trojnásobně překonal hnědý filament. Nejhorší výsledky v poměrném prodloužení měl modrý a zlatý filament. Obě tyto barvy měly až 15krát nižší poměrné prodloužení než růžový filament (viz Obrázek 20). [43]



Obrázek 20 Vliv barvy filamentu na mechanické vlastnosti vytištěného tělesa [43]

Ve své práci jsem se rozhodl pro filamenty bílé barvy, neboť se bílý filament svými vlastnostmi pohyboval přibližně uprostřed.



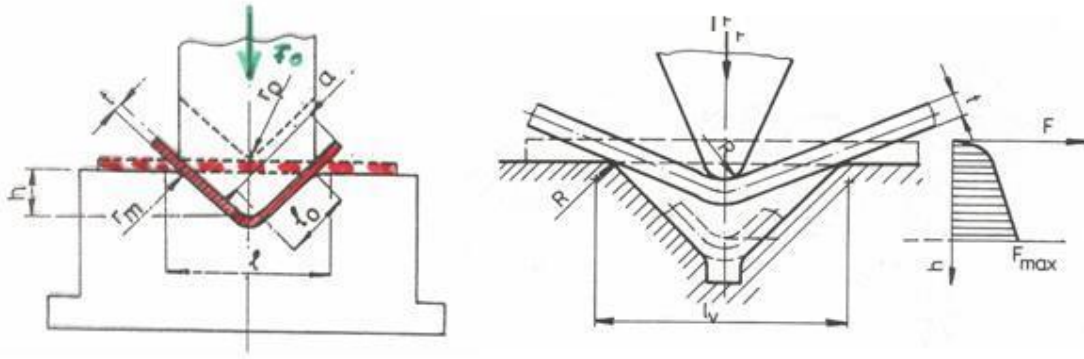
## 2 Teorie plošného tváření

Jedná se o tvářecí proces, kdy se z plechového polotovaru v rovinném tvaru vyrábí díly prostorového tvaru. Obvykle se plošné tváření provádí za studena. Díly, které jsou vyrobené metodou plošného tváření se nazývají výlisky. Charakteristickými vlastnostmi výlisků jsou dobrá pevnost, nízká hmotnost, dostatečná tuhost a tvarová různorodost. [44] [45]

Výrobní postup obsahuje tři operace – přípravné, tvářecí a dokončovací. Nejprve je třeba plech rozdělit na jednotlivé kusy plechu. Polotovar plechu může být ve formě svitku nebo tabulového plechu. Následně se plech upravuje na požadovaný přístřih. Dále dochází k samotnému procesu tváření. Po procesu tváření dochází k čištění po tváření a odstraňování přídavků. Jako dokončovací operace se označuje například děrování otvorů či různé povrchové úpravy. Výlisky je nyní možné považovat za již hotové díly, avšak často se výlisky následně používají k dalším operacím, mezi které může patřit svařování či pájení. [44] [45]

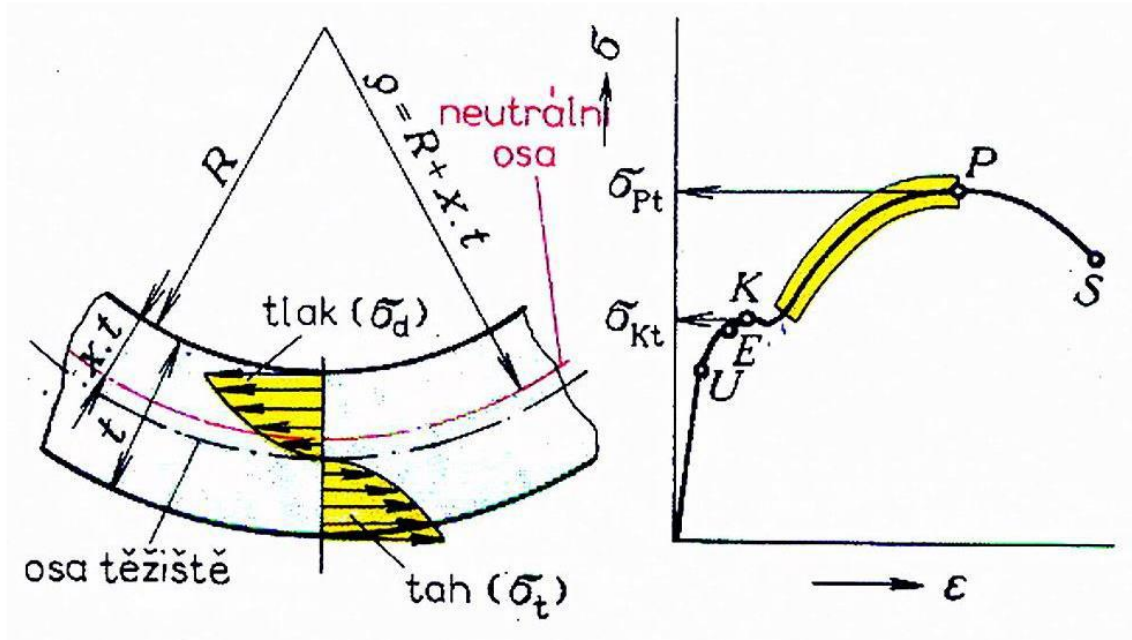
### 2.1 Ohýbání plechu

Jedná se o tvářecí proces, pomocí kterého deformuje materiál tak, abychom vytvořili prostorový výlisek bez výrazné změny tloušťky průřezu. Pro ohýbání plechu se používají nástroje zvané ohýbadla, která se skládají z ohybníku a ohybnice. Výsledkem je tedy výlisek zvaný ohybek (viz Obrázek 21). Abychom dosáhli žádoucího tvaru je potřeba se pohybovat v rozsahu napětí mezi mezí kluzu a napětím na mezi pevnosti materiálu, neboť tak vzniká plastická deformace, která je doprovázena elastickou deformací. Elastická deformace způsobuje, že po odlehčení má materiál tendenci vrátit se zpátky do původního tvaru. Tomuto jevu se říká odpružení a hodnota toho, jak moc se materiál vrátí do původního stavu se vyjadřuje jako úhel odpružení. Velikost tohoto úhlu záleží například na materiálu, tloušťce materiálu, úhlu ohybu ale také na způsobu ohýbání. Abychom dosáhli správného tvaru výlisku lze odpružení řešit pomocí korekce nástroje. Nástroj se navrhuje s úhlem ohybu, který je však menší o úhel odpružení. Další možnou variantou je zvýšit lisovací síly na konci tvářecího cyklu, neboť v místě ohybu dochází k místní plastické deformaci, čímž se snižuje hodnota odpružení. [44] [45]



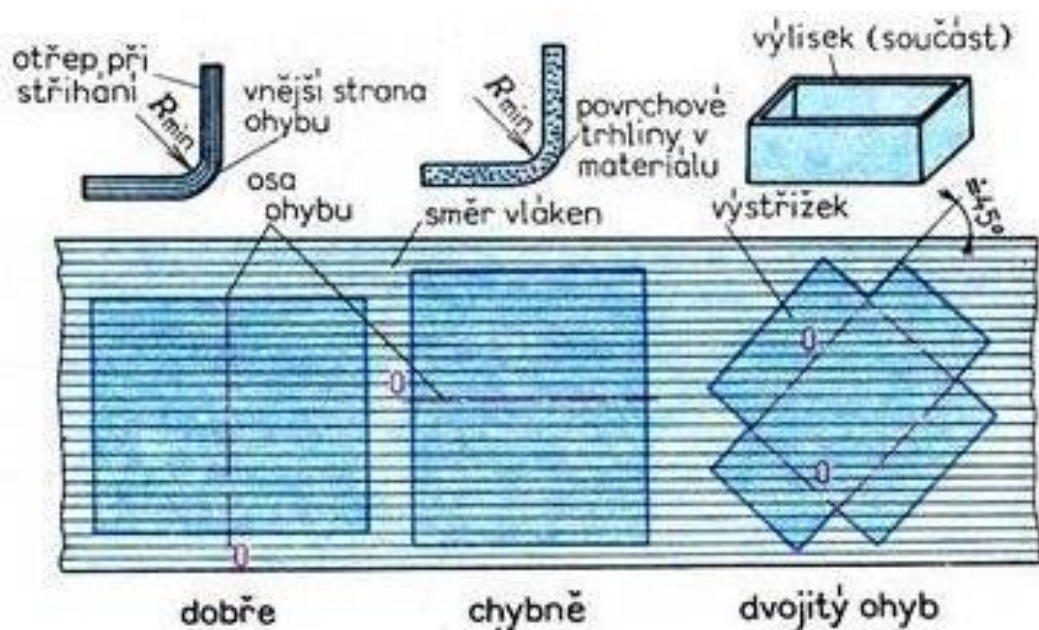
Obrázek 21 Ohyb plechu do tvaru V [45]

Při tváření dochází k deformaci průřezu součásti. Deformace je elasticko-plastická a její průběh se liší od povrchu materiálu k neutrální ose. Vlákna, která se nachází na vnitřní straně ohybu jsou namáhána tlakovým napětím. Vlákna na vnější straně ohybu jsou naopak namáhána tahem. Tím dochází ke stlačování a roztahování vláken v příčném směru u vláken na vnitřní straně a naopak k podélnému roztahování a stlačování v příčném směru u vláken na vnější straně. Neutrální osa se tak nachází před tvářením uprostřed průřezu, avšak po procesu ohýbání se přesouvá směrem k vnitřní straně ohybu (viz Obrázek 22). [44] [45]



Obrázek 22 Schéma neutrální osy [45]

Během tváření může dojít i k nežádoucímu vlivu, kterým je porušení materiálu. K tomuto problému dochází při překročení limitní hodnoty poloměru ohybu  $R_{\min}$ , což má za následek vznik trhlin na vnější straně. Na vznik trhlin má vliv mnoho faktorů. Mezi nejdůležitější patří plasticita materiálu, stav povrchu, tloušťka materiálu a v neposlední řadě způsob ohýbání a směr vláken plechu (viz Obrázek 23). Směr vláken je velmi důležitý, neboť osa ohybu by neměla být rovnoběžně s vlákny, nýbrž alespoň o  $30^\circ$  pootočena. Pokud je ohyb dvojitý, doporučuje se úhel mezi vlákny a osou ohybu  $45^\circ$ . Dalším důležitým parametrem je hodnota  $R_{\max}$ , což je maximální poloměr ohybu.  $R_{\max}$  udává maximální úhel ohybu, kdy dojde k plastické deformaci materiálu. [44] [45]



Obrázek 23 Směr vláken materiálu a volba vhodné orientace [45]

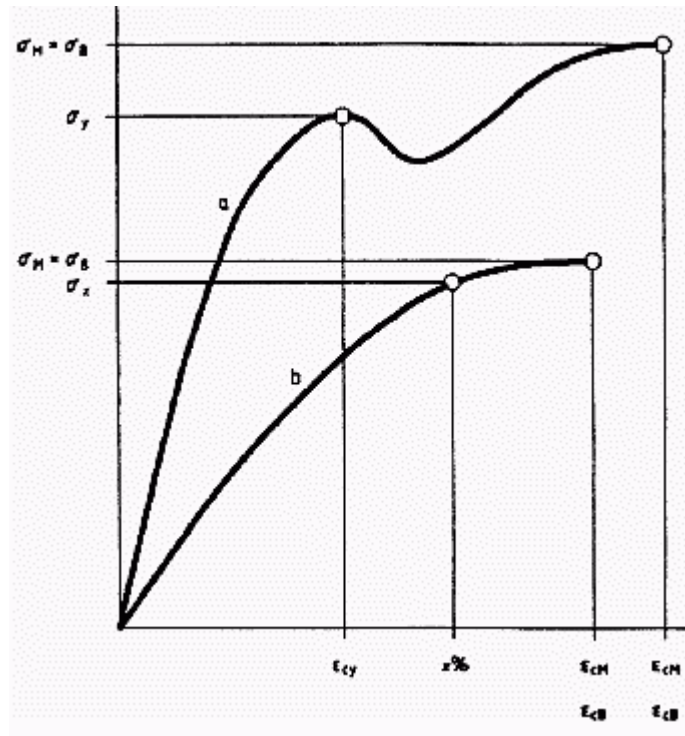
### 3 Teorie tlakové zkoušky

Metodika tlakové zkoušky se definuje normou ČSN EN ISO 604 (640606) (Plasty – Stanovení tlakových vlastností) a používají se dva typy zkušebních těles (viz Obrázek 24). Typ tělesa se volí dle tloušťky stěny vzorku. Jestliže má zkušební vzorek tloušťku stěny větší než 3,2 mm, používá se obvykle těleso, který má tvar pravoúhlého hranolu a čtvercový průřez s délkou, která je dvojnásobkem šířky. Jestliže je tloušťka stěny nižší, používají se tělesa, která mají obdélníkový průřez. Jejich nevýhodou je ovšem fakt, že je třeba je upevnit do přípravku, aby nedocházelo k namáhání tělesa na vzpěr. [46] [47]



Obrázek 24 Standardizované vzorky pro tlakovou zkoušku [46]

Principem zkoušky je stroj, který tlačí na zkušební těleso ze dvou stran. Velikost stlačení vzorku se měří pomocí kompresometru. Výsledkem zkoušky je průběh závislosti síly na změnu rozměru a průběh závislosti napětí na poměrném stlačení (viz Obrázek 25). Zkouška probíhá do momentu poklesu síly, který označuje, že došlo k porušení materiálu testovacího vzorku. Průběh lze rozdělit na křehké a houževnaté materiály. U houževnatého materiálu nedochází k tvorbě trhlin a v bodě porušení začne křivka pracovního diagramu pomalu klesat. Naopak u křehkých materiálů je porušení materiálu projevováno náhlým lomem, který je obvykle orientován diagonálně vůči ose zkušebního vzorku. Na pracovním diagramu tedy zaznamenáme rychlý pokles síly oproti křivce houževnatého materiálu. V obou případech se však jako pevnost v tlaku odečítá hodnota síly těsně před tím, než dojde k poklesu křivky. Oproti zkoušce tahem je jiný směr působení síly, avšak průběh zkoušky zůstává velmi podobný. U houževnatých plastů se mez kluzu stanovuje smluvně. [46] [47]



Obrázek 25 Průběh zkoušky tlakem u houževnatého (a) a křehkého (b) vzorku [47]

## 4 Návrh metodiky testování a provedení experimentu

Cílem praktické části diplomové práce bylo vymyslet metodiku pro otestování typů materiálů, typů infillů a jejich hustoty na vliv pevnosti v tlaku. Následně z tohoto experimentu určit nejlepší materiál a typ infillu. Tyto parametry se následně testovaly na části 3D tištěného lisovacího nástroje, aby se ověřila jejich účinnost v praxi. Následně se s nejlepším nastavením vytiskl celý nástroj, se kterým se testovala životnost a počet vylisovaných kusů.

### 4.1 Metodika testování vhodného infillu

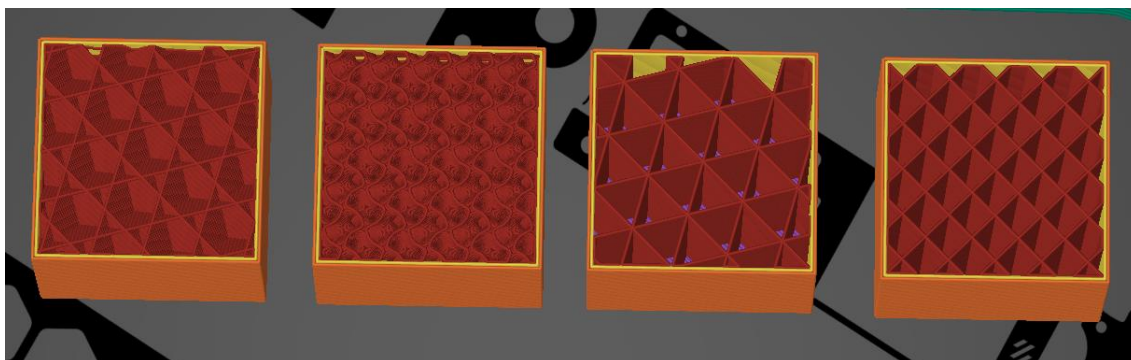
Pro testování vhodného infillu jsem se rozhodl zvolit model obyčejné kostičky o velikosti 25x25x25 mm. Všechny tyto kostičky měly 2 perimetry a 2 horní a spodní plné výplně. U kostiček se měnil typ materiálu, typ infillu (viz Obrázek 26) a hustota infillu. Od každého nastavení se tiskly 3 vzorky, které byly následně podrobeny zkoušce tlakem. Z jednotlivých grafů vzorků byl následně vybrán jeden jako reprezentativní. Všechny typy materiálů byly od stejného výrobce.

Jako nejvhodnější materiály pro otestování jsem vybral:

- PLA, neboť se jedná o nejpoužívanější materiál, který se snadno tiskne.
- PET-G, který má velmi dobrou soudržnost vrstev a je velmi oblíbený.
- ABS, jež se nejčastěji využívá v technickém průmyslu, avšak je náročný pro tisk.

Dále jsem zvolil 4 typy infillu, které jsem chtěl otestovat. Jedná se o:

- Cubic – jedná se o velmi oblíbený typ infillu, který vytváří krychle orientované jedním rohem směřujícím dolů.
- Gyroid – tento typ infillu je velmi podobný cubic, avšak nedochází ke křížení ve stejné vrstvě.
- Triangle – dochází ke křížení cest v jedné vrstvě a vytváří se tak trojúhelníková struktura.
- Mřížka – jedná se o jednu z nejjednodušších a nejrychlejších variant infillu, svým pokládáním vrstev je velmi podobná infillu triangle.



Obrázek 26 Typy infillů (zleva cubic, gyroid, triangle, mřížka)

Všechny tyto typy infillů jsou hojně využívány ve světě plastového 3D tisku. Infill cubic a gyroid vynikají svojí vlastností, což je jejich pevnost ve všech osách (X, Y, Z). Nevýhodou těchto dvou infillů je delší doba tisku a vyšší spotřeba materiálu. Infill triangle a mřížka jsou principiálně velmi podobné, avšak nejvyšší pevnost zaručují pouze v ose Z. Výhodou těchto infillů je kratší doba tisku, avšak dochází ke křížení linií, což může mít za následek hromadění materiálu v místech styku a následně může docházet k akustickým efektům během přejíždění trysky až k utržení modelu od podložky.

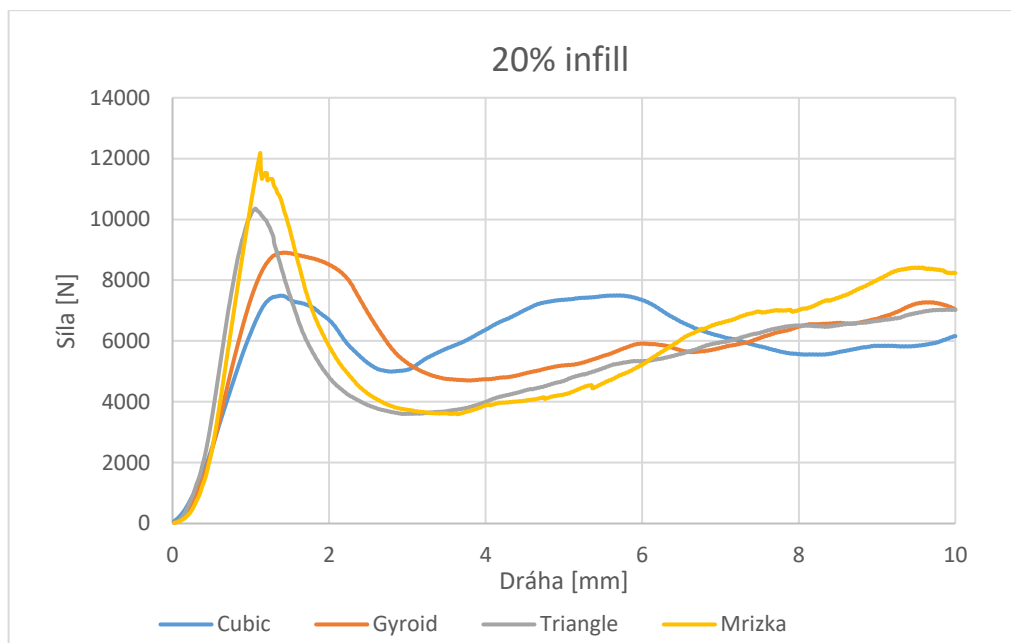
## 4.2 Vyhodnocení testování vhodného infillu

Lisování probíhalo na univerzálním zkušebním stroji LabTest Model 5.100SP1 při konstantní rychlosti 50 mm/min.

### 4.2.1 Materiál PLA

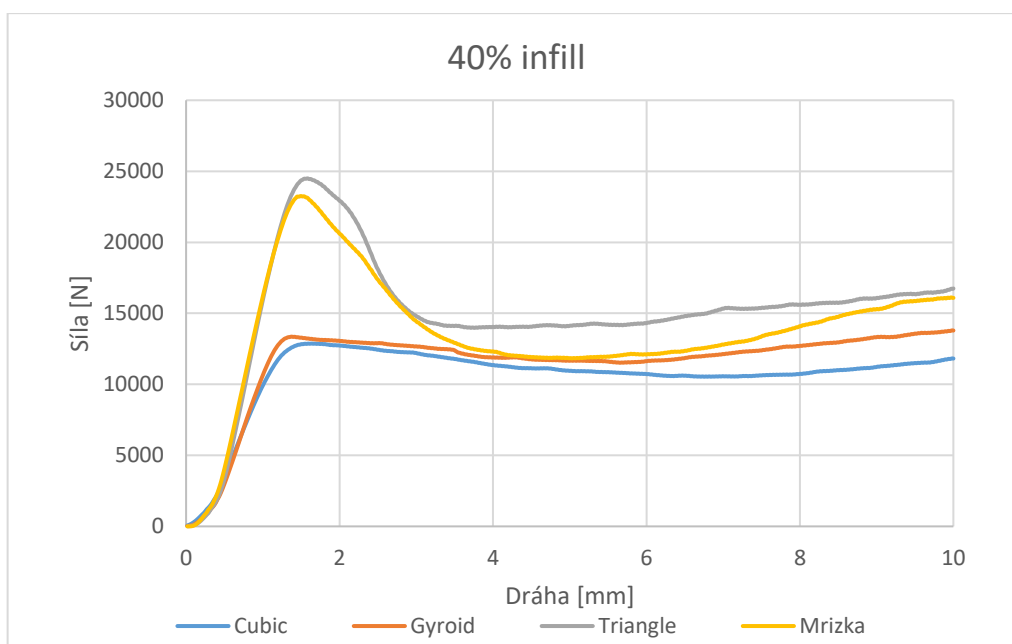
Kostičky z materiálu PLA byly tištěny s 2 perimetry a 2 horními a spodními plnými výplněmi. Teplota tisku byla 210 °C a teplota podložky byla 60 °C. Pro všechny vzorky byly nastavené stejné parametry tisku.

Při 20% infillu je vidět, že nejvyšší zatěžující síly dosáhl infill typu mřížka (téměř 12 000 N) (viz Obrázek 27). Za ním následoval infill triangle (přibližně 9 000 N), a poté gyroid (přibližně 8 000 N) a cubic (7 000 N). Infill typu mřížka tak překonává infill typu cubic o téměř 42 %. Zároveň rozdíl mezi infillem typu mřížka a triangle je 25 %, rozdíl mezi infillem typu gyroid a cubic je pouze 12,5 %.



Obrázek 27 Vliv typu 20% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PLA

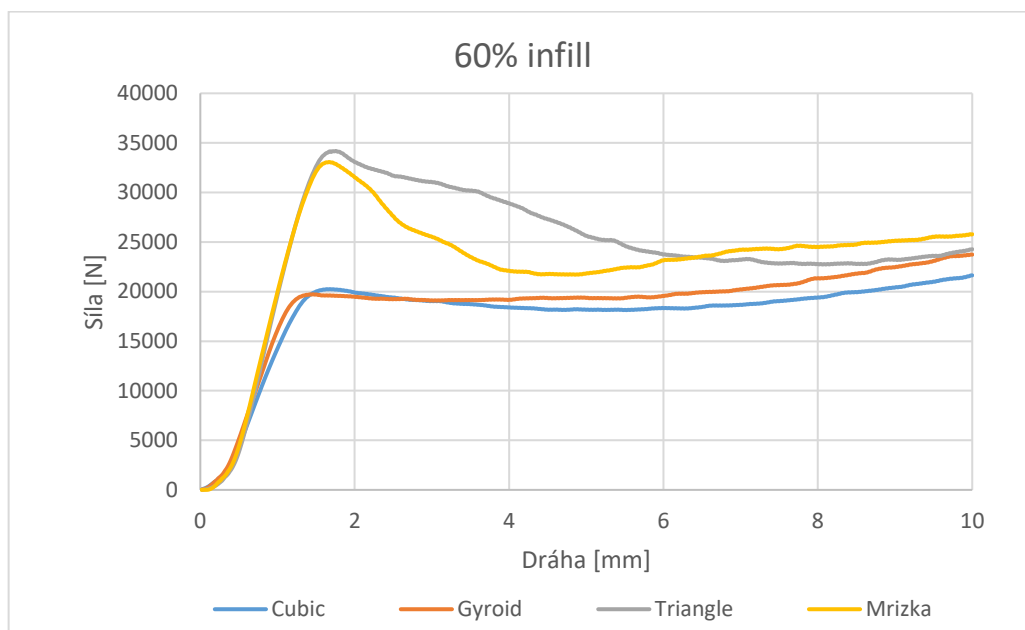
Při 40% infillu však dosáhl nejvyšší zatěžující síly infill typu Triangle (téměř 23 000 N) (viz Obrázek 28), po kterém následoval infill typu mřížka (přibližně 22 000 N). Rozdíl je však pouze minimální, a to přibližně 4,5 %. Infill typu gyroid a cubic dosahují podobných hodnot, které jsou ovšem zřetelně nižší (přibližně 13 000 N). Již zde je vidět vzorec, kdy infill typu mřížka a triangle dosahují podobné zatěžující síly a totéž infill typu gyroid a cubic. Zatěžující síla je tedy u druhé dvojice o 43 % nižší než u první dvojice.



Obrázek 28 Vliv typu 40% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PLA

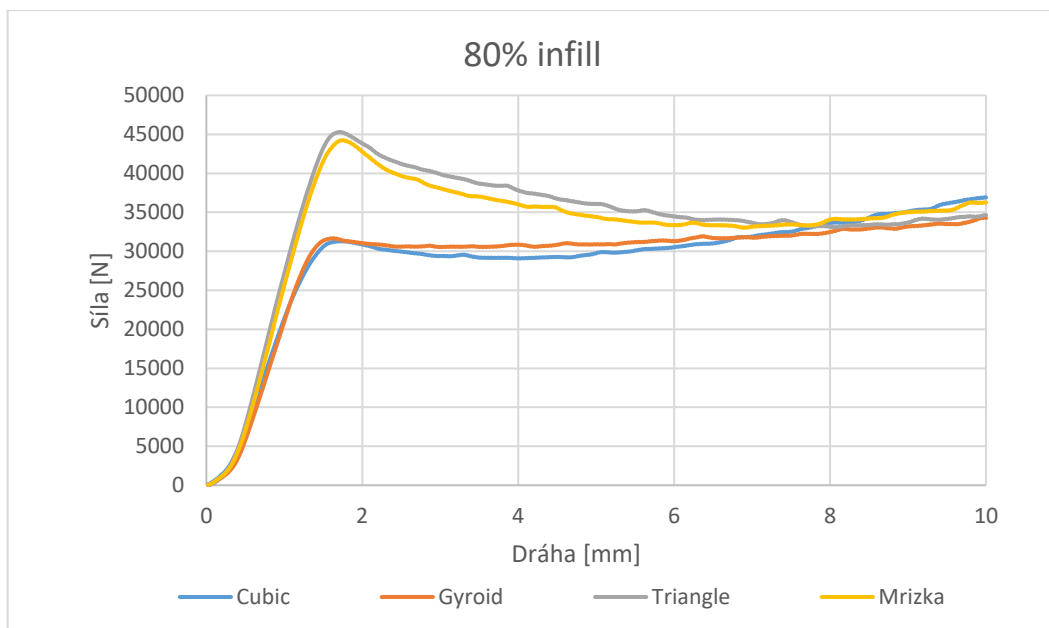


Při 60% infillu dosahují opět nejvyšší zatěžující síly infilly typu triangle a mřížka (téměř 31 000 N a 30 000 N) (viz Obrázek 29). Dále za nimi s velkou rezervou se opět nachází infill gyroid a cubic (přibližně 19 000 N). Rozdíl mezi infillem triangle a mřížka je přibližně 3 %, avšak infilly typu cubic a gyroid dosahují o 38 % nižší zatěžující síly než infill typu triangle.



Obrázek 29 Vliv typu 60% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PLA

U 80% infillu je trend stejný. Nejvyšší zatěžující síly dosahuje infill typu triangle a mřížka (téměř 40 000 N) a dále infill typu cubic a gyroid (přibližně 30 000 N). Opět jsou zde vidět dvě dvojice (viz Obrázek 30), a to infill typu triangle a mřížka a druhá dvojice infillů cubic a gyroid. Druhá dvojice dosahuje o 25 % nižší zatěžující síly než první dvojice.

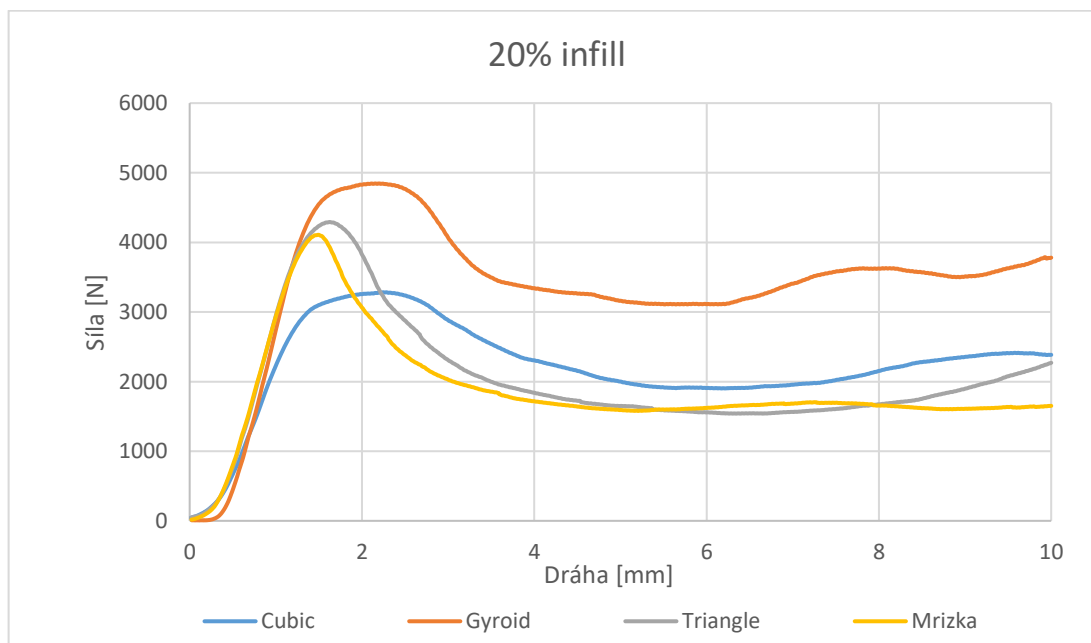


Obrázek 30 Vliv typu 80% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PLA

#### 4.2.2 Materiál PET-G

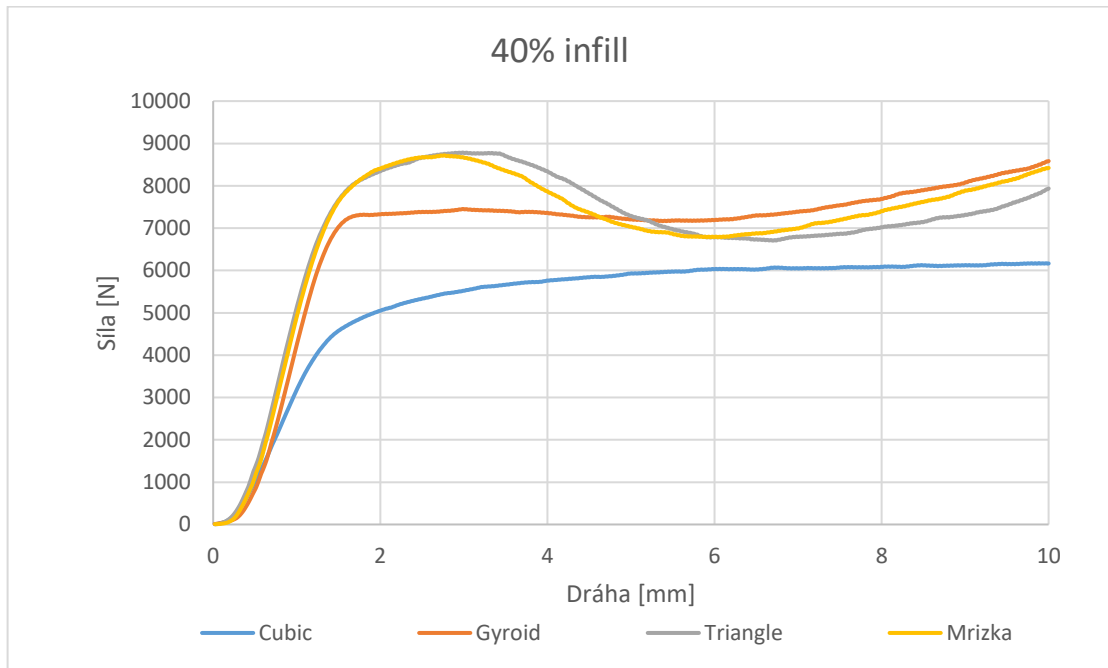
Kostičky z materiálu PETG byly tištěny s 2 perimetry a 2 horními a spodními plnými výplněmi. Teplota tisku byla 240 °C a teplota podložky byla 75 °C. Pro všechny vzorky byly nastavené stejné parametry tisku.

Při 20% infillu dosáhl nejvyšší zatěžující síly infill typu gyroid (přibližně 4 000 N) (viz Obrázek 31). Za ním následovaly velmi blízko k sobě infilly triangle a mřížka (3 500 N) a nejhůře dopadl infill typu cubic (2 500 N).



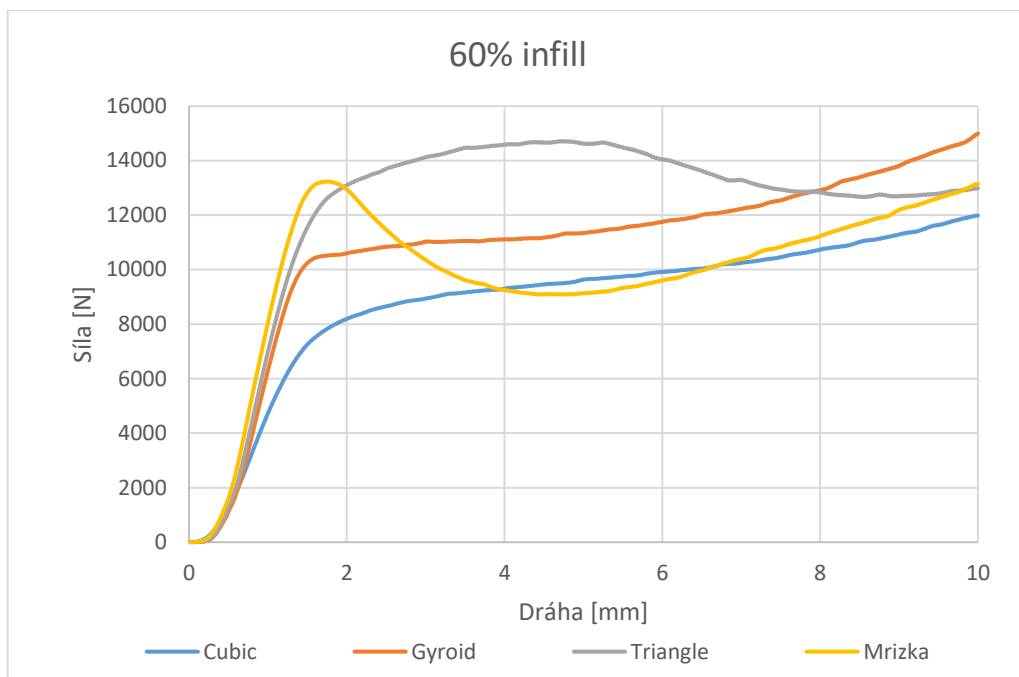
Obrázek 31 Vliv typu 20% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PET-G

U 40% infillu dosáhl infill triangle a mřížka téměř stejný zatěžující síly (7 000 N). Velmi blízko k nim byl opět infill gyroid (6 000 N) a nejhorsím výsledkem opět disponoval infill typu cubic (3 500 N). Podobně jako u materiálu PLA se zde objevuje dvojice infillů, které mají téměř stejnou zatěžující sílu – mřížka a triangle (viz Obrázek 32).



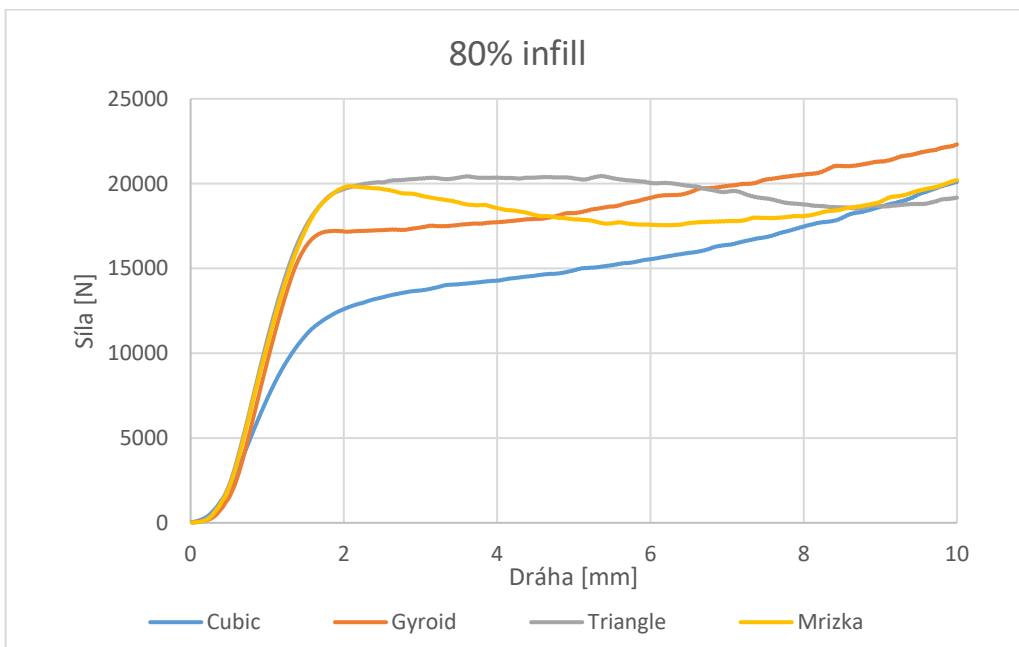
Obrázek 32 Vliv typu 40% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PET-G

U 60% infillu dosahují nejvyšších zatěžujících sil opět infilly typu triangle a mřížka, avšak s rozdílným průběhem po porušení vzorku (viz Obrázek 33). Křivka mřížky začne klesat, kdežto křivka trianglu stále roste. Jejich síla potřebná pro porušení vzorku je ovšem znovu přibližně stejná (11 000 N). Dále následoval infill typu gyroid (10 000 N) a infill typu cubic (5 000 N).



Obrázek 33 Vliv typu 60% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PET-G

Při 80% infillu dosahují infilly triangle a mřížka opět nejvyšších zatěžujících sil (16 000 N). Dále následuje infill typu gyroid (14 000 N) a cubic (9 000 N) (viz Obrázek 34).

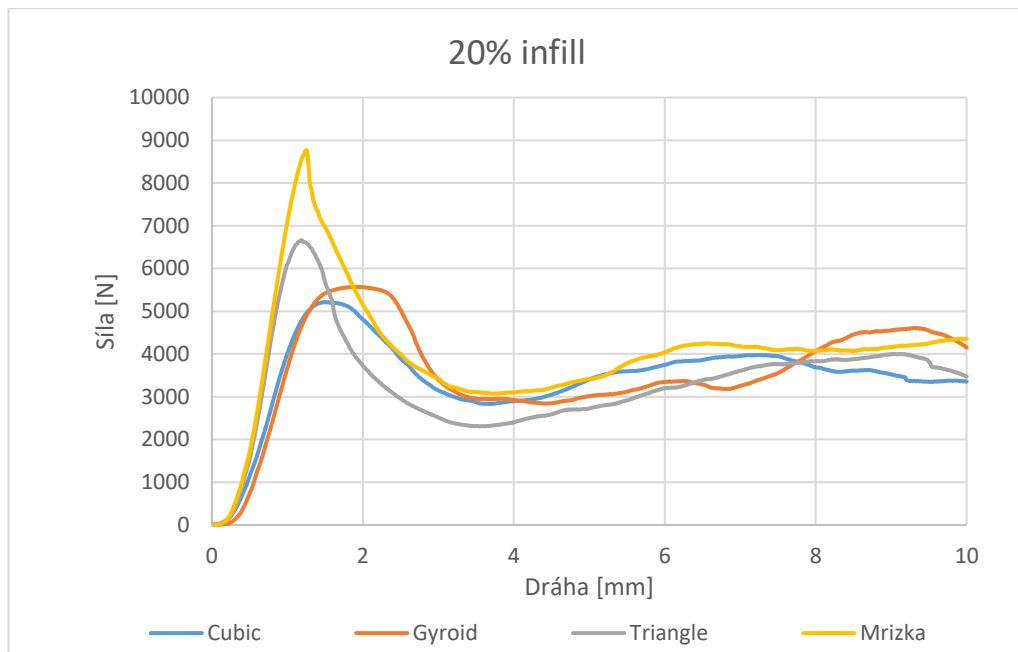


Obrázek 34 Vliv typu 80% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PET-G

### 4.2.3 Materiál ABS

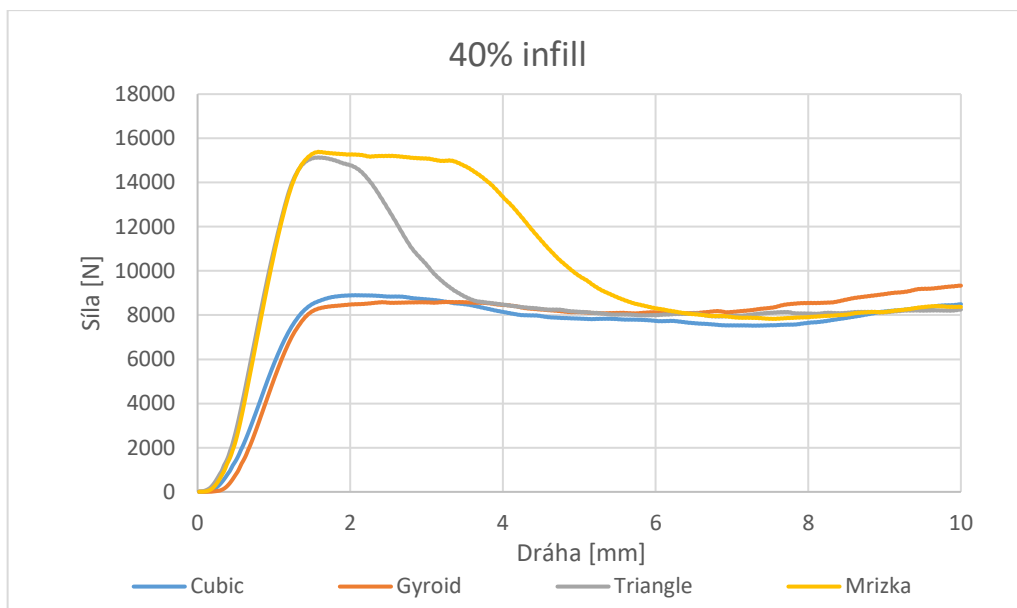
Kostičky z materiálu ABS byly tištěny s 2 perimetry a 2 horními a spodními plnými výplněmi. Teplota tisku byla 265 °C a teplota podložky byla 100 °C. Pro všechny vzorky byly nastavené stejné parametry tisku.

U 20% infillu dosahuje nejvyšší zatěžující síly s přehledem infill typu mřížka (přes 8 000 N) (viz Obrázek 35). Po něm následuje infill typu triangle (přibližně 5 500 N) a dále s téměř stejnými hodnotami gyroid a cubic (4 000 N).



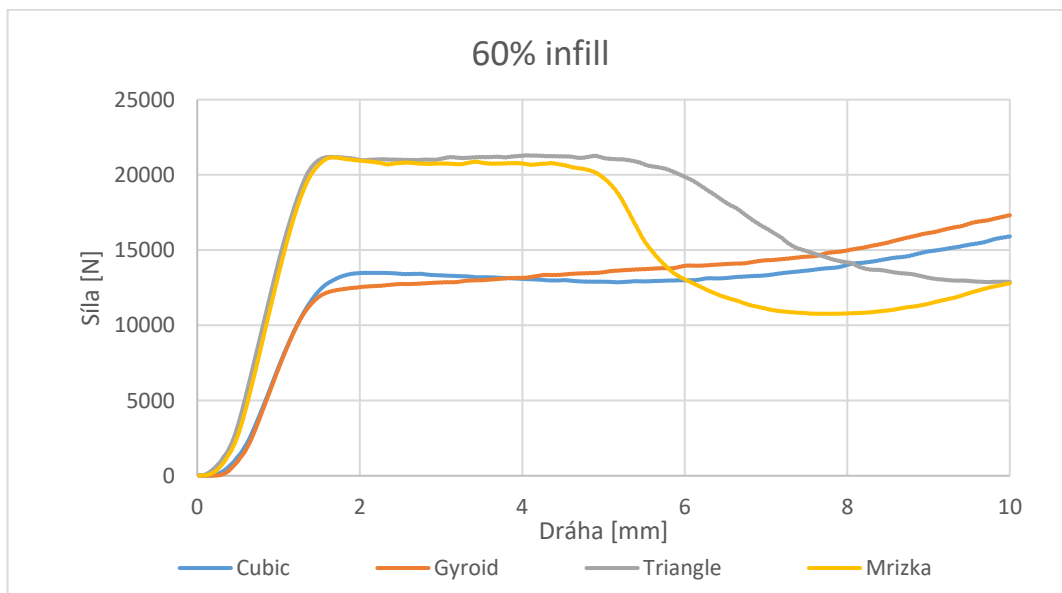
Obrázek 35 Vliv typu 20% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu ABS

U 40% infillu dosahují infilly mřížka a triangle téměř identických hodnot (přibližně 14 000 N). Hluboko pod nimi se nachází s téměř identickými hodnotami infilly typu cubic a gyroid (přibližně 8 000 N). Opět jsou zde patrné dvojice infillů jako u materiálu PLA (viz Obrázek 36).



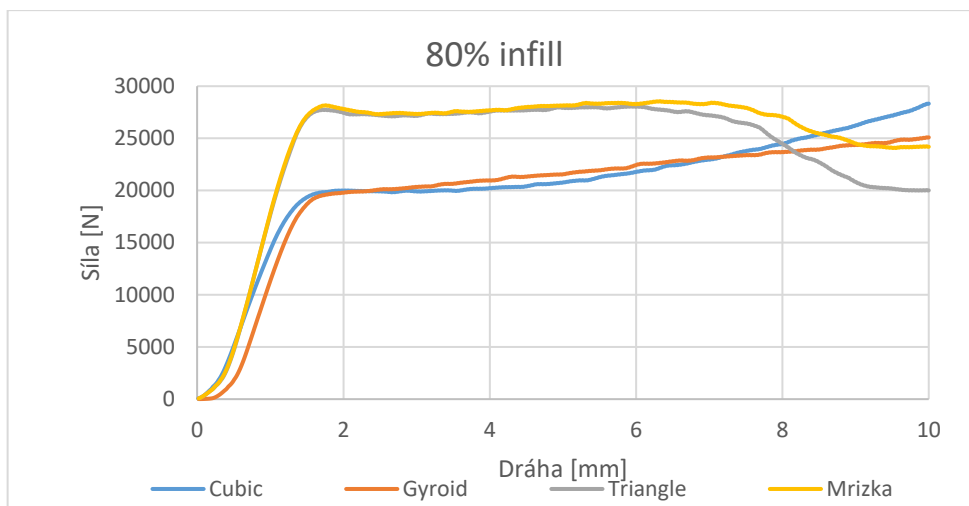
Obrázek 36 Vliv typu 40% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu ABS

Při 60% infillu je trend stejný. Typ infillu mřížka a triangle dosahují nejvyšších zatěžujících sil (téměř 20 000 N). Za nimi se nachází infilly typu gyroid a cubic s téměř stejnými hodnotami (12 000 N). První dvojice infillů dosahuje o téměř 67 % vyšší zatěžující síly než dvojice cubic a gyroid (viz Obrázek 37).



Obrázek 37 Vliv typu 60% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu ABS

U 80 % infillu trend pokračuje. Opět jsou zde nejlepší infilly s totožnými výsledky mřížka a triangle (25 000 N) a za nimi se nachází infilly typu cubic a gyroid (17 000 N). Opět jsou zde vidět dvojice infillů, kdy první dvojice dosahuje o 47 % vyšší zatěžující síly (viz Obrázek 38).

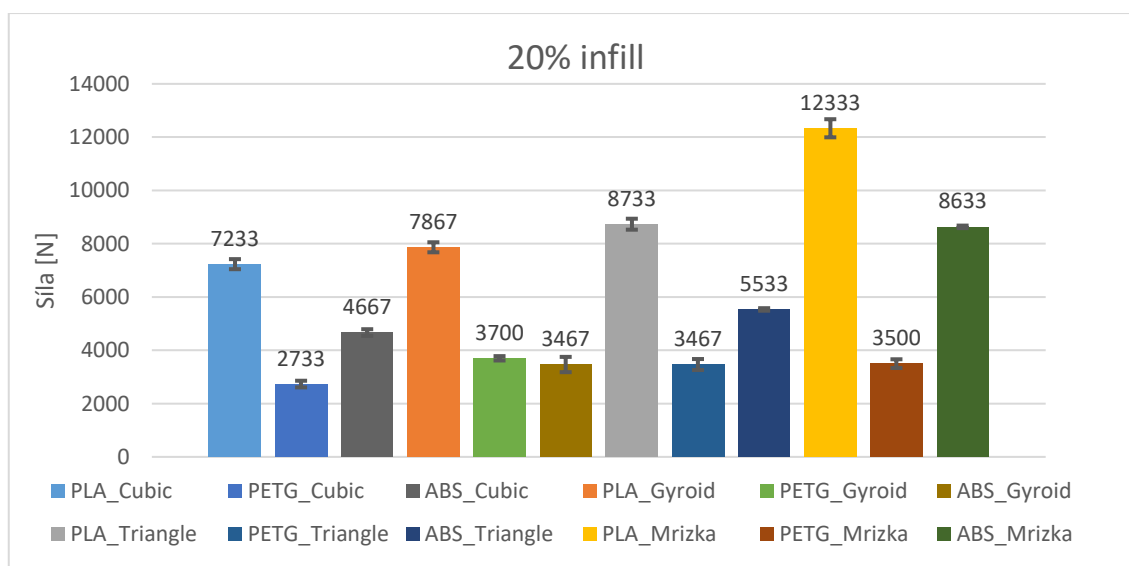


Obrázek 38 Vliv typu 80% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu ABS

#### 4.2.4 Porovnání materiálů

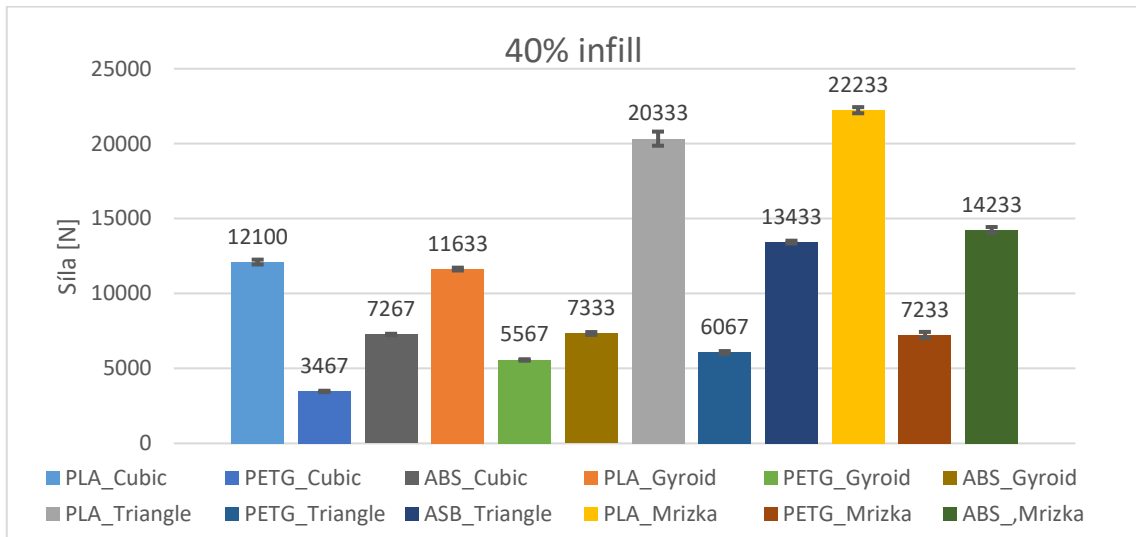
Od každého nastavení byly testované 3 kostičky a zjišťovala se zatěžující síla, při které dojde k deformaci kostičky. Z výsledků těchto 3 měření zatěžujících sil se následně udělala průměrná zatěžující síla, která se zanesla do grafu.

Při 20% infillu si můžeme všimnout dominance materiálu PLA se všemi typy infillu. Zatímco materiál PLA v kombinaci s infillem typu mřížka přesahuje sílu 12 000 N, mřížka u materiálu ABS činí pouze přibližně 8 500 N a u materiálu PET-G je to pouze 3 800 N. Síla je u materiálu ABS nižší o 29 % a u materiálu PET-G až o téměř 70 % (viz Obrázek 39).



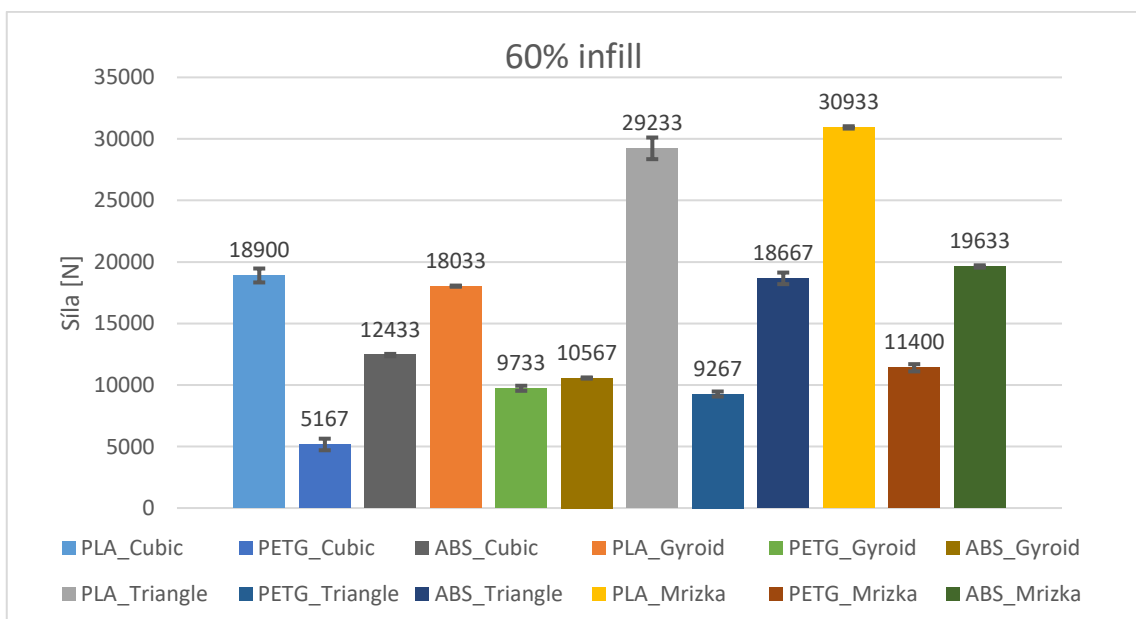
Obrázek 39 Vliv typu 20% infillu na velikost zatěžující síly

U 40% infillu opět dominuje materiál PLA v kombinaci s typem infillu mřížka (Přes 22 000 N). Velmi blízko se nachází infill triangle (přes 20 000 N). Třetí nejvyšší zatěžující síly zde dosahuje materiál ABS v kombinaci s infillem typu mřížka (přes 14 000 N) avšak jeho hodnota je téměř poloviční oproti PLA s infillem typu mřížka (viz Obrázek 40).



Obrázek 40 Vliv typu 40% infillu na velikost zatěžující síly

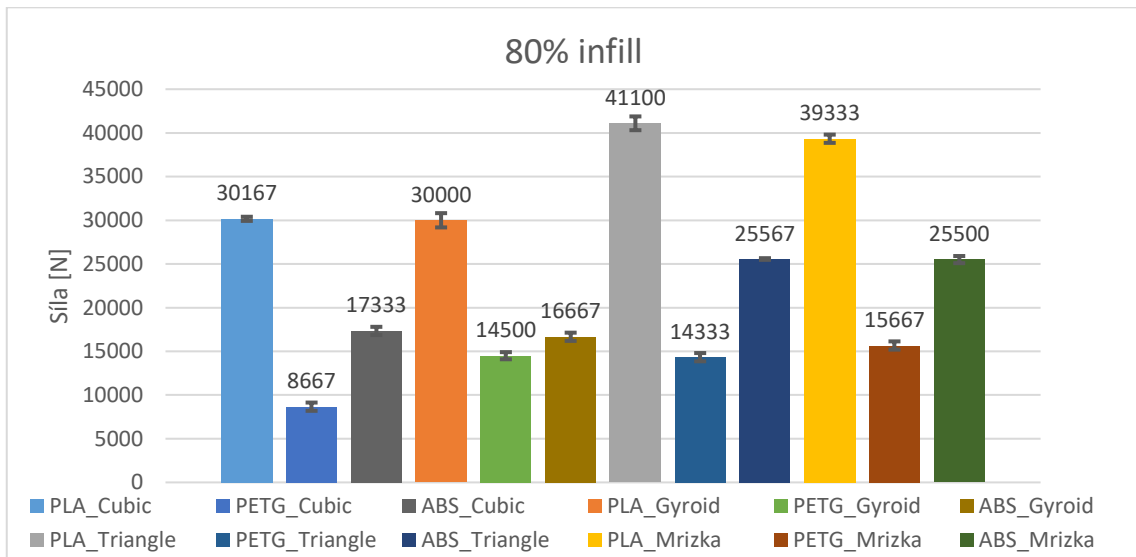
Při 60% infillu dominuje materiál PLA v kombinaci s infillem mřížka a triangle (téměř 31 000 N a 29 000 N). Třetím nejlepším materiálem je opět ABS v kombinaci s infillem mřížka (téměř 20 000 N) (viz Obrázek 41).



Obrázek 41 Vliv typu 60% infillu na velikost zatěžující síly

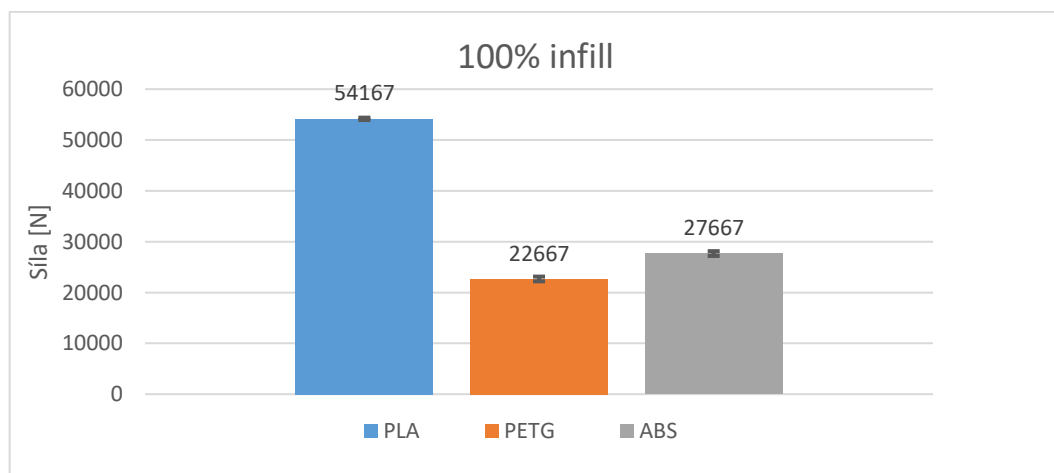


U 80% infillu překonal typ infillu triangle infill mřížku u materiálu PLA. Opět jsou tyto dva infilly v kombinaci s materiálem PLA nejlepší (viz Obrázek 42). Za nimi se nachází s téměř identickými hodnotami materiál PLA v kombinaci s infillem cubic a gyroid (30 000 N).



Obrázek 42 Vliv typu 80% infillu na velikost zatěžující síly

Všechny 3 materiály jsem podrobil této zkoušce ještě se 100% infillem. Při tomto nastavení se mění jakýkoliv typ infillu na přímočarý. Kostičky byly tedy ze 100 % vyplněny materiálem. Můžeme si všimnout opět maximální dominance materiálu PLA, který dvojnásobně překonává materiál ABS i PET-G (viz Obrázek 43).



Obrázek 43 Vliv typu 100% infillu na velikost zatěžující síly

Pro další testování na části nástroje jsem se rozhodl použít materiál PLA, neboť dosahuje nejlepších mechanických hodnot. Zároveň se jedná o materiál, který je jedním z nejnáze tisknutelných a je velmi oblíbený. Další nespornou výhodou je fakt, že během

tisku nemusí být tiskárna zakrytovaná kvůli udržení okolní teploty a zároveň nedochází během tisku k warpingu (odlepování od podložky). Lze tedy tisknout velké nástroje téměř bez komplikací.

Jako nejvhodnější typ infilly jsem na základě předchozích výsledků zvolil mřížku a triangle. Tyto dva infilly dosahovaly velmi podobných hodnot. Přestože se jedná pouze o 2D infilly (zajišťují pevnost pouze v ose Z), rozhodl jsem se pro použití právě jich, neboť všechny nástroje budou tisknuty pro orientaci v ose Z a zároveň v této orientaci budou v praxi nejvíce zatěžovány.

### 4.3 Testování nástroje na dvojitý ohyb

V tomto experimentu jsem se rozhodl otestovat 3D tištěný nástroj na dvojitý ohyb (viz Obrázek 44). Cílem tohoto experimentu bylo otestovat, jaká je potřebná síla k vyhlisování plechu HX180BD o tloušťce 0,7 mm a plechu DC01 o tloušťce 1,5 mm a zároveň při jaké síle dojde k deformaci vytištěného nástroje. Tabulka 3 uvádí mechanické vlastnosti oceli HX180BD a Tabulka 4 chemické složení oceli. Dále Tabulka 5 uvádí mechanické vlastnosti oceli DC01 a Tabulka 6 chemické složení oceli. [48]

Tabulka 3 Mechanické vlastnosti HX180BD dle ČSN EN 10 346 [48]

Značení materiálu	Mez kluzu	Mez pevnosti	Tažnost
	$R_{p0,2}$	$R_m$	$A_{80\text{ mm}}$
	MPa	MPa	%
HX 180BD	180 - 240	290 - 360	$\geq 34$

Tabulka 4 Chemické složení HX180BD dle ČSN EN 10 346 [48]

Značení materiálu	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]
HX 180BD	$\leq 0,10$	$\leq 0,50$	$\leq 0,70$	$\leq 0,06$	$\leq 0,025$	$\leq 0,10$

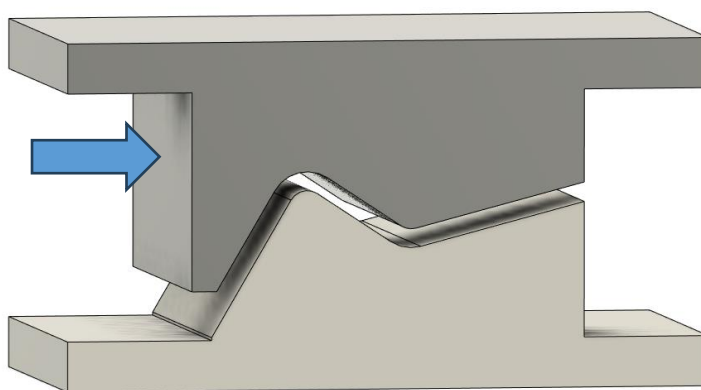
Tabulka 5 Mechanické vlastnosti DC01 dle ČSN EN 10 130 [48]

Značení materiálu	Mez kluzu	Mez pevnosti	Tažnost
	$R_{p0,2}$	$R_m$	$A_{80\text{ mm}}$
	MPa	MPa	%
DC01	280	270 - 410	$\geq 28$

Tabulka 6 Chemické složení DC01 dle ČSN EN 10 130 [48]

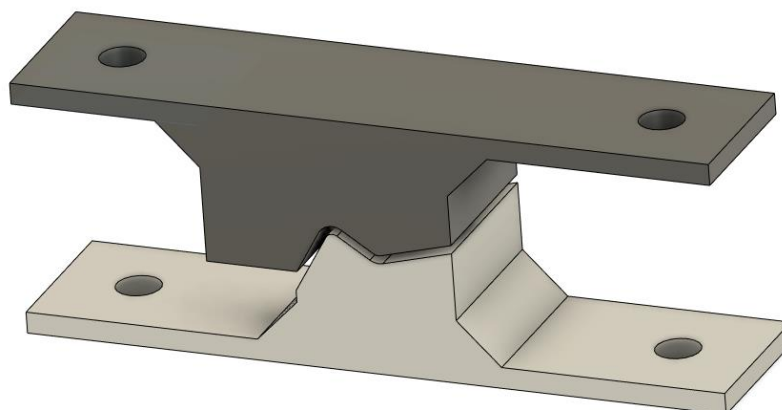
Značení materiálu	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]
DC01	≤ 0,12	≤ 0,50	≤ 0,60	≤ 0,045	≤ 0,045	≥ 0,010

Celkově byly vtištěny 4 nástroje. Jako materiál jsem zvolil materiál PLA, neboť v předchozím experimentu dosahoval nejlepších pevností. Hustota infillu činila 20 a 80 % a typ infillu jsem zvolil mřížka a triangle, dle výsledků z předchozího experimentu.



Obrázek 44 Nástroj pro dvojitý ohyb

U prvního prototypu nástroje (viz Obrázek 44) došlo k problémům s upínáním, neboť upínací plochy byly příliš malé. Zároveň docházelo k odlamování části nástroje (na obrázku označené šipkou), jelikož tato část byla příliš tenká pro lisování plechu. Z toho důvodu byl nástroj upraven následujícím způsobem (viz Obrázek 45).

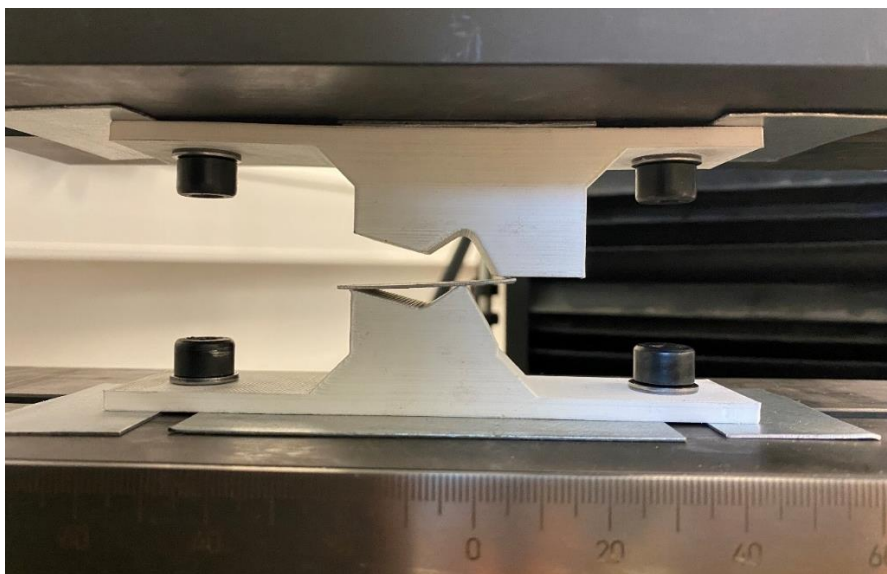


Obrázek 45 Upravený nástroj

Upínací plochy byly zvětšeny, aby bylo možné nástroj uchytit pomocí šroubů a zároveň problematická část nástroje, u které docházelo k odlamování, byla zesílená, aby bylo možné provést experiment.

#### 4.4 Vyhodnocení testování nástroje na dvojitý ohyb

Lisování probíhalo na univerzálním stroji LabTest Model 5.100SP1 (viz Obrázek 46) při konstantní rychlosti 50 mm/min. Nástroje byly tištěné s 2 perimetry, 7 horními plnými výplněmi a 3 spodními plnými výplněmi.



Obrázek 46 Upnutí prototypového nástroje

##### 4.4.1 Vyhodnocení 20% infillu

Jako první se lisovaly 3 plechy o tloušťce 0,7 mm na nástrojích z materiálu PLA s infillem typu mřížka a triangle. Síla potřebná k vylisování daných plechů činila přibližně 1,2 – 1,3 kN. Žádný z nástrojů nenesl známky použití a vylisování plechů proběhlo úspěšně.

Při lisování plechů o tloušťce 1,5 mm došlo během lisování k deformaci obou nástrojů při síle přibližně 3 kN. U nástroje s infillem typu mřížka došlo k odlomení celé části nástroje. U nástroje s infillem typu triangle došlo k zatlačení infillu dovnitř nástroje. Lisování plechu o tloušťce 1,5 mm tedy nebylo úspěšné ani u jednoho typu infillu (viz Obrázek 47).

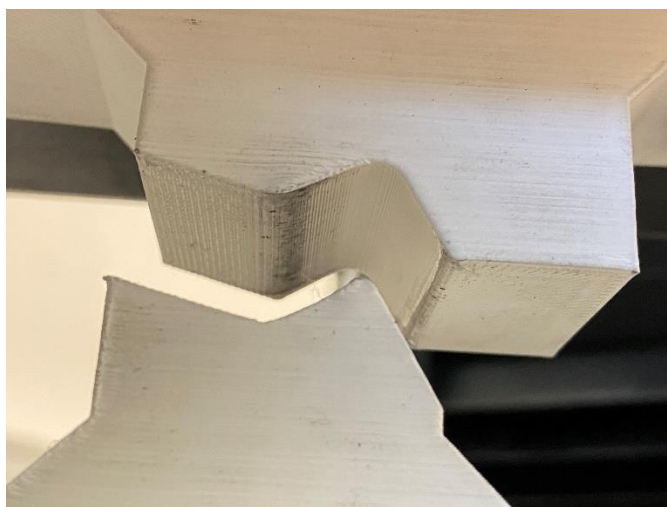


*Obrázek 47 Deformace nástrojů s 20 % infillem. Nahoře infill typu mřížka, dole infill typu triangle*

#### **4.4.2 Vyhodnocení 80% infillu**

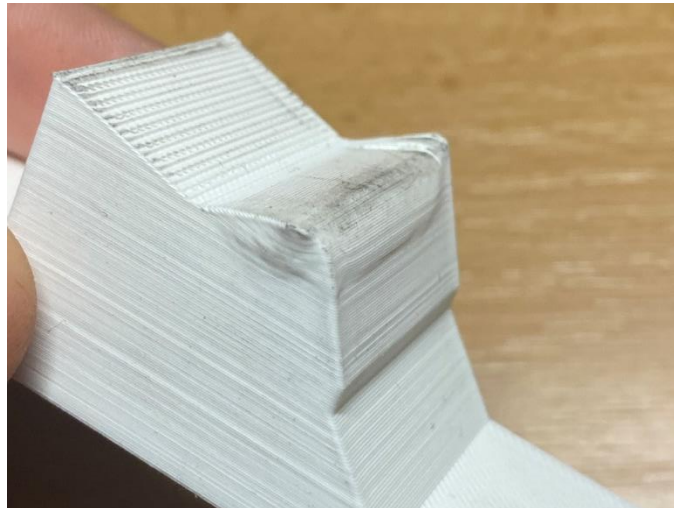
U nástrojů s 80% infillem se opět začínalo testováním lisování plechu o tloušťce 0,7 mm. Toto lisování proběhlo dle očekávání a plechy byly vylisované dle požadavků. Síla potřebná k vylisování plechu o tloušťce 0,7 mm byla opět 1,2 – 1,3 kN.

Dále bylo provedeno lisování plechu o tloušťce 1,5 mm. Na každém nástroji byly testovány 3 kusy plechů. Síla potřebná k vylisování plechů o tloušťce 1,5 mm činila přibližně 10 kN. Lisování všech plechů proběhlo úspěšně a nástroje jeví pouze menší známky opotřebení ve formě jemných otláčenin v místech rádisů (viz Obrázek 48). Otláčeniny však byly dostatečně malé na to, aby nemohlo dojít k vylisování jiného rádiusu.



*Obrázek 48 Nástroj nesoucí známky použití*

Jelikož nedošlo k deformaci u těchto nástrojů, pokračoval jsem s experimentem a postupně zvyšoval sílu, abych zjistil, při jaké síle k deformaci nástroje dojde. U nástroje s infillem typu triangle došlo k deformaci při síle přibližně 20 kN (viz Obrázek 49). Nástroj při této síle začal jevit známky promáčknutí infillu do nástroje a následné vyboulení stěn nástroje. U nástroje s infillem typu mřížka došlo k deformaci při síle přibližně 35 kN, kdy nástroj začal jevit známky deformace v podobě silných otlačenin v místech rádisů a následně vyboulení bočních stěn (viz Obrázek 50).



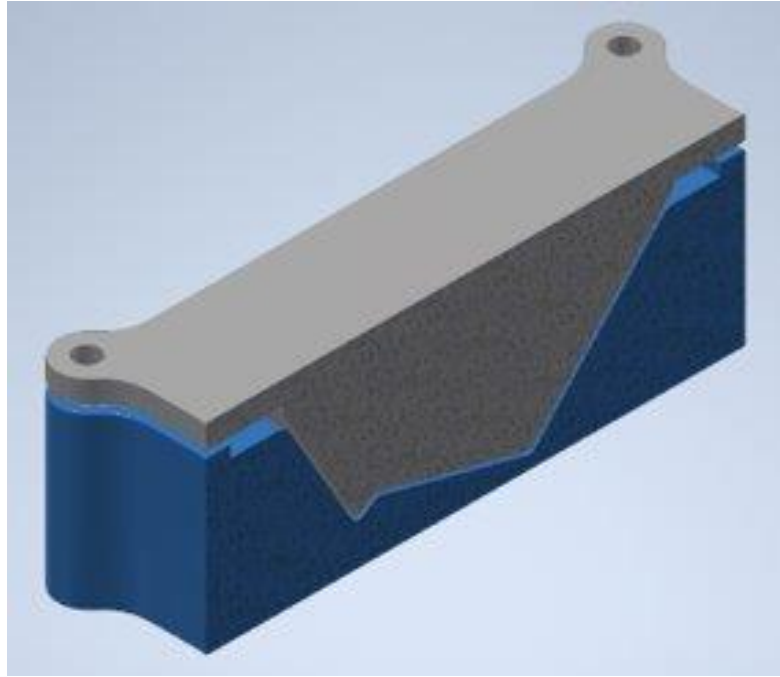
*Obrázek 49 Deformace nástroje s infillem typu triangle*



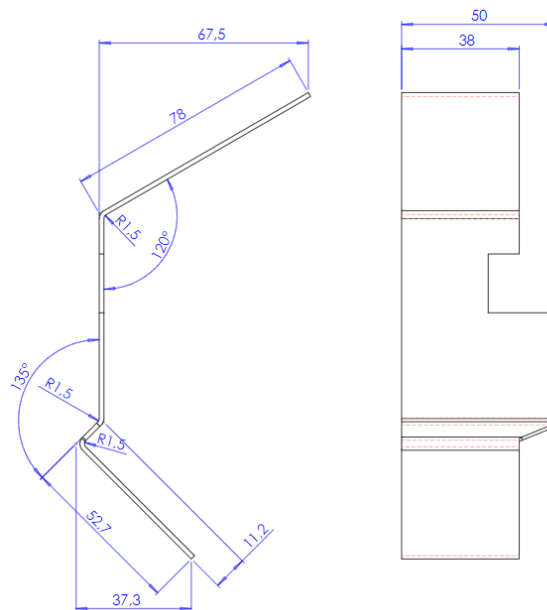
*Obrázek 50 Deformace nástroje s infillem typu mřížka*

#### **4.5 Testování 3D tištěného nástroje verze 1**

Ing. Jan Janů se ve své diplomové práci zabývá mimo jiné 3D tištěným nástrojem pro lisování plechu příruby (viz Obrázek 51). Jednalo se o malosériovou výrobu, kdy mělo být ročně vyrobeno 300 kusů. [49]



Obrázek 51 Nástroj pro lisování příruby [49]

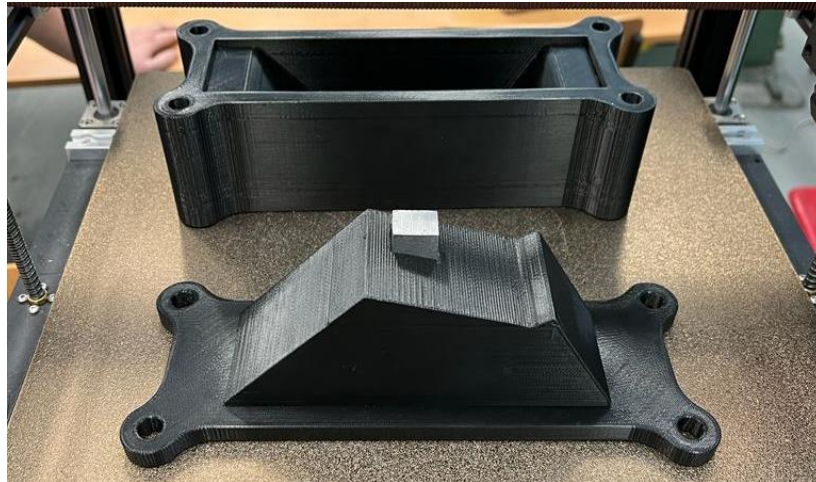


Obrázek 52 Geometrie vylisku [48]

Rozhodl jsem se využít předlohu tohoto nástroje pro tento experiment, avšak aby bylo zajištěné stejné vtahování plechu do nástroje, rozhodl jsem se nástroj upravit, neboť původní návrh se touto problematikou nezaobíral. Pro správné vtahování plechu jsem se rozhodl vytvořit otvor do nástroje, do kterého se poté nasune středící kámen (viz Obrázek 53). Tento kámen měl za cíl pokaždé správně založit plech a při lisování správně vycentrovat plech, aby byla zajištěná opakovatelnost lisování. Zároveň zajistil,



že při ohýbání se plech vtahuje vždy stejně. Tento experiment měl za cíl ověřit předchozí experimenty.



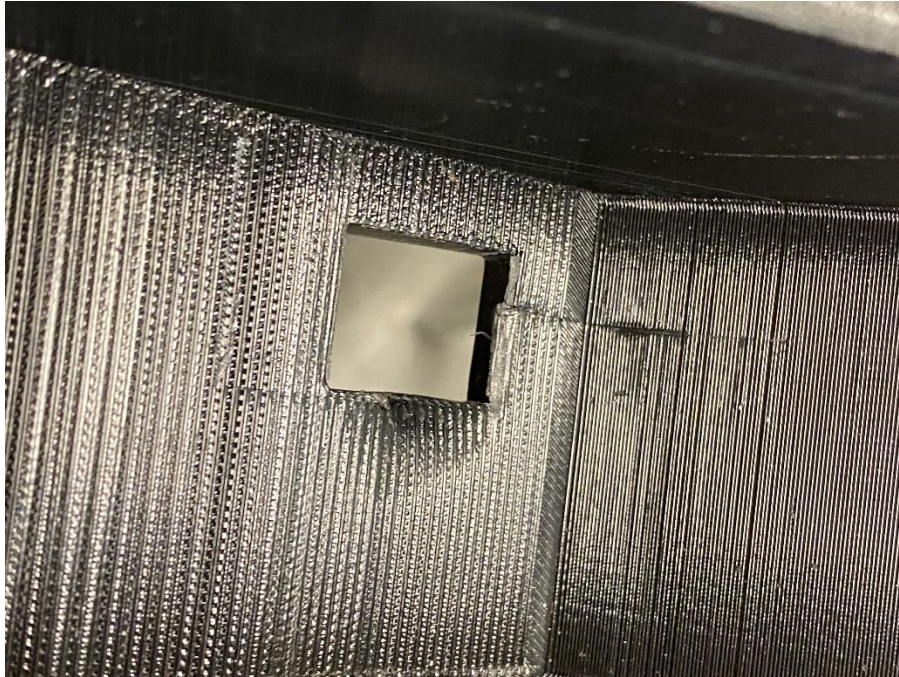
*Obrázek 53 Upravený nástroj se středícím kamenem*

#### **4.6 Vyhodnocení 3D tištěného nástroje verze 1**

Pro nástroj jsem zvolil tiskové parametry dle předchozích experimentů. Jako materiál jsem zvolil PLA. Typ infillu jsem zvolil mřížku a hustota infillu činila 80 %. Nástroj měl 2 perimetry a 7 vrchních a 3 spodní plné výplně.

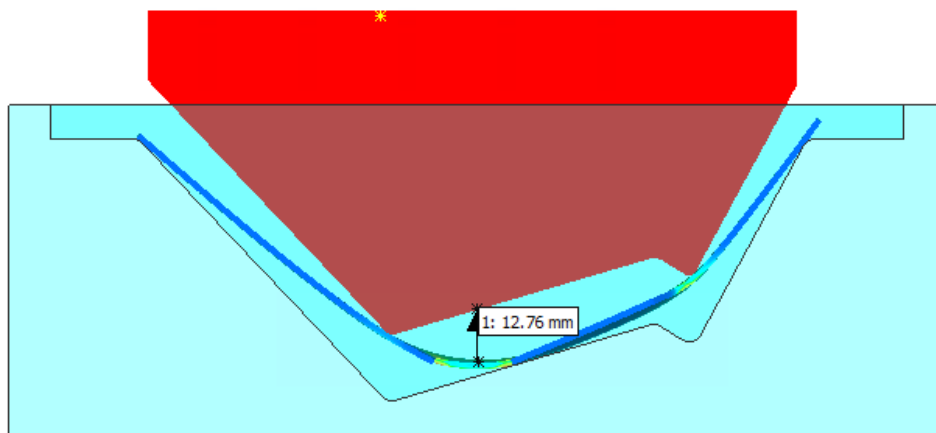
Lisování probíhalo na ručním hydraulickém lisu, kdy vedení nástroje bylo přes vodící šrouby. Výška kamene byla zarovnána s nástrojem, aby nástroj nemusel být podložen. Při pokusu o lisování plechu DC01 o tloušťce 1,5 mm jsem zjistil, že středící kámen je příliš krátký. Délka kamene činila 31 mm. Během lisování docházelo k prohýbání plechu do tvaru luku a vlivem příliš krátkého středícího kamene došlo ke vtlačení kamene do přístřihu plechu a následně do samotného nástroje (viz Obrázek 54).



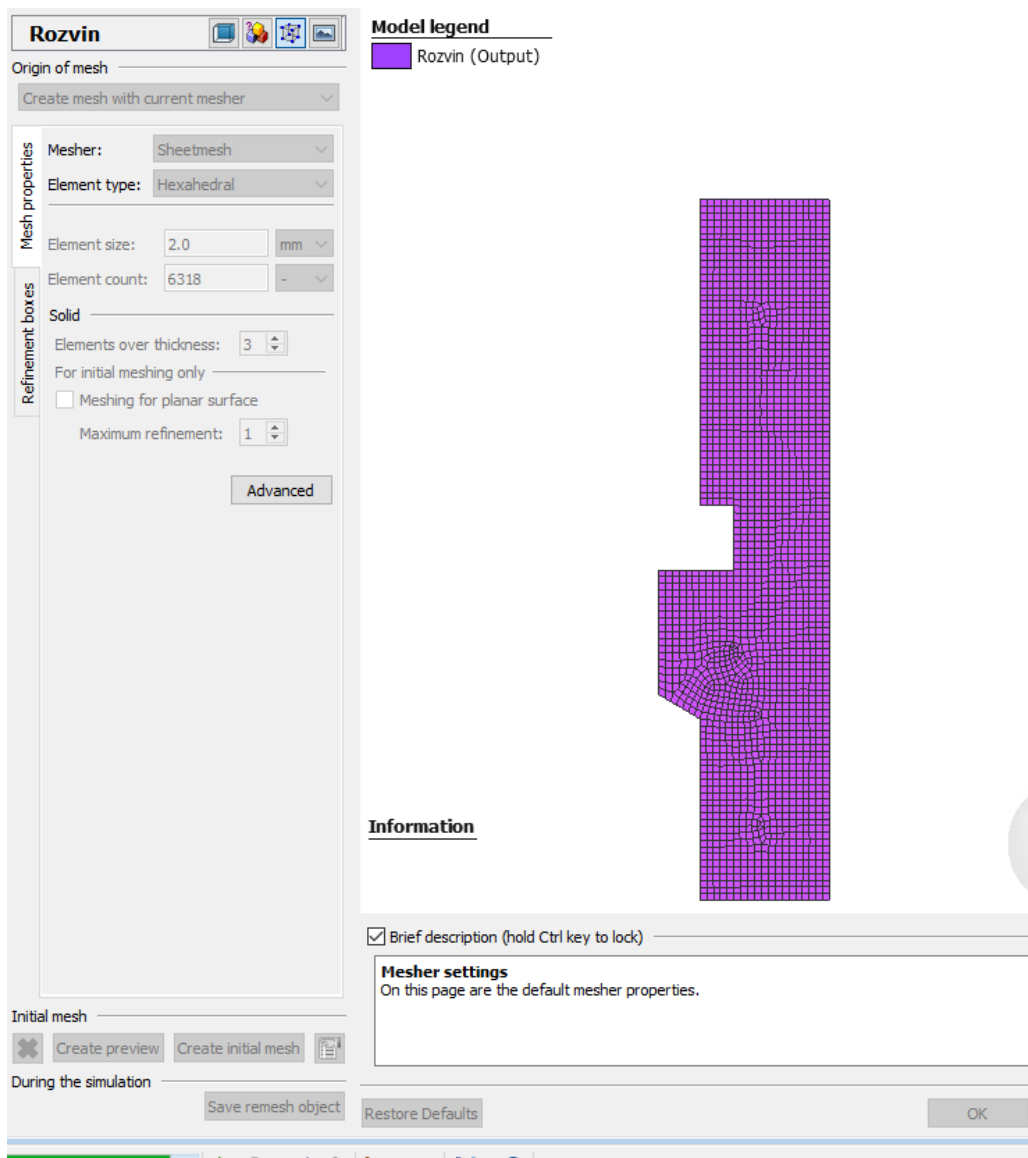


*Obrázek 54 Otláčení nástroje vlivem krátkého středícího kamene*

Pro zjištění správné délky středícího kamene jsem se rozhodl provést zjednodušenou numerickou simulaci v program Simufact Forming 2021. Pomocí této numerické simulace jsem zjistil prohnutí plechu a zároveň v jaké části se v tento moment nachází nástroj. Dle numerické simulace (viz Obrázek 55) jsem změřil potřebnou délku kamene, která měla být 51 mm. Následně jsem pro tuto délku kamene upravil daný model nástroje a rozhodl se pro opětovné testování s delším středícím kamenem. Zároveň jsem upravil způsob upnutí, kdy jsem zvolil upnutí pomocí bočních upínacích ploch a upínek, aby byl nástroj správně vystředěný.



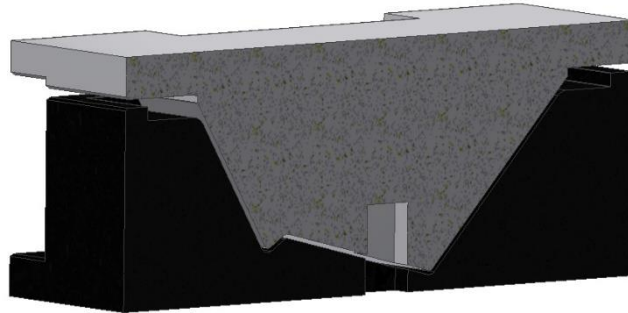
*Obrázek 55 Zjištění průhybu plechu a polohy nástroje pro zjištění potřebné délky kamene dle numerické simulace*



Obrázek 56 Nastavení typu a velikosti sítě pro daný polotovár

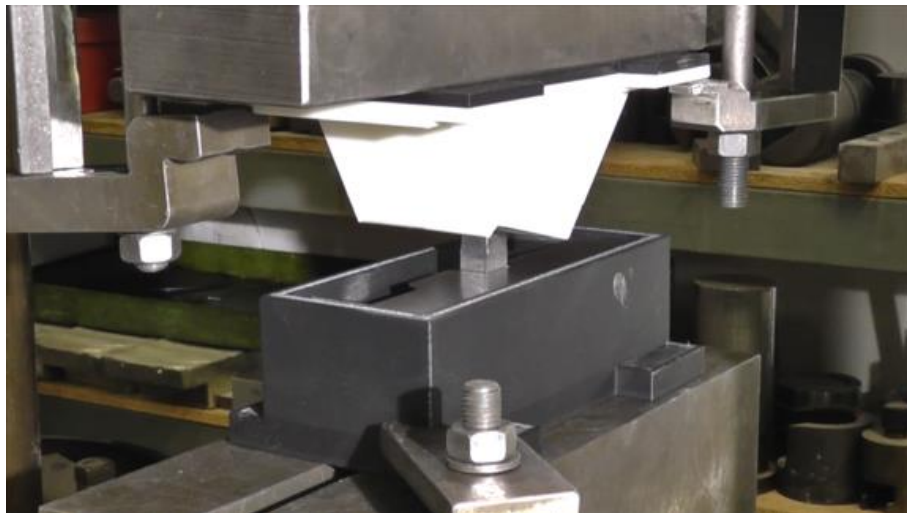
#### 4.7 Vyhodnocení 3D tištěného nástroje verze 2 (final)

Nástroj s upravenou délkou kamene (viz Obrázek 57) měl stejné tiskové parametry jako předchozí nástroj. Materiál jsem zvolil PLA, hustota infillu činila 80 %, typem infillu byla mřížka. Nástroj měl opět 7 horních a 3 spodní plné vrstvy.



*Obrázek 57 Upravený nástroj*

Rozhodl jsem se otestovat 20 kusů přístřížků plechu DC01 o tloušťce 1,5 mm a na základě opotřebení odhadnout životnost nástroje a rozhodnout, zda je možné využít tento nástroj v praxi pro danou zakázku (viz Obrázek 58).

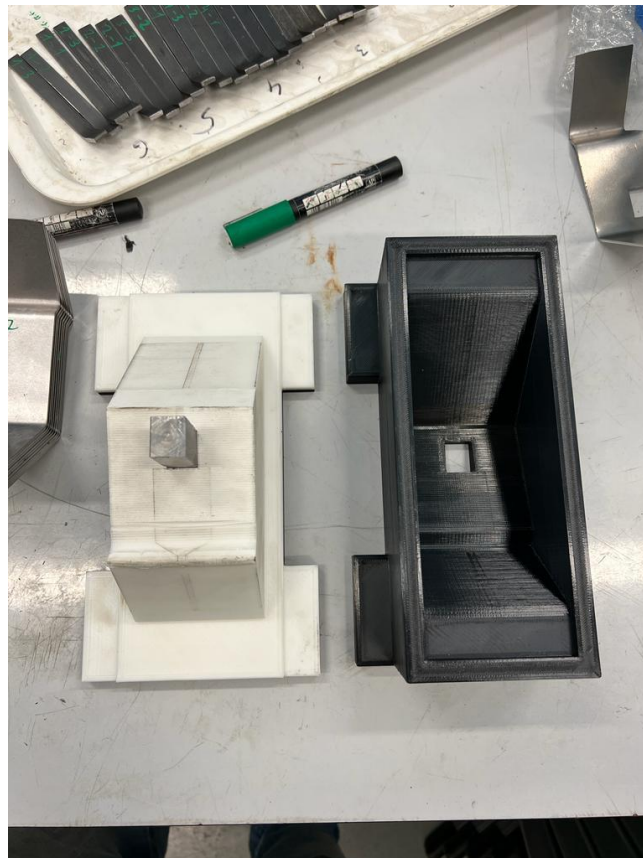


*Obrázek 58 Lisování plechu*

Lisování probíhalo na trhacím stroji s maximální silou 1000 N. Všech 20 plechů bylo vylisováno dle zadání a všechny splňovaly rozměrové požadavky pro funkci v provozu (viz Obrázek 59). Nástroj jevil po 20 kusech mírné opotřebení v oblastech rádiusů (viz Obrázek 60), avšak odhadovaná životnost, po kterou nástroj bude schopný vyrábět rozměrově správné výlisky činí minimálně 200 ks.



Obrázek 59 Vylisované plechy



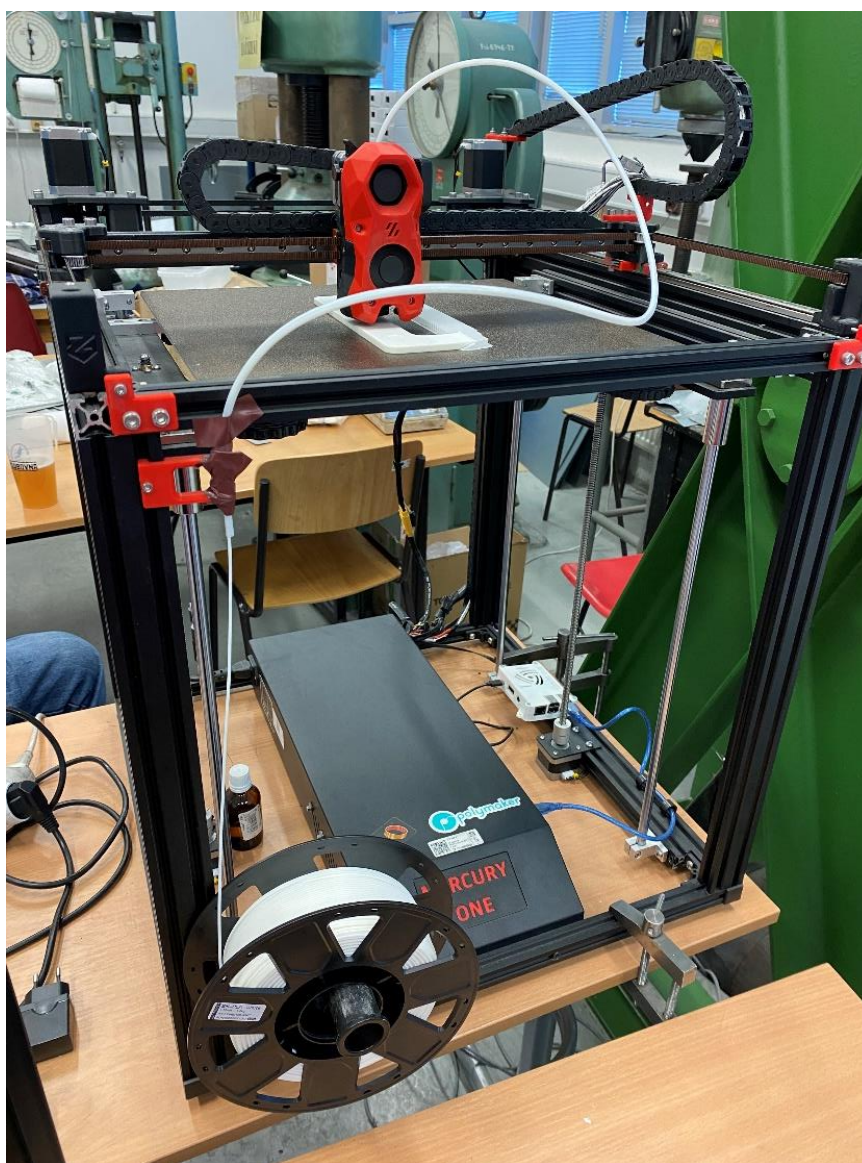
Obrázek 60 Nástroj po vylisování 20 ks plechů

Z hlediska nízké ceny 3D tištěného prototypové nástroje, jeho životnosti a malosériovosti výroby jsem usoudil, že nástroj je možné využít pro danou zakázku. Zároveň jsem se rozhodl tento nástroj upravit na dvouřadý nástroj, aby bylo možné na jednu operaci vylisovat 2 kusy této příruby. Pro tento experiment jsem se rozhodl přestavit školní tiskárnu Creality Ender 5 Plus na mód Mercury One, aby bylo možné dvouřadý nástroj vytisknout v požadované kvalitě za kratší čas.



## 5 Stavba tiskárny pro dvouřadý nástroj

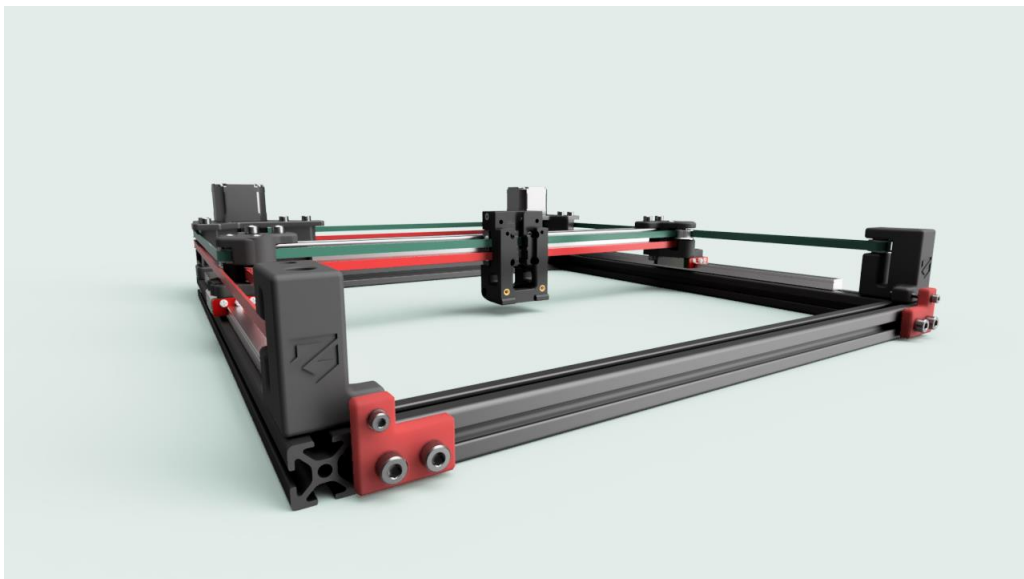
Ve škole byla k dispozici tiskárna Creality Ender 5 Plus. Její tiskový prostor činí 350x350x400 mm. Osazena je základní deskou Creality, základním Creality hotendem a autokalibračním senzorem BL Touch. Pro vyšší efektivnost využití této tiskárny jsem se rozhodl pro přestavbu této tiskárny na mód ZeroG Mercury One (viz Obrázek 61). Tento mód vychází z tiskáren Voron, avšak je uzpůsoben pro přestavbu z tiskáren Creality Ender 5 a Ender 5 Plus. Výhodou Mercury One módu je vysoká tisková rychlost, díky kompletní přestavbě pohybu tiskové hlavy na CoreXY (viz Obrázek 62) a použití kvalitních komponentů, které umožňují tisknout rychle, ale stále efektivně.



Obrázek 61 Konstrukce tiskárny Mercury One

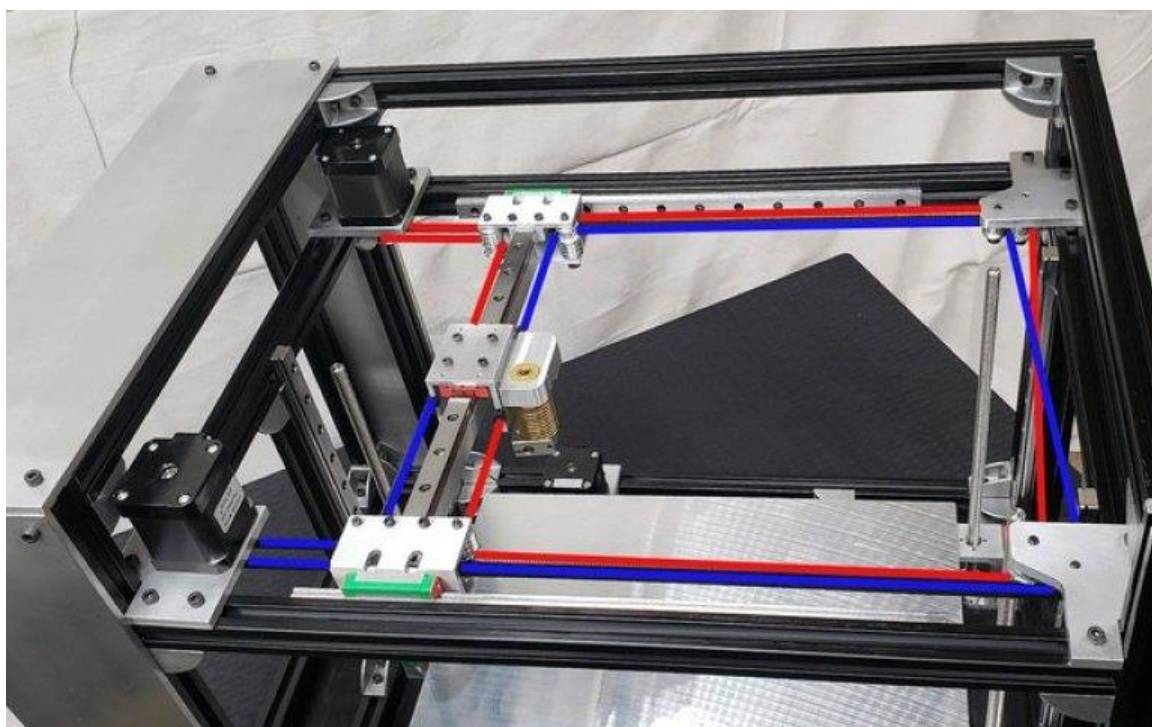
Prvním krokem bylo dát dohromady seznam dílů, které je pro přestavbu potřeba. Seznam se skládal z položek od jednotlivých šroubků po krokové motory a správný výběr elektroniky. Následně bylo třeba vytisknout díly, které jsou při stavbě tiskárny potřeba. Díly jsou z materiálu ABS, neboť u CAD modelů se počítá se smrštěním materiálu ABS a zároveň je tento materiál doporučen jako nejvhodnější díky svým mechanickým vlastnostem a teplotní odolností. Díly jsem tiskl na tiskárnách Průša i3 MK3S+ a Voron Trident. Díly byly tištěné s tryskou 0,4 mm, výškou první vrstvy 0,24 mm a dále 0,2 mm. Počet horních a spodních vrstev jsem zvolil 5. Dále jsem zvolil 4 perimetry a 40% výplň dle doporučení pro tento mód.

Pohyb osy X a Y zajišťovalo vedení gumových koleček, které se pohybovaly v drážkách hliníkového profilu. Tento typ vedení je tichý, avšak není možné použít vysokých rychlostí. Zároveň je toto vedení velmi nepřesné. Rozhodl jsem se tedy pro osazení tiskárny lineárním vedením MGN12H. Dvě lineární vedení slouží pro pohyb osy Y a jedno vedení pro pohyb osy X. Tento typ lineárního vedení umožňuje dosahovat vysokých rychlostí tiskové hlavy bez ztráty přesnosti.



*Obrázek 62 Lineární vedení na Mercury One [50]*

Pohyb v ose Y byl zajištěn jedním motorem a dvěma řemeny. Pohyb osy X byl zajištěn jedním motorem a jedním řemenem. Rozhodl jsem se pro předělání pohybů na CoreXY (viz Obrázek 63). Výhodou této techniky je, že motory se nepohybují s tiskovou hlavou a tím pádem dojde k odlehčení osy X, která vykonává pohyb v ose X i Y (Cube řešení 3D tiskárny). Jelikož jsou základní motory příliš slabé pro rychlý tisk, rozhodl jsem se pro krokové motory LDO-42STH48, které jsou silnější. Řemeny jsem zvolil 6 mm od značky Gates, neboť řemeny od ostatních výrobců se při vysokých rychlostech rychle unaví a je třeba je často vyměňovat. Pro vedení řemenů v konstrukci jsem zvolil kvalitní Japonská ložiska F695-2RS, která jsou dlouhodobě spolehlivá.

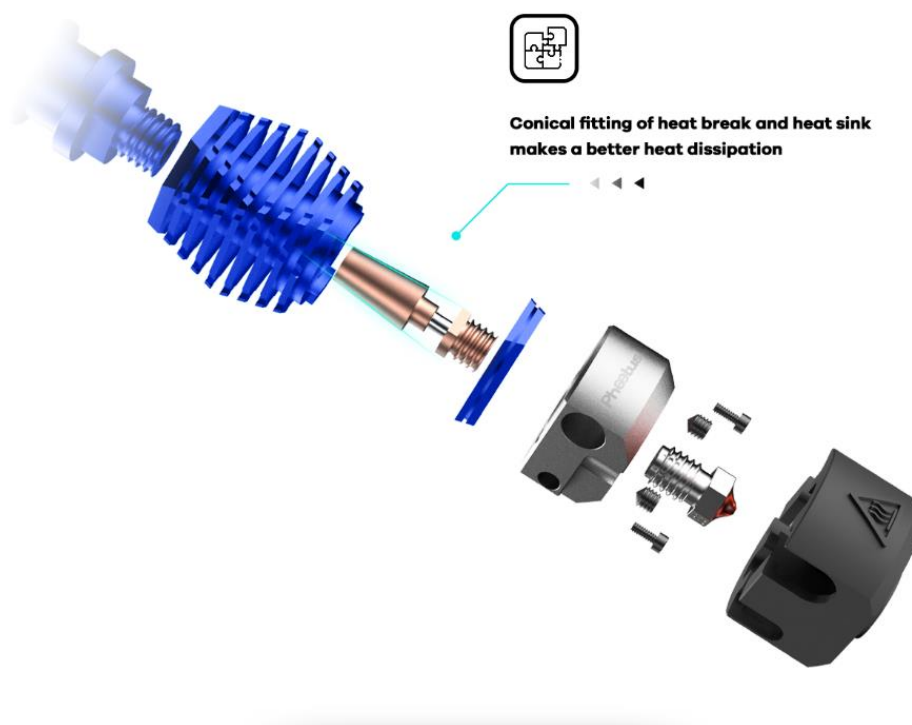


*Obrázek 63 Schéma vedení řemenů u CoreXY [51]*

Základní tisková hlava u tiskárny Creality Ender 5 Plus obsahuje hotend CR-10. Tento hotend má vedení PTFE trubičky až k trysce, což způsobuje častý problém s natavením PTFE trubičky v oblasti heatblocku a následně ucpání hotendu. Tento typ hotendu je tedy velmi nevhodný pro dlouhé a rychlé tisky. Další nevýhodou je fakt, že nezvládne vysoké teploty a není tak vhodný pro tisk průmyslových materiálů. Jako vhodný hotend jsem zvolil Dragonfly BMO od výrobce Phaetus (viz Obrázek 64). Tento hotend vychází z osvědčeného modelu V6 od značky E3D. Výhodou tohoto hotendu je kovový heatbreak, díky čemuž není potřeba PTFE trubičky, a nedochází tak k její degradaci. Dále má výborný odvod tepla díky masivnímu heatsinku, a není tak

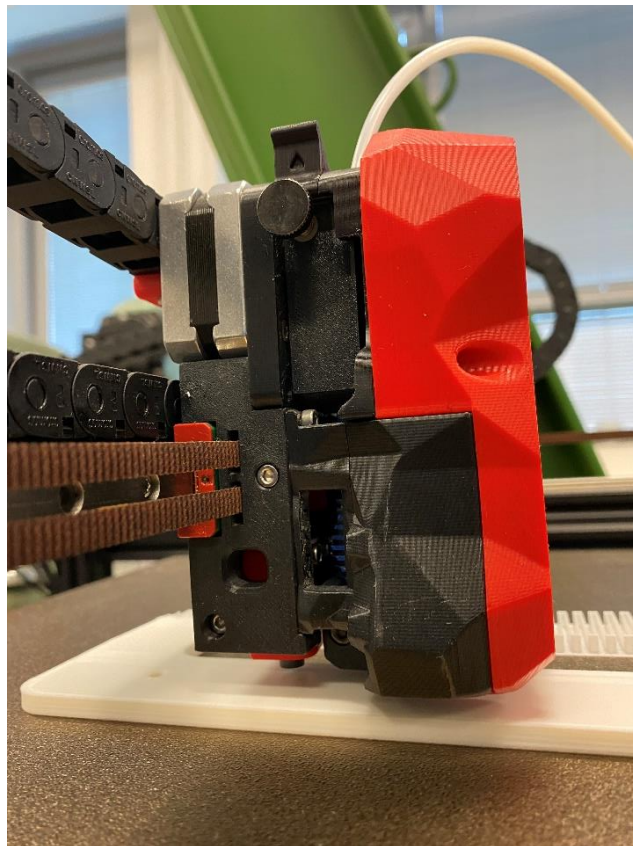


potřeba použít extrémně silného a hlasitého ventilátoru. Největší výhodou je však velký ocelový heatblock, který zajistí rychlé a kvalitní roztavení materiálu a možnost tisknout materiály až na teplotu 500 °C. Jelikož má tiskárna tisknout rychle a efektivně, rozhodl jsem se pro tento hotend zvolit kvalitní CHT trysku od výrobce BondTech o standardní velikosti 0,4 mm. Tato tryska má v sobě 3 otvory a tenkou přepážku, díky čemuž dochází k lepšímu tavení materiálu. Kombinací tohoto hotendu a trysky jsem tak vytvořil tzv. „High-flow hotend“, tedy hotend, který zvládne vysoký průtok materiálu.



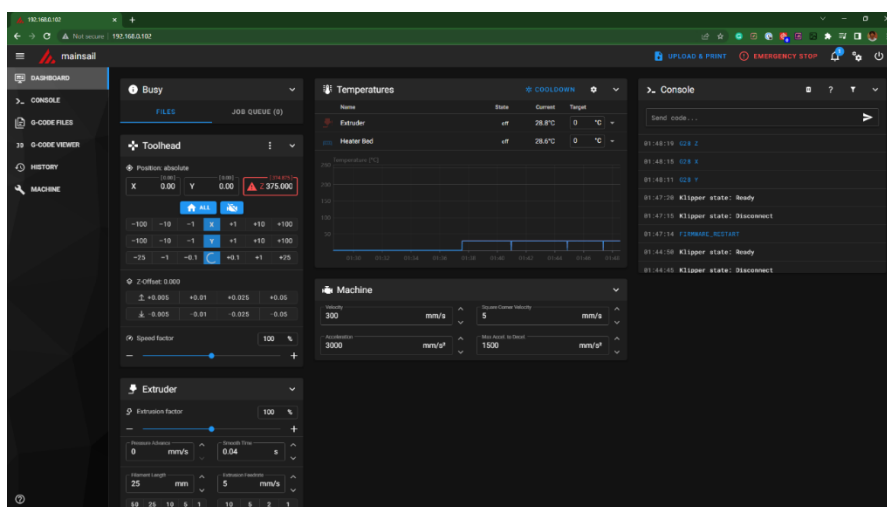
Obrázek 64 Dragonfly hotend [52]

Typů tiskových hlav, které je možné použít je mnoho. Rozhodl jsem se pro design tiskové hlavy, které používají tiskárny Voron. Tento design se nazývá StealthBurner (viz Obrázek 65). Jedná se o řešení, které má přímý extruder přímo nad hotendem. Pro extruder jsem zvolil podávací kolečka BMG od značky Bondtech a jako vhodný motor jsem zvolil Nema 17 42x42x23 mm, tzv. „Pancake“. Výhodou tohoto motoru je nízká hmotnost, která je u rychlého pohybu tiskové hlavy důležitá. O chlazení výtisku se stará radiální ventilátor 5015, který se nachází v horní části StealthBurneru a spodní axiální ventilátor 4010 chladí hotend. Jako automatický kalibrační senzor jsem se rozhodl zvolit indukční snímač Pinda od značky PrusaResearch, neboť toto řešení je rychlejší a přesnější než BL Touch. Zároveň BL Touch nelze namontovat do tiskové hlavy Stealthburner.

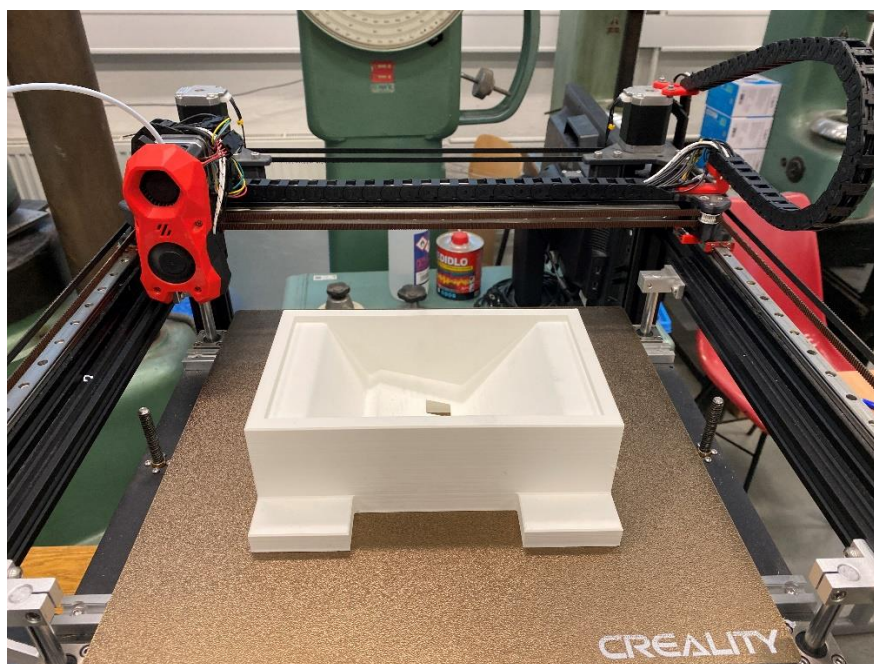


*Obrázek 65 Tisková hlava StealthBurner*

Základní deska u tiskárny Creality Ender 5 Plus je od značky Creality. Přestože je 32bitová, není kvůli driverům vhodná pro rychlý tisk. Zároveň není možné do ní nahrát operační systém Klipper. Zvolil jsem tedy osvědčenou desku SKR Mini E3V3 od firmy BigTreeTech. Tato deska má integrované drivery TMC 2209, které umožňují tichý tisk a lze na ni nahrát operační systém Klipper. Operační systém Klipper jsem zvolil, neboť s ním mám vlastní zkušenosti, používám ho na svých tiskárnách a obsahuje uživatelské vychytávky, které konkurence (např. Marlin) neobsahuje. Zároveň je možné díky Klipperu ovládat tiskárna na dálku. K operačnímu systému Klipper jsem zvolil uživatelské rozhraní Mainsail (viz Obrázek 66).



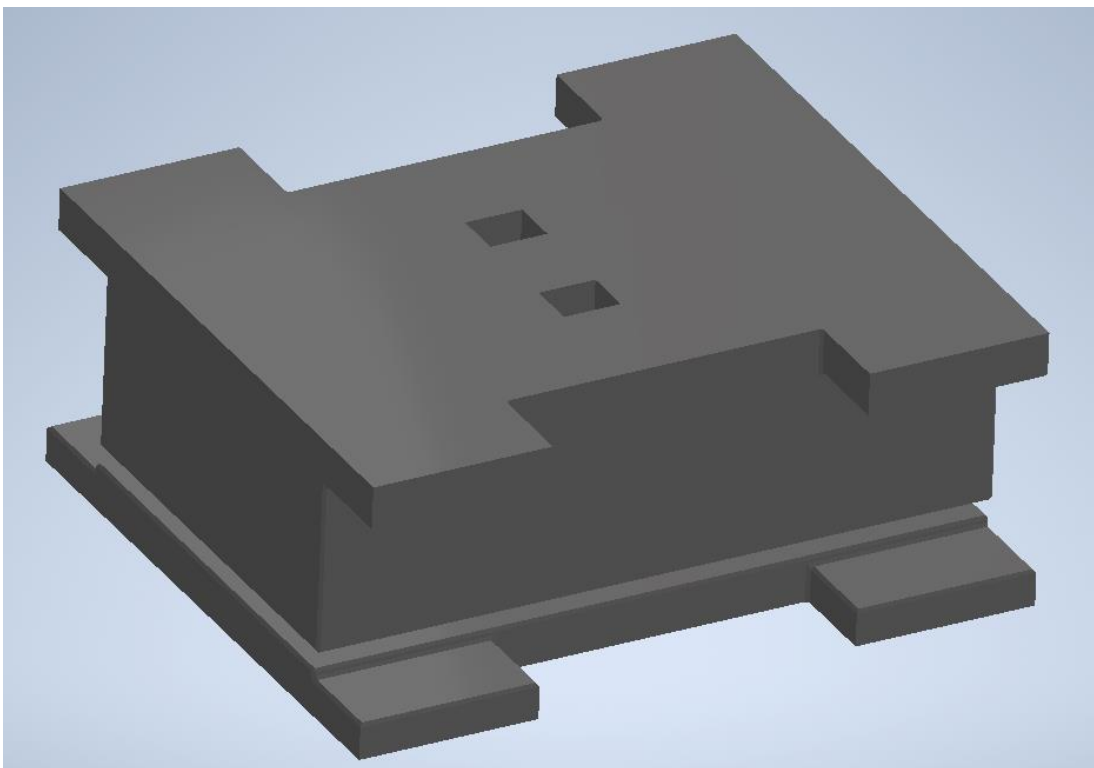
Obrázek 66 Uživatelské rozhraní Mainsail



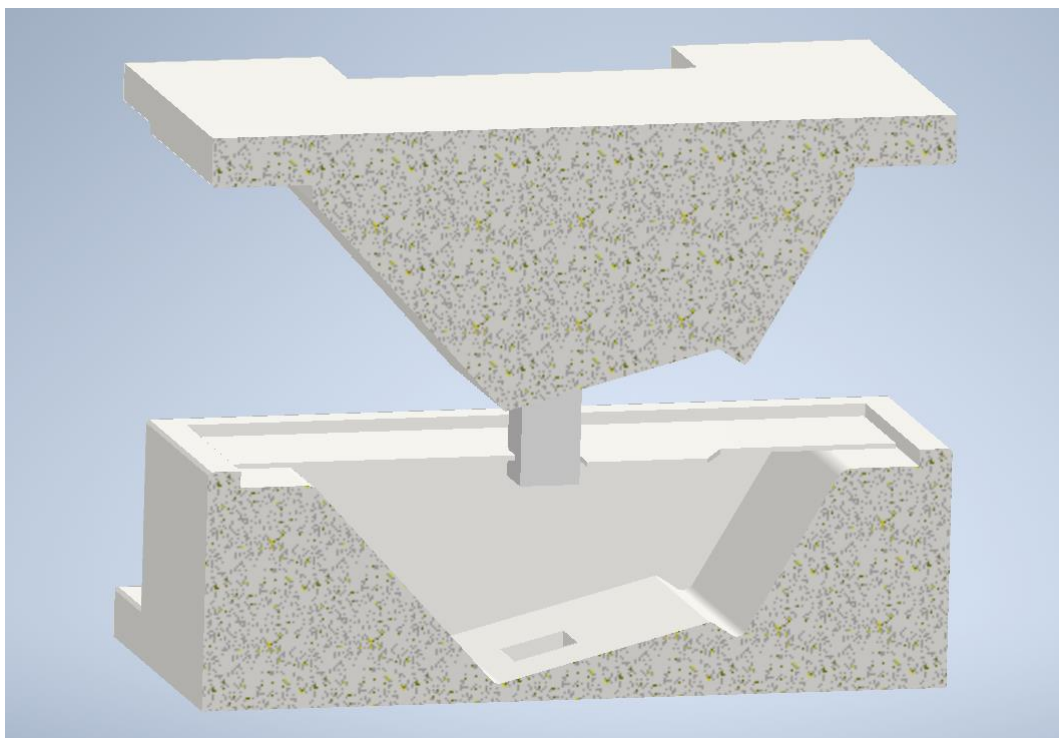
Obrázek 67 Vytištěný dvouřadý nástroj na tiskárně Mercury One

## 6 Návrh a tisk dvouřadého nástroje

Plechové příruby se skládají z pravých a levých částí, jejichž počet musí být stejný. Proto je třeba při lisování na jednořadém nástroji přistřížek po každém lisování otočit, aby byl počet pravých a levých výlisků shodný. Tento proces může vést v průmyslovém provozu k chybě, kdy operátor lisu zapomene, jaký díl naposledy lisoval a výsledný počet kusů na konci nebude stejný. Z tohoto důvodu a také kvůli úspoře času lisování jsem navrhl dvouřadý nástroj, který urychlí celkovou dobu lisování požadovaného množství kusů a zároveň zajistí stejný počet obou částí přírub (viz Obrázek 68).

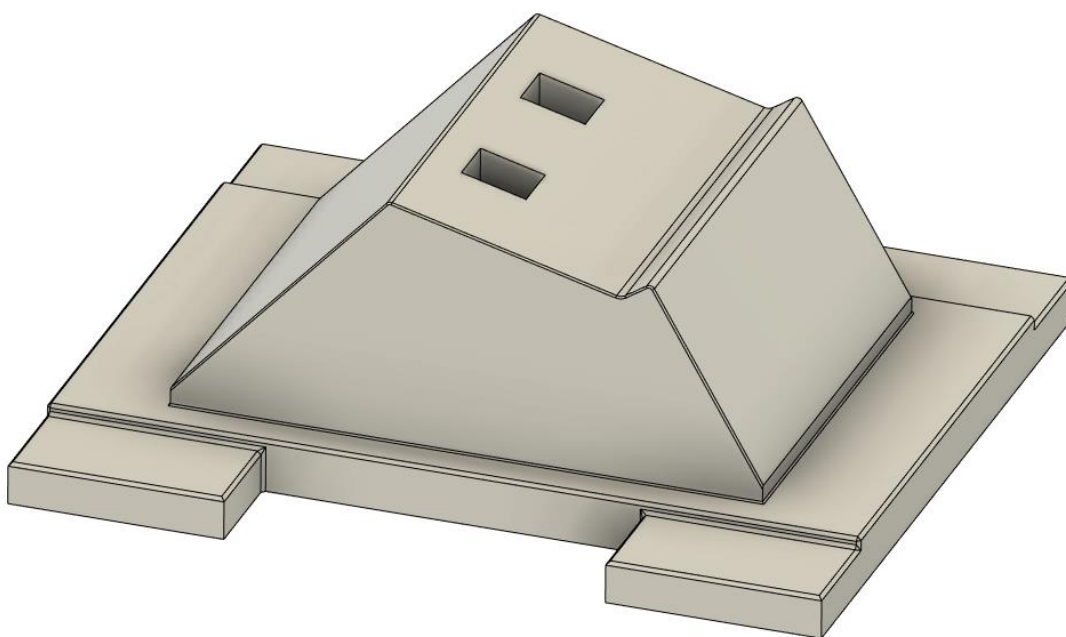


*Obrázek 68 Dvouřadý nástroj*



*Obrázek 69 Řez dvouřadým nástrojem*

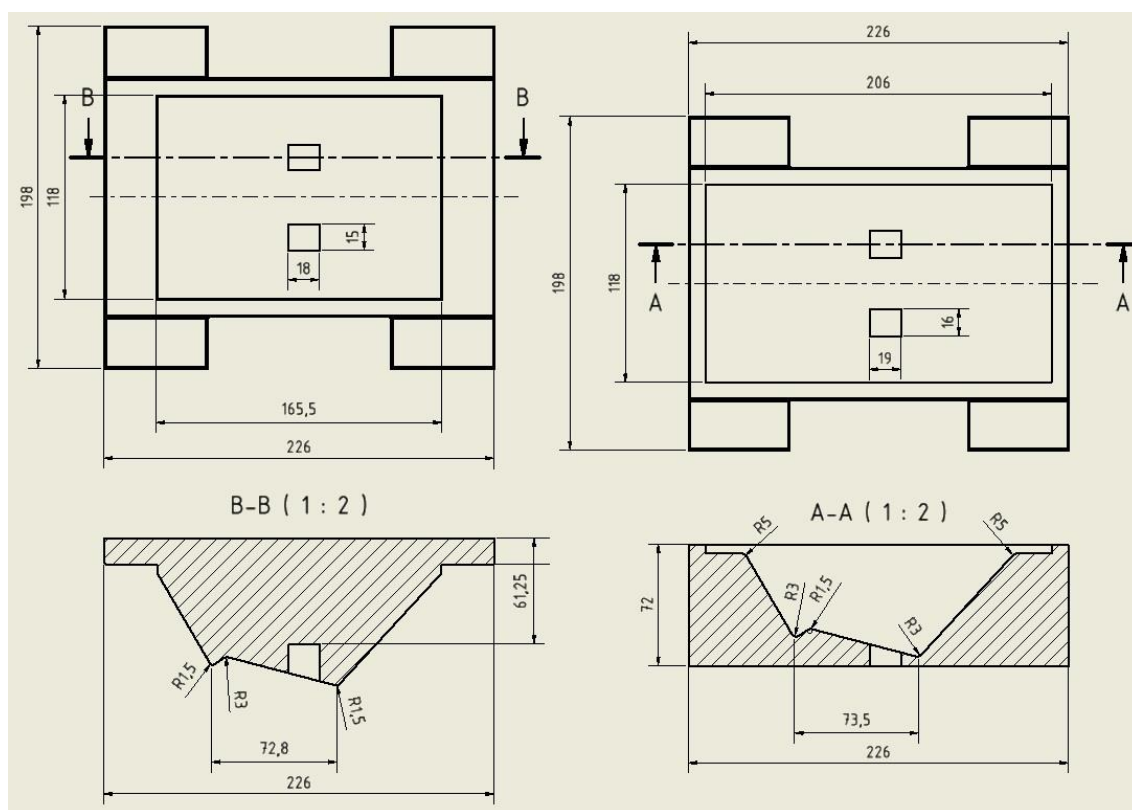
Nástroj, který jsem modeloval v CAD programu Autodesk Inventor 2024, obsahuje dva středící kameny a upnutí je vymyšleno pomocí upínacích ploch a upínek. To zaručí správné vystředění horní i spodní části nástroje (viz Obrázek 69).



*Obrázek 70 Část dvouřadého nástroje*



Nástroj byl tištěný na tiskárně Mercury One, která byla v rámci této práce postavena. Materiál byl opět PLA s infillem typu mřížka a 80% hustotou. Zvolil jsem 3 perimetry, 7 horních vrstev a 3 spodní vrstvy. Celkové rozměry nástroje jsou 226 x 198 x 92 mm. Doba tisku horní části nástroje činila 31 hodin a spotřebovala 1,4 kg materiálu. Dolní část nástroje se tiskla 27 hodin a spotřebovala též 1,4 kg materiálu. Celková doba tisku byla 58 hodin na tiskárně Mercury One. Pokud by se nástroj tiskl na původní tiskárně Creality Ender 5 Plus celková doba tisku by činila 136 hodin.



Obrázek 71 Výkres horního a spodního nástroje

## 7 Závěr

Ve své diplomové práci jsem se zabýval vlivem typu a hustoty infillu na mechanické vlastnosti 3D tištěného lisovacího nástroje. V první části mé práce jsem se zabýval metodami FDM (FFF) 3D tisku a rozdělením typů FDM 3D tiskáren na jednotlivé typy dle konstrukce. Dále jsem popsal hlavní části FDM 3D tiskáren a vysvětlil jejich princip fungování. Poté jsem se zabýval materiály, které se nejčastěji využívají v FFF 3D tisku a popsal jsem u každého materiálu jeho výhody a nevýhody a jejich vhodnost použití. Dále jsem se v této rešeršní části věnoval vybraným parametrům, které ovlivňují kvalitu 3D tištěných dílů. Na závěr teoretické části diplomové práce jsem se zabýval teorií plošného tváření a teorií tlakové zkoušky.

V praktické části jsem navrhl metodiku testování vhodného infillu a materiálu pomocí tělesa o tvaru kvádrů, ze kterého jsem vyhodnotil nejlepší materiál a nejlepší typ infillu pro namáhání v tlaku. Dále jsem testoval prototypový nástroj na dvojitý ohyb, u kterého jsem zkoumal vliv typu a hustoty infillu a zároveň zjišťoval, při jaké síle lisování dojde k porušení daného nástroje. Jako další nástroj jsem testoval nástroj pro lisování dílu do příruby, u kterého jsem se rozhodl pro úpravu. První úpravou bylo přidání středícího kamene, který byl však příliš krátký a bylo třeba zjistit potřebnou délku kamene. K tomu jsem využil numerickou simulaci v programu Simufact Forming, nástroj jsem upravil a vytvořil finální nástroj. Pomocí tohoto nástroje jsem zkoušel vylisovat 20 kusů plechů. Všechny tyto plechy byly vylisované bez zjevných vad a ve správné toleranci vůči přírubě dle zadání a podle opotřebení jsem odhadl životnost nástroje. Jelikož bylo možné tento nástroj použít v praxi, rozhodl jsem se o vytvoření dvouřadého nástroje, který na jednu operaci vylisuje levý i pravý díl příruby zároveň, díky čemuž nemůže dojít u obsluhy ke zvolení špatné strany lisování. Pro tento dvouřadý nástroj jsem se rozhodl modifikovat školní tiskárnu Creality Ender 5 Plus na mód Mercury One, aby bylo možné dvouřadý nástroj vytisknout rychle se zachováním kvality.

U testování vhodného typu infillu a materiálu na kostičce o velikosti 25x25x25 mm jsem zjistil, že nejvyšší síly potřebné pro deformaci kostičky bylo dosaženo u infillů typu triangle a mřížka. Tyto dva infilly dosahovaly velmi podobných hodnot. Oproti tomu nízkých, avšak navzájem podobných hodnot dosahovaly infilly typu cubic a gyroid. Z naměřených materiálů vykazoval nejlepší pevnostní vlastnosti materiál PLA, který měl dvojnásobně vyšší pevnost než materiály PET-G a ABS, kdy všechny

materiály byly od stejného výrobce. Zároveň jsem zjistil, že doba tisku, množství materiálu a síla potřebná k deformaci dané kostičky lineárně roste s přibývajícím hustotou infillu.

Dále jsem testoval dvojitý ohyb na prototypovém nástroji. Jednalo se o malý nástroj, který kopíruje pouze část geometrie výsledného lisovacího nástroje. Na základě tohoto nástroje jsem chtěl zjistit, zda je schopný tuto lisovací operaci provést a pro jaký typ a hustotu infillu je schopen ohnout plech o tloušťce 0,7 a 1,5 mm. Zároveň jsem tento zjednodušený nástroj vybral i z časových a finančních důvodů. Dle předchozího experimentu jsem zvolil pouze materiál PLA a testoval pouze infill typu triangle a mřížka, kdy hustota infillu byla 20 a 80 %. U první verze toho nástroje došlo k problémům s odlamováním části nástroje vlivem špatného modelu nástroje. Nástroj byl upraven a testován na lisování plechu HX180BD o tloušťce 0,7 a plechu DC01 o tloušťce 1,5 mm. Síla potřebná k vylisování plechu o tloušťce 0,7 mm byla 1,2 – 1,3 kN. Síla potřebná k vylisování plechu o tloušťce 1,5 mm byla 10 kN, avšak tuto sílu nezvládly nástroje s 20% infillem. U obou nástrojů s 20% infillem došlo k jejich deformaci při síle přibližně 3 kN při pokusu o vylisování plechu DC01 o tloušťce 1,5 mm. U nástrojů s 80% infillem a tloušťce plechu 1,5 mm došlo k deformaci při přibližně 20 kN (nástroj s infillem typu triangle) a při 35 kN (nástroj s infillem typu mřížka).

Následovalo testování na 3D tištěném nástroji pro lisování příruby. Nástroj jsem pro zajištění správného vtahování plechu do nástroje upravil pomocí přidání středícího kamenu, neboť se původní návrh touto problematikou nezabýval. Tento kámen měl za úkol pokaždé správně založit plech, během lisování správně plech vycentrovat a zároveň měl zajistit, že při ohýbání se plech bude vtahovat vždy stejně. První verze tohoto nástroje s kamenem však ukázala problém v příliš krátkém kamenu, kvůli čemu docházelo ke vtlačování kamene do nástroje i do plechu. Za pomoci numerické simulace v programu Simufact Forming jsem zjistil potřebnou délku kamene a nástroj jsem pro ni upravil.

Poté probíhalo testování nástroje v praxi na 20 kusech plechů DC01 o tloušťce 1,5 mm. Pro lisování jsem použil sílu 45 až 60 kN, neboť při malé síle nebyly ohybky zcela dolisované. Všechny 20 plechů bylo vylisováno dle požadavků s požadovanými tvary i rádiusy. Nástroj po lisování jevil mírné známky použití ve formě otláčenin v místech rádiusů, avšak otláčeniny nebyly dostatečně velké na to, aby změnil velikost rádiusů



výlisků. Z tohoto experimentu jsem usoudil, že nástroj je možné v reálné praxi použít a rozhodl jsem se o vytvoření dvouřadého nástroje, který na jednu operaci vylisuje levou i pravou část plechu, díky čemuž nemůže dojít u obsluhy lisovacího stroje k záměně těchto kusů vlivem nepozornosti. Zároveň by bylo vhodné, aby se lisovalo na excentrickém lisu na zdvih, místo na danou sílu. Pokud by se nástroj upnul pod excentrický lis, došlo by ke zvýšení kadence lisování a zároveň by se každý kus lisoval na výšku zdvihu, čímž by se zajistilo stejného vylisování u všech kusů výlisků.

Pro tento dvouřadý nástroj jsem se rozhodl pro přestavbu školní tiskárny Creality Ender 5 Plus na custom mód Mercury One. Tato přestavba obnášela změnu kinematiky tiskárny na kinematiku CoreXY a dále bylo pro vedení os X a Y využito lineární vedení. Dále jsem se rozhodl pro použití direct tiskové hlavy kvůli přesnému dávkování materiálu a využil jsem design, který se používá u tiskáren Voron. Jako hotend jsem zvolil Phaetus Dragonfly BMO v kombinaci s CHT tryskou. Tato hotendová sestava umožňuje tisknout vysokou rychlostí se zachováním kvalitního roztavení materiálu. Jako firmware jsem se rozhodl zvolit Klipper, neboť umožňuje uživateli plnou kontrolu nad tiskárnou a umožňuje například vzdálenou správu tiskárny či posílání G-kódů ze sliceru přímo do tiskárny.

Předmětem dalšího zkoumání by bylo možné využít numerických simulací pro zjištění opotřebení nástrojů. Dále možnosti zvýšení životnosti nástrojů pomocí různých podpůrných plíšků, které mohou být zapuštěny přímo v nástroji nebo se na nástroj po vytisknutí upnou. Dalším možným řešením pro zvýšení životnosti nástroje by bylo tisknout nástroj na dvě části, které by se následně k sobě připnuly. Výhodou tohoto řešení by bylo, že při opotřebení horní připnuté části, která zajišťuje lisování, by bylo možné tuto část opětovně vytisknout a celý nástroj opět využít. Snížilo by se tak množství času na vytištění nástroje a snížilo by se potřebné množství materiálu. V poslední řadě by bylo možné tisknout nástroj bez spodních plných vrstev a po vytištění nástroje vylít vnitřek nástroje určitým materiálem, kterým může být například pryskyřice.

## 8 Bibliografie

- [1] První zmínky o 3D tisku. In: *3d-tiskni.cz* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://3d-tiskni.cz/prvni-zminky-o-3d-tisku/>
- [2] BERÁNEK, Libor. *Vývoj aditivních technologií, používané principy výroby, typický postup výroby*. Praha, 2019. Přednáška. ČVUT v Praze.
- [3] Additive Manufacturing Technologies. In: *Hubs.com* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/get/am-technologies/>
- [4] FDM (Fused deposition modeling). In: *Cotu.cz* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/134/fdm-fused-deposition-modeling>
- [5] PETERSON, Elizabeth. Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method. In: *Livescience.com* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>
- [6] PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. Základy 3D tisku s Josefem Průšou. In: *Prusa3d.com* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: [https://www.prusa3d.com/cs/stranka/zaklady-3d-tisku-s-josefem-prusou\\_490/](https://www.prusa3d.com/cs/stranka/zaklady-3d-tisku-s-josefem-prusou_490/)
- [7] Přehled technologií 3D tisku. In: *Dkmp.cz* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [8] O'CONNELL, Jackson. The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY, & More. In: *All3dp.com* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>
- [9] Types of printers and their differences. In: *Prusa3d.com* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/article/types-of-printers-and-their-differences\\_112464](https://help.prusa3d.com/article/types-of-printers-and-their-differences_112464)
- [10] The 4 Types of FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar & Scara). In: *3dsourced.com* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.3dsourced.com/3d-printers/types-of-fdm-3d-printer-cartesian-delta/>

- [11] M, Alex. The Types Of FDM 3D Printer. In: *3dnatives.com* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/#!>
- [12] Basic hotend maintenance. In: *Filament2print.com* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: [https://filament2print.com/gb/blog/135\\_basic-hotend-maintenance.html](https://filament2print.com/gb/blog/135_basic-hotend-maintenance.html)
- [13] FFF Printing: Direct Extrusion and Bowden Extrusion. In: *Blog.fabweaver.com* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://blog.fabweaver.com/fff-printing-direct-extrusion-bowden-extrusion-0>
- [14] CHAMBERLAIN, Ed. How to Design and Build a 3D Printer. In: *Instructables.com* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/How-to-Design-and-Build-a-3D-Printer/>
- [15] Types of 3D Printing : FFF, Most Popular 3D Printer. In: *Fabweaver.com* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://blog.fabweaver.com/3d-printing-method-fff-most-popular-3d-printer-0>
- [16] O'CONNELL, Jackson. Belt 3D Printer: All You Need to Know. In: *All3dp.com* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-belt-all-you-need-to-know/>
- [17] Prusa Tabulka Materiálů. In: *Help.prusa3d.com* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/cs/materials>
- [18] Guide to 3D Printing Materials: Types, Applications, and Properties. In: *Formlabs.com* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-materials/>
- [19] What's the ideal filament for FDM 3D printing? 3D printing materials compared. In: *Hubs.com* [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>
- [20] PLA: Materiálový slovník. In: *Materialpro3d.cz* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>

- [21] HOMOLA, Jan. PLA. In: *3d-tisk.cz* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/pla/>
- [22] Prusament PLA. In: *Prusament.com* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-pla/>
- [23] PLA. In: *Help.prusa3d.com* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/pla\\_2062](https://help.prusa3d.com/cs/article/pla_2062)
- [24] LANZOTTI, Antonio, Massimo MARTORELLI, Saverio MAIETTA, Salvatore GERBINO, Francesco PENTA a Antonio GLORIA. A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA. *Procedia CIRP* [online]. 2019, **79**, 143-146 [cit. 2023-03-27]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2019.02.030
- [25] PET, PET-G: Materiálový slovník. In: *Materialpro3d.cz* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pet-g/>
- [26] Prusament PETG. In: *Prusament.com* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>
- [27] ABS: Materiálový slovník. In: *Materialpro3d.cz* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>
- [28] ABS. In: *Help.prusa3d.com* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/abs\\_2058](https://help.prusa3d.com/cs/article/abs_2058)
- [29] Žlutozelená EasyABS tisková struna (filament) 1kg. In: *Prusa3d.com* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/zlutozelena-easyabs-tiskova-struna-filament-1kg/>
- [30] PC: Materiálový slovník. In: *Materialpro3d.cz* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pc/>
- [31] PC filamenty, polykarbonát. In: *Eshop.sharplayers.cz* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://eshop.sharplayers.cz/polykarbonat-pc-filament>

- [32] Prusament PC Blend Natural 970g. In: *Prusa3d.com* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/prusament-pc-blend-natural-970g/#about-pc-blend>
- [33] Prusament PC Blend. In: *Prusament.com* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-pc-blend/>
- [34] How do you design snap-fit joints for 3D printing?. In: *Hubs.com* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-snap-fit-joints-3d-printing/>
- [35] 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. 2023-03-27]. ISSN 26666820. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcomc.2020.100076
- [36] WU, Wenzheng, Peng GENG, Guiwei LI, Di ZHAO, Haibo ZHANG a Ji ZHAO. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials* [online]. 2015, **8**(9), 5834-5846 [cit. 2023-03-27]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma8095271
- [37] MOHAMED, Omar Ahmed, Syed Hasan MASOOD, Jahar Lal BHOWMIK, Mostafa NIKZAD a Jalal AZADMANJIRI. Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2016, **25**(7), 2922-2935 [cit. 2023-03-27]. ISSN 1059-9495. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-016-2157-6
- [38] LUBOMBO, Christian a Michel A. HUNEAULT. Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts. *Materials Today Communications* [online]. 2018, **17**, 214-228 [cit. 2023-03-27]. ISSN 23524928. Dostupné z: doi:10.1016/j.mtcomm.2018.09.017
- [39] What is Infill in 3D Printing – Detailed Guide 2021. In: *Robu.in* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://robu.in/infill-in-3d-printing-explained/>

- [40] ZAMAN, Uzair Khaleeq uz, Emilien BOESCH, Ali SIADAT, Mickael RIVETTE a Aamer Ahmed BAQAI. Impact of fused deposition modeling (FDM) process parameters on strength of built parts using Taguchi's design of experiments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2019, **101**(5-8), 1215-1226 [cit. 2023-03-27]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-018-3014-6
- [41] MISHRA, Swayam Bikash, Rameez MALIK a S. S. MAHAPATRA. Effect of External Perimeter on Flexural Strength of FDM Build Parts. *Arabian Journal for Science and Engineering* [online]. 2017, **42**(11), 4587-4595 [cit. 2023-03-27]. ISSN 2193-567X. Dostupné z: doi:10.1007/s13369-017-2598-8
- [42] Maximální objemová rychlost. In: *Help.prusa3d.com* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/maximalni-objemova-rychlost\\_127176](https://help.prusa3d.com/cs/article/maximalni-objemova-rychlost_127176)
- [43] PANDZIC, Adi, Damir HODZIC a Aleksa MILOVANOVIC. Influence of Material Colour on Mechanical Properties of PLA Material in FDM Technology. In: KATALINIC, Branko, ed. *Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium 2019* [online]. DAAAM International Vienna, 2019, s. 0555-0561 [cit. 2023-04-01]. DAAAM Proceedings. ISBN 9783902734228. Dostupné z: doi:10.2507/30th.daaam.proceedings.075
- [44] DVOŘÁK, Milan a Michaela MAREČKOVÁ. TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ. In: *Vutbr.cz* [online]. Brno [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/technologie\\_tvareni/index.htm](https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/technologie_tvareni/index.htm)
- [45] LENFELD, Petr. Technologie tváření kovů. In: *Ksp.tul.cz* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/index.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm)
- [46] JANČÁŘ, Josef a Eva NEZBEDOVÁ. *Zkoušení plastů*. 11-12. Dostupné z: doi:978-80-214-3452-3
- [47] KLEMENT, Richard. Statické tlakové zkoušky plastů. In: *Techportal.cz* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/staticke-tlakove-zkousky-plastu-uniqueidmRRWSbk196FNf8->

jVUh4EqQUkSFod1GxtErmqGM8rN0//33/staticke-tlakove-zkousky-plastu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1GxtErmqGM8rN0/

- [48] ČSN EN 10346. *Kontinuálně žárově ponorem povlakované ocelové ploché výrobky pro tváření za studena* - Technické dodací podmínky. 2016.
- [49] JANŮ, Jan. *Návrh jednoduchých 3D tištěných lisovacích nástrojů*. Praha, 2022. Diplomová práce. ČVUT Fakulta Strojní. Vedoucí práce Vít Novák.
- [50] In: [Imgur.com](https://imgur.com/u7QFTYI) [online]. [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://imgur.com/u7QFTYI>
- [51] CoreXY Kinematics. In: [3ddistributed.com](https://3ddistributed.com/corexy-3d-printer/corexy-kinematics/) [online]. [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://3ddistributed.com/corexy-3d-printer/corexy-kinematics/>
- [52] Dragonfly Hotend BMO. In: [3djake.cz](https://www.3djake.cz/phaetus/dragonfly-hotend-bmo?fbclid=IwAR0LE0NktW_0rKSS9O7bhPSHumLOOpPFWCjdBV64RUqRlYD8NUwoUU_c2tc&sai=9541) [online]. [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: [https://www.3djake.cz/phaetus/dragonfly-hotend-bmo?fbclid=IwAR0LE0NktW\\_0rKSS9O7bhPSHumLOOpPFWCjdBV64RUqRlYD8NUwoUU\\_c2tc&sai=9541](https://www.3djake.cz/phaetus/dragonfly-hotend-bmo?fbclid=IwAR0LE0NktW_0rKSS9O7bhPSHumLOOpPFWCjdBV64RUqRlYD8NUwoUU_c2tc&sai=9541)

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Porovnání konvenční a nekonvenční technologie z ekonomického hlediska [2].....	11
Obrázek 2 Přehled aditivních technologií [3] .....	12
Obrázek 3 Princip FDM (FFF) technologie [7] .....	13
Obrázek 4 Jedno z možných rozdělení 3D tiskáren [8] .....	14
Obrázek 5 Kartézská 3D tiskárna [9].....	14
Obrázek 6 Složení hotendu [12].....	16
Obrázek 7 Direct a bowden extruder [13].....	17
Obrázek 8 Cube konstrukce kartézské 3D tiskárny [14].....	17
Obrázek 9 Princip karézské tiskárny (vlevo) a delta tiskárny (vpravo) [10] .....	18
Obrázek 10 Typy FDM 3D tiskáren [15].....	19
Obrázek 11 Blackbelt pásová tiskárna [16] .....	19
Obrázek 12 Vlastnosti tiskových materiálů [19].....	20
Obrázek 13 Vlastnoti materiálu PETG Prusament [26].....	22
Obrázek 14 Klady a zápory materiálu ABS [29] .....	23
Obrázek 15 Výhody a nevýhody materiálu PC [33].....	24
Obrázek 16 Vliv tiskové teploty na pevnost v tahu [35].....	28
Obrázek 17 Testované výšky vrstvy za použití materiálu PEEK [36].....	29
Obrázek 18 Typy vzorů infillu [39] .....	29
Obrázek 19 Vliv rychlosti tisku na pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu [35] .....	31
Obrázek 20 Vliv barvy filamentu na mechanické vlastnosti vytištěného tělesa [43] .....	32
Obrázek 21 Ohyb plechu do tvaru V [45].....	34
Obrázek 22 Schéma neutrální osy [45] .....	34
Obrázek 23 Směr vláken materiálu a volba vhodné orientace [45] .....	35
Obrázek 24 Standardizované vzorky pro tlakovou zkoušku [46] .....	36
Obrázek 25 Průběh zkoušky tlakem u houževnatého (a) a křehkého (b) vzorku [47] .....	37
Obrázek 26 Typy infillů (zleva cubic, gyroid, triangle, mřížka) .....	39
Obrázek 27 Vliv typu 20% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PLA..	40
Obrázek 28 Vliv typu 40% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PLA..	40



Obrázek 29 Vliv typu 60% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PLA..	41
Obrázek 30 Vliv typu 80% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PLA..	42
Obrázek 31 Vliv typu 20% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PET-G	42
.....	42
Obrázek 32 Vliv typu 40% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PET-G	43
.....	43
Obrázek 33 Vliv typu 60% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PET-G	44
.....	44
Obrázek 34 Vliv typu 80% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu PET-G	44
.....	44
Obrázek 35 Vliv typu 20% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu ABS .	45
Obrázek 36 Vliv typu 40% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu ABS .	46
Obrázek 37 Vliv typu 60% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu ABS .	46
Obrázek 38 Vliv typu 80% infillu na velikost zatěžující síly u materiálu ABS .	47
Obrázek 39 Vliv typu 20% infillu na velikost zatěžující síly .....	47
Obrázek 40 Vliv typu 40% infillu na velikost zatěžující síly .....	48
Obrázek 41 Vliv typu 60% infillu na velikost zatěžující síly .....	48
Obrázek 42 Vliv typu 80% infillu na velikost zatěžující síly .....	49
Obrázek 43 Vliv typu 100% infillu na velikost zatěžující síly .....	49
Obrázek 44 Nástroj pro dvojitý ohyb.....	51
Obrázek 45 Upravený nástroj .....	51
Obrázek 46 Upnutí prototypového nástroje .....	52
Obrázek 47 Deformace nástrojů s 20 % infillem. Nahoře infill typu mřížka, dole infill typu triangle.....	53
Obrázek 48 Nástroj nesoucí známky použití .....	53
Obrázek 49 Deformace nástroje s infillem typu triangle .....	54
Obrázek 50 Deformace nástroje s infillem typu mřížka .....	54
Obrázek 51 Nástroj pro lisování příruby [49].....	55
Obrázek 52 Geometrie výlisku [48].....	55
Obrázek 53 Upravený nástroj se středícím kamenem.....	56
Obrázek 54 Otlacení nástroje vlivem krátkého středícího kamene.....	57
Obrázek 55 Zjištění průhybu plechu a polohy nástroje pro zjištění potřebné délky kamene dle numerické simulace .....	57
Obrázek 56 Nastavení typu a velikosti sítě pro daný polotovár .....	58

Obrázek 57 Upravený nástroj .....	59
Obrázek 58 Lisování plechu .....	59
Obrázek 59 Vylisované plechy .....	60
Obrázek 60 Nástroj po vylisování 20 ks plechů .....	60
Obrázek 61 Konstrukce tiskárny Mercury One .....	62
Obrázek 62 Lineární vedení na Mercury One [50] .....	63
Obrázek 63 Schéma vedení řemenů u CoreXY [51].....	64
Obrázek 64 Dragonfly hotend [52] .....	65
Obrázek 65 Tisková hlava StealthBurner .....	66
Obrázek 66 Uživatelské rozhraní Mainsail.....	67
Obrázek 67 Vytisknutý dvouřadý nástroj na tiskárně Mercury One.....	67
Obrázek 68 Dvouřadý nástroj .....	68
Obrázek 69 Řez dvouřadým nástrojem.....	69
Obrázek 70 Část dvouřadého nástroje .....	69
Obrázek 71 Výkres horního a spodního nástroje .....	70

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Vliv recyklace na smykovou pevnost [24].....	21
Tabulka 2 Srovnání materiálů PLA, PET-G a ABS [22] [26] [29].....	26
Tabulka 3 Mechanické vlastnosti HX180BD dle ČSN EN 10 346 [48].....	50
Tabulka 4 Chemické složení HX180BD dle ČSN EN 10 346 [48] .....	50
Tabulka 5 Mechanické vlastnosti DC01 dle ČSN EN 10 130 [48] .....	50
Tabulka 6 Chemické složení DC01 dle ČSN EN 10 130 [48].....	51