

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**Wohlrab  
Alex**

**2022**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Wohrab** Jméno: **Alex** Osobní číslo: **492452**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojírenského inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh jednoduchého 3D tištěného ohýbacího nástroje**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design of a simple 3D printed bending tool**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je pro zadaný výlisek navrhnout konstrukční řešení nástroje, který bude následně vyroben metodou 3D tisku. Lisovatelnost bude poté ověřena pomocí navrženého nástroje.

- 1) Seznámení s problematikou výroby výlisků a metodami 3D tisku
- 2) Návrh přípravku pro ruční ohýbání plechů
- 3) Ověření funkčnosti navrženého řešení
- 4) Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Literatura:  
ASM Handbook 14B  
Základy 3D tisku  
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

**Ing. František Tatiček, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS**

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

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2022**

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

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

# Anotace

<b>Název bakalářské práce:</b>	Návrh jednoduchého 3D tištěného nástroje
<b>Autor práce:</b>	Alex Wohlrab
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Vít Novák
<b>Konzultant:</b>	Ing. František Tatíček, Ph.D.
<b>Akademický rok:</b>	2021/2022
<b>Vysoká škola:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	12133 – Ústav strojírenské technologie
<b>Vedoucí ústavu:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Rozsah práce:</b>	53 stránek, 4 tabulky, 33 obrázků
<b>Klíčová slova:</b>	3D tisk, plošné tváření plechů, ohýbání, FFF tisk, PLA, návrh nástroje

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá technologií 3D tisku a jejím využitím pro ohýbací nástroje a pro běžné dílenské použití. Teoretická část popisuje metody 3D tisku, materiály používané technologií FFF, přípravu tisku, důležité parametry 3D tisku a pak se věnuje ohýbání. Experimentální část je zaměřena na návrh a zkoušku ohýbacího nástroje. Cílem této práce je ověřit funkčnost navržených nástrojů. Výsledkem práce jsou samotné navržené nástroje, prohloubení znalostí o možných problémech spojených s použitím plastových ohýbacích nástrojů a naznačení směru dalšího vývoje těchto nástrojů.

# Annotation

<b>Title of the bachelor's thesis:</b>	Design of a simple 3D printed bending tool
<b>Author:</b>	Alex Wohlrab
<b>Supervisor:</b>	Ing. Vít Novák
<b>Consultant:</b>	Ing. František Tatíček, Ph.D.
<b>Academic year:</b>	2021/2022
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	12133 – Department of Manufacturing Technology
<b>Head of department:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Extent:</b>	53 pages, 4 tables, 33 pictures
<b>Keywords:</b>	3D printing, sheet metal forming, bending, FFF printing, PLA, tool design

## Abstract

This bachelor's thesis is about 3D printing technology and its use for bending tools and common workshop use. The theoretical part describes 3D printing methods, materials used by FFF technology, print preparation, important parameters of 3D printing and then focuses on bending. The experimental part is focused on the design and testing of a bending tool. The aim of this work was to verify the functionality of the designed tools. The results of the work are the designed tools themselves, advances in knowledge about possible problems associated with the use of plastic bending tools and an indication of the direction of further development of these tools.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma **Návrh jednoduchého 3D tištěného 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 děkuji panu Ing. Vítu Novákovi a panu Ing. Františku Tatíčkovvi Ph.D. za ochotu, vstřícnost a za cenné rady a připomínky při tvorbě této bakalářské práce.

# Obsah

1	Úvod .....	9
2	Metody 3D tisku .....	10
2.1	SLA.....	10
2.2	FFF/FDM .....	11
2.3	PBF .....	13
2.4	Ostatní metody 3D tisku .....	15
3	Materiály používané technologií FFF .....	17
3.1	PLA.....	17
3.2	Ostatní materiály.....	18
3.2.1	ABS, ASA.....	18
3.2.2	PETG .....	18
3.2.3	PC.....	18
3.2.4	Nylon.....	18
3.2.5	PP.....	19
3.2.6	Kompozity .....	19
3.2.7	Podpůrné materiály .....	19
3.2.8	Srovnání materiálů .....	19
4	Princip generování G-kódu.....	20
5	Parametry ovlivňující kvalitu 3D tištěných dílů .....	22
5.1	Orientace výtisku.....	22
5.2	Výška vrstvy .....	22
5.3	Množství a vzor výplně .....	23
5.4	Perimetry a plné vrstvy.....	27
5.5	Ostatní parametry a nastavení sliceru.....	27

5.6	Vady 3D tisku FFF tiskáren .....	28
6	Ohýbání .....	30
6.1	Obecné pojmy a mechanismy tváření.....	30
6.2	Volba a příprava polotovarů pro ohýbání.....	31
6.3	Druhy ohýbání .....	32
6.4	Teorie ohýbání.....	32
6.4.1	Deformace při ohybu.....	32
6.4.2	Fáze ohybu.....	33
6.4.3	Odpružení.....	34
6.4.4	Zbytková napětí při ohybu.....	35
6.4.5	Poloměry ohybu.....	35
6.4.6	Technologie ohýbání .....	36
7	Návrh ohýbacího nástroje .....	38
7.1	Modelování nástrojů.....	38
7.2	Tisknutí nástrojů .....	44
7.2.1	Mechanické zkoušky materiálů .....	44
7.2.2	Tiskové parametry nástrojů.....	48
7.3	Zkoušky nástrojů .....	51
7.3.1	Ohýbací nástroj č. 1 pro materiál EN AW 6063 .....	51
7.3.2	Ohýbací nástroj č. 2 pro materiál HX180BD .....	56
7.3.3	Destrukční zkoušky ohýbacího nástroje na tenký plech.....	59
8	Závěr.....	62
	Bibliografie .....	63
	Seznam tabulek .....	67
	Seznam obrázků .....	68
	Seznam příloh.....	69



# 1 Úvod

3D tisk je poměrně nová technologie, která stále může nacházet nové uplatnění. Častým uplatněním je prototypování nástrojů. Plastové nástroje vyráběné 3D tiskem zpravidla nepředstavují konečný nástroj pro výrobu. Pokud by ale takovéto nástroje vystačily, tak se výrazně sníží náklady na nástroje a potenciálně i časy do zavedení výroby. Vzhledem k jistým nevýhodám 3D tisku a nízké pevnosti a tuhosti plastů oproti ocelím tyto nástroje nikdy nebudou vhodné pro velké série výrobku. Tam, kde je ale důraz na flexibilní zakázkovou výrobu s nižšími nároky na přesnost by mohly tyto nástroje být přínosné. Tato práce je zaměřena na ohýbací nástroje, ale některé poznatky by se mohly aplikovat i na lisovací nástroje.

Výroba takto tisknutých nástrojů je velmi levná. Provozní náklady 3D tištěného nástroje jsou v porovnání s obráběným nástrojem několikanásobně menší. Je to z velké části dáno různými vlastnostmi materiálu, ale poskytuje to obrázek o potenciálních úsporách i za cenu případné častější výměny nástroje. 3D tisk umožňuje velkou svobodu v návrhu tvaru a spolu s možností rychlých iterací tvaru nástroje může tato metoda přinést nové možnosti v návrhu tvářecích nástrojů. 3D tisk samotný také nevyžaduje stálou obsluhu. Toto využití 3D tisku je poměrně nové a není mimo prototypy v praxi moc používané. Navíc se většinou jedná o nástroje tisknuté selektivním spékáním kovového prášku, což je poměrně náročná a nákladná technologie. Stejně jako u samotného 3D tisku je i v ohybu pomocí 3D tisknutých nástrojů prostor pro další výzkum. [1; 2]

Největší přínos této metody by měl být v dostupnosti tvářecí technologie. Typicky se totiž používá v hromadné výrobě. Pokud však někdo vlastní ve své dílně 3D tiskárnu pro její univerzální využití, tak si může vytisknout ohýbací nástroj, který například upne do svého svěráku a provede ohyb. Pak už je správný ohyb jen otázka zkušeností a zručnosti s touto metodou ohybu. Právě využití svěráku jako stroje pro provedení ohybu bylo v rámci této práce vyzkoušeno ve dvou zkouškách, pro které byly navrženy ohýbací nástroje. [1]

## 2 Metody 3D tisku

3D tisk může být založen na mnoha různých principech, které následně určují z technologického hlediska možnost materiálu, kvalitu, rychlost a přesnost výtisku. Z ekonomického hlediska pak investiční a provozní náklady a nároky na obsluhu a pracoviště. Mezi nejzákladnější principy patří fotopolymerizace světlocitlivé pryskyřice, extrudování materiálu či pojiva tiskovou hlavicí a postupné spékání nanesených vrstev prášku.

### 2.1 SLA

Aditivní technologie mají svůj původ v technice tzv. foto-glyfového záznamu, kdy se selektivně odhalují vrstvy průhledné emulze citlivé na světlo zatímco se snímají průřezy replikovaného objektu. Pokroky ve výpočtové technice, laserech a fotopolymerech umožnily vznik technologie stereolitografie (SLA), která funguje na podobném principu a nahradila zastaralý foto-glyfový záznam. SLA technologie jsou založeny na vytvrzování vrstvy fotopolymeru UV světlem. Po vytvrzení požadované vrstvy se podložka posune a proces se opakuje, dokud není objekt vytištěn. Podle způsobu ozařování tiskové vrstvy se stereolitografie dělí na SLA, DLP (digital light processing) a MSLA (mask stereolithography). [3; 4]

Při SLA technologii je objekt vytvrzován postupným vykreslováním laserovým paprskem. Paprsek laseru bývá veden zrcadly. Rychlost tisku je tedy velmi závislá na množství materiálu, který je potřeba ve vrstvách vytvrdit. Bývá to nejpřesnější a nejpomalejší metoda stereolitografie. Nicméně rozdíl v přesnosti často není značný a vývoj DLP tiskáren neustále zlepšuje jejich přesnost, některé pokročilé DLP tiskárny mohou být i přesnější než SLA tiskárny. Při DLP technologii se ozařuje projektorem najednou celá tisková vrstva. Výhodou je nezávislost rychlosti na počtu tištěných objektů a jejich ploše v tištěné vrstvě. Další výhodou je snížená náročnost údržby. DLP je méně komplikovaná technologie díky menšímu počtu pohyblivých částí a jednodušším komponentům. Běžné DLP tiskárny bývají přibližně dvakrát levnější. MSLA technologie je velmi podobná DLP s tím rozdílem, že osvit UV světlem je rovnoměrně zajištěn UV LED a přes masku

v podobě LCD displeje se UV záření selektivně propouští k tiskové vrstvě. Kvůli pixelovému rozlišení tisku by vznikali při DLP a MSLA technologii nežádoucí schodovité ostré hrany. Tento ostrý přechod se eliminuje antialiasingem. Pokud v rastu černá a bílá symbolizuje stav ozáření, tak antialiasing na hranách upraví jednotlivé pixely tak, aby jejich barvy odpovídali průměru barev v okolních pixelech. Hrana je tedy tvořena přechodem bílé, šedé a černé barvy. [4; 5]

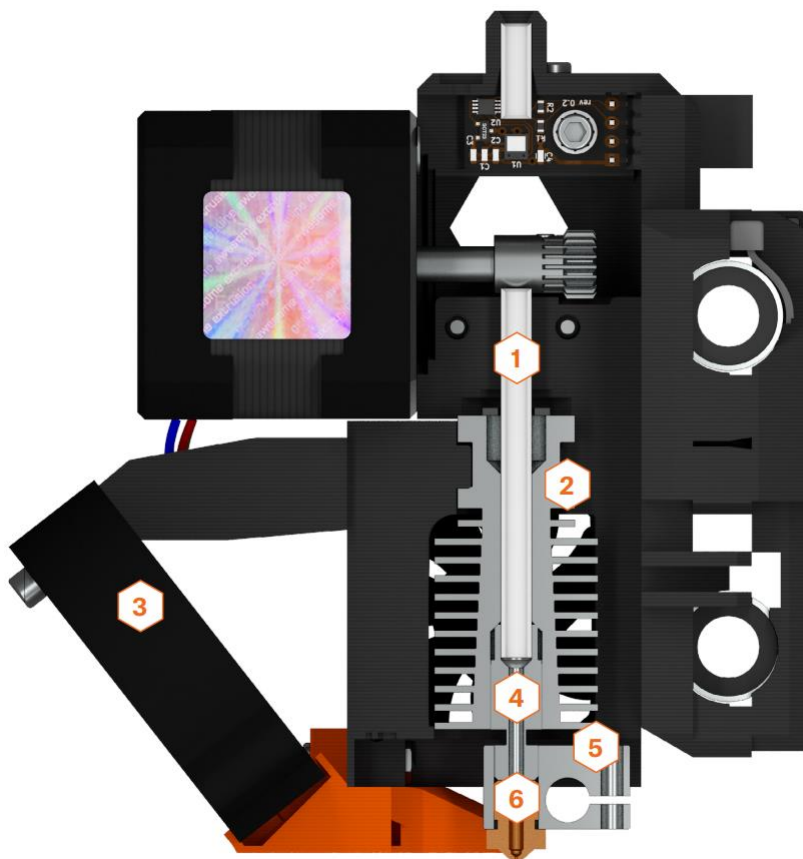
Rychlost tisku pro SLA technologii bývá ze všech metod 3D tisku nejpomalejší. Ale technologie DLP a MSLA mohou být několikanásobně rychlejší než SLA a mít vyšší rychlosti než jiné metody při stoprocentní výplni. Do času tisku je však nutné započítat potřebu následného zpracování specifického pro tuto technologii. Po tisku je potřeba vyčistit tištěný objekt od přebytečné pryskyřice v rozpouštědle. Pro tyto účely se používá například isopropylalkohol. Pro mechanicky namáhané díly bývá také potřeba dodatečného vytvrzování UV zářením. Toxicita pryskyřice je problematická. V průběhu tisku je potřeba zabránit možnosti vdechování výparů a styku s pokožkou. Tloušťka tištěných vrstev se pohybuje mezi 0,05 mm a 0,15 mm. [6; 7; 4; 5]

Stereolitografie je přesná metoda vytvářející hladký homogenní povrch, ale má vysoké provozní náklady. Nachází uplatnění především v medicíně a lékařství. Pro účely výroby lisovacího nástroje nebo jeho prototypu je však také použitelná. Bylo dokázáno, že výsledný nástroj je přesnější než při tisku technologií FFF za cenu vyšších nákladů a výrobního času. V kolmém směru na směr tisku se drsnosti obou metod pohybovaly okolo 0,8 Ra. Ve směru tisku se však drsnost lisovacího nástroje vyráběného stereolitografií pohybovala okolo 1,5 Ra kdežto drsnost lisovacího nástroje vyráběného metodou FFF se pohybovala okolo 3 Ra. [4; 8]

## 2.2 FFF/FDM

Nejrozšířenější metodou 3D tisku je technologie FFF (fused filament fabrication), někdy také nazývaná FDM (fused deposition modelling). FDM je obchodní známka firmy Stratasys, která má největší zastoupení na trhu s touto technologií. Technologie FFF je založena na tom, že se extruduje tisková struna (filament) tiskovou hlavou skrz rozeřátou trysku. Tisková hlava neboli extruder

sleduje naprogramovanou dráhu a postupně nanáší filament vrstvu po vrstvě. Samotný extruder se skládá z teflonové trubičky, která vede filament přes chladič, izolátor a heater block k trysce. Chladič a izolátor slouží ke zmenšení přechodné oblasti mezi pevným a roztaveným filamentem. Pro větší účinnost bývá na chladič montován ventilátor. V heater blocku je topné těleso a termistor pro zpětnou vazbu o aktuální teplotě. Podložka, na kterou se tiskne je už většinou vyhřívaná, aby se zabránilo kroucení. Novější podložky mohou mít na povrchu polyetherimidovou (PEI) fólii pro zajištění přilnavosti tisknutého objektu. Filament bývá nejčastěji průměru 1,75 mm. Výška vrstvy bývá 0,05 mm až 0,3 mm při běžném průměru trysky 0,4 mm. Rychlost tisku se obvykle pohybuje mezi 40 mm/s a 100 mm/s a liší se pro různé části tištěného objektu. [4; 7; 9]



Obrázek 1: Schéma trysky [4]

1 – Teflonová (PTFE) trubička, 2 – Chladič, 3 – Tiskový ventilátor, 4 – Izolátor,  
5 – Heater block, 6 – Tryska

Způsob pohybu v prostoru dělí tyto 3D tiskárny na několik typů. Kartézské mají svůj pohyb ve třech lineárních osách. Tisková hlava vytlačující materiál se pohybuje ve dvou osách (X,Z) a podložka zbývající ose (Y). Delta tiskárny využívají zavěšeného extruderu na třech ramenech, která jsou spolu spojená v místě tiskové hlavy. Výhodou jsou rychlejší pohyby a větší tiskový prostor především v ose Z. Tiskárna však vyžaduje velmi přesné sestavení a následnou kalibraci. Složitá kinematika vyžaduje náročné výpočty pro pohyby jednotlivých krokových motorů ramen. Polar tiskárny jsou méně používané systémy založené na polárním pohybu tiskové hlavy po dvou osách a rotační podložce. Tento systém je konstrukčně jednoduchý, ale příprava tisku je náročnější. [4]

Adheze mezi jednotlivými vrstvami je slabší než ve směru táhnutí struny. To vede k anizotropii mechanických vlastností. Při působení sil kolmo na jednotlivé vrstvy bude materiál vykazovat znatelně horší pevnostní charakteristiky. Návrh orientace tištěné součásti by měl tedy ideálně odpovídat směru zatížení. Tento efekt lze potlačit žíháním na teplotu skelného přechodu. Toto žíhání může také zlepšit teplotní odolnost a vyhlazuje povrch výtisku. Například u filamentu z PLA může být zvýšení teplotní odolnosti často žádané, jelikož má ze všech běžných filamentů teplotní odolnost nejmenší. Teplota skelného přechodu pro PLA je pouze 60 °C. Nad touto teplotou má materiál vlastnosti tekutiny a výtisk by se mohl deformovat i pod vlastní vahou. Po žíhání na teplotu 90°C bylo dosaženo v jednom experimentu zvýšení teploty skelného přechodu na 110 °C. To je zvýšení o 83% a prakticky eliminuje nevýhodu v teplotní odolnosti PLA. Nevýhodou je, že pokud se žíhání neprovede správně tak hrozí kroucení modelu a stažení v osách X a Y při roztažení v ose Z. Žíhání také vyžaduje, aby se objekty vytiskly s plnou výplní, protože jinak dochází k nepředvídatelným deformacím. [10; 4; 11]

## 2.3 PBF

Pod procesy PBF (powder bed fusion) spadá více technologií. Jejich společným znakem je tepelné zpracování rovnoměrně nanesených vrstev prášku koncentrovaným zdrojem energie. Prášek se buď sintroje nebo taví. Při sintrování probíhá spojení částic pomocí tepla a tlaku pod teplotou tavení. Samotný prášek

pak může být tvořen polymery, keramikou nebo kovy. Nejčastějším koncentrovaným zdrojem energie bývá laser. Metody využívající laser jsou SLS (selective laser sintering), DMLS (direct metal laser sintering), SLM (selective laser melting) a DMLM (direct metal laser melting). Tyto metody jsou velmi podobné. Metody DMLS a DMLM jsou oproti SLS a SLM specializované na kovové prášky. Kovové prášky mohou být například ze slitin titanu a hliníku, kobaltu a chromu nebo korozivzdorných ocelí. DMLS a SLS prášek sintrují a DMLM a SLM prášek taví. Samotný proces PBF technologií probíhá buď ve vakuu nebo v inertní atmosféře, aby se zabránilo oxidaci. [3; 4; 12] Při metodě EBM (electron beam melting) se taví prášek vysokoenergetickým svazkem elektronů. Je to sice dražší technologie, ale vytváří vrstvy rychleji a vnáší do tištěné součásti méně tepla, což má za následek menší sklon ke kroucení. [13] Tloušťka vrstvy bývá poměrně malá, a to od 0,06 mm do 0,15 mm. [7]

V následném zpracování součásti je potřeba důkladně odstranit nezpracovaný prášek. Pro namáhané součásti z kovu je vhodné použít tepelné zpracování ve vakuové či inertní peci dle specifik použitého materiálu. Tepelné zpracování snižuje vnitřní tepelné napětí způsobené při tisku. Také zlepšuje mechanické vlastnosti. Tepelné zpracování by mělo probíhat před odejmutím tištěné součásti od podložky, aby se zabránilo kroucení. Stejně jako u technologie FFF zde dochází k pórovitosti. Ke zmenšení pórovitosti a následnému zlepšení mechanických vlastností lze využít izostatického lisování za tepla. Odejmutí od podložky může být realizováno odseknutím dlátem nebo odřezáním. Poté následuje případná úprava povrchu. [14]

Hlavní výhodou těchto technologií je možnost tisknout kovy. Na rozdíl od technologií SLA, FFF není potřeba u PBF procesů vytvářet podpůrné struktury při převisech, protože jako podpora funguje nevyužitý prášek v předešlých vrstvách. To umožňuje snazší optimalizaci topologie nástroje, a tedy rychlejší a levnější tisk nástroje. Nevyužitý materiál lze snadno recyklovat. Hlavní nevýhodou je cena tiskáren a materiálu. Mají také relativně malý tiskový prostor. PBF procesy nachází uplatnění například v letectví, medicíně a zubní lékařství. [15] V kontextu lisovacího nástroje je vhodné využít 3D tisk kovu v automobilovém průmyslu, kde

bývá důraz na zkrácení času do uvedení na trh. Oproti konvenčním metodám je to mnohem nákladnější metoda, ale výrazně snižuje dodací dobu nástroje. Dodací doba je přibližně o 35% kratší než druhý nejrychlejší způsob. Navíc aditivní technologie vyžadují málo operací, to snižuje interní procesní logistiku. Takto tisknuté díly jsou výkonově srovnatelné s těmi konvenčně vyráběnými. [16]

## 2.4 Ostatní metody 3D tisku

Z ostatních metod 3D tisku je z hlediska návrhu lisovacího nástroje asi nejvýznamnější technologie LOM (laminated object manufacturing). Ta spočívá v postupném nanášení fólií ořezaných laserem či nožem tak, aby jednotlivé vrstvy odpovídaly odpovídajícím průřezům. Jednotlivé vrstvy jsou lepeny či ultrazvukově svařeny. [13; 3]

Mezi další metody patří DED (directed energy deposition), kdy se kovový prášek či tenký drát dodává do ohniska koncentrovaného energetického paprsku k vytvoření tavné lázně. Proces je vlastně trojdimenzionální svařování. Tato metoda se spíše používá k opravě a údržbě. [3; 12]

Dále existují technologie BJ (binder jetting) a MJ (materiál jetting) které tisknou pojivo či materiál podobným způsobem jako v klasických 2D tiskárnách tisknoucí na papír. Po vytisknutí vrstvy se podložka posune dolů. MJ technologie k tisku používají fotopolymery či vosk. BJ technologie pojivem lepí polymerový, keramický nebo kovový prášek [3] U BJ technologie je potřeba následného zpracování. Nabízí se například možnost sintrace v peci ke zvýšení mechanických vlastností při lepení kovového prášku, nebo prosycení dodatečným pojivem jiného typu. [13]

Pomyslným mostem mezi technologiemi FFF a SLM jsou technologie EAM (extrusion-based additive manufacturing) pro kovy. Ta spočívá ve vytlačování kovového nebo keramického materiálu ve formě pevného prášku smíchaného s pojivem (tj. postradatelnou viskózní tekutinou), které se z dílu odstraní po 3D tisku. Tato technologie má výhodu z hlediska nákladů oproti alternativním procesům aditivní výroby kovových dílů, které jsou založeny na vysokoenergetických paprscích. Extrudování kovových past se sice zařazuje pod FDM, ale proces vyžaduje specializovanou tiskárnu. Mechanismus podávání vláken

v FDM (FFF) omezují použití materiálů s nízkou viskozitou kvůli nestabilitě proudění vyvolané vybočením a zpětným tokem. Aby se předešlo těmto problémům a zlepšila se spolehlivost kontinuálního tisku, byly vyvinuty vytlačovací systémy na bázi šroubů a pístů. V následném zpracování je nutné odstranit pojivo. To bývá nejdražší a časově nejnáročnější fáze tisku. Pojivo se odstraňuje prvně pomocí rozpouštědla a pak tepelně. Dále se výtisk sintruje. Při sintraci se kvůli velkému obsahu pojiva výrazně mění objem výtisku, což komplikuje dosažitelnost rozměrových tolerancí. Aditivní technologie na principu extruze pro kovy ještě nejsou moc rozšířené a prozkoumané oproti extrudování plastů a spékání prášku. [17]

Pro návrh lisovacího nástroje bude dále v této práci zaměřeno na technologii FFF. Tuto technologii lze zavést levně a snadno. Je tedy vhodná pro malosériovou výrobu či prototypování.



### 3 Materiály používané technologií FFF

Jednou z velkých výhod FFF je velké množství dostupných filamentů, které se výrazně liší svými mechanickými, technologickými i estetickými vlastnostmi. Z hlediska lisovacího nástroje je důležitá tuhost, pevnost, přesnost a stálost rozměrů, tisknutelnost, a odolnost vůči opotřebení. Oproti konvenčním kovovým lisovacím nástrojům lze obecně říct, že tyto polymerní nástroje mají výrazně menší tuhost. To vede k nepřesnostem ve výlisku způsobených elastickou deformací. Tyto nepřesnosti jsou však opakovatelné a dají se tedy různými způsoby kompenzovat. Polymerní nástroje naopak mají tu výhodu, že výlisek má lepší kvalitu povrchu. To je způsobeno tím, že je mnohem méně pravděpodobné, že by byl výlisek poškrábán polymerními nástroji. Při uvádění jakýchkoliv materiálových dat je potřeba mít na paměti, že jsou spíše orientační. Mechanické vlastnosti jsou vysoce závislé na parametrech a podmínkách tisku a každý výrobce může mít jiné složení příměsí ve filamentu. Tyto skutečnosti omezují spolehlivost a srovnatelnost dostupných dat mezi různými výrobci. [18]

#### 3.1 PLA

PLA (kyselina polymléčná) je asi nejpoužívanější filament do FFF tiskáren. Je to jeden z nejlevnějších materiálů. Ceny se pohybují od 400 do 900 Kč/kg. Dále má PLA malý sklon k tvorbě vad tisku. Ve srovnání s ostatními materiály má malou teplotní roztažnost. Proto se tisk nekroučí a nemá tendenci odlepovat se od podložky či praskat. Tisk nepotřebuje vyhřívanou podložku a nemá problém s přilnavostí k povrchu. Při tisku typicky nevzniká zápach. PLA je tvrdé a křehké. Ze všech běžných filamentů je dokonce nejkřehčí. Tato vlastnost omezuje použití PLA v mechanických dílech nejvíce. Razová houževnatost dle Charpyho se pohybuje okolo 14 kJ/m<sup>2</sup>. Při lisovacím procesu by však k nárazům docházet nemělo a materiál je na svou cenu relativně pevný a velmi tuhý. Pevnost v tahu se udává od 40 do 65 MPa. Modul pružnosti se pohybuje okolo 2,3 GPa. PLA má velmi špatnou teplotní odolnost. Nehodí se do pracovních podmínek nad 50 °C. Při broušení je potřeba PLA chladit, jinak hrozí lokální natavení. PLA se vyrábí z rostlinných produktů a je do jisté míry šetrnější k životnímu prostředí než

mnoho jiných filamentů 3D tiskáren. Za určitých komerčně dosažitelných podmínek je biologicky rozložitelné. Je dostupné i recyklované PLA jehož pevnost je o pár jednotek MPa nižší, což je téměř zanedbatelný pokles. PLA je možno recyklovat dvakrát bez významných změn mechanických vlastností. Pak je už pokles výrazný a zároveň se zvyšuje variabilita hodnot. [4; 19; 20; 21; 22; 23]

## **3.2 Ostatní materiály**

### **3.2.1 ABS, ASA**

ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) je nejstarším filamentem. Oproti PLA je méně pevný a tuhý, ale mnohem lépe odolává dynamickým účinkům sil. Hůře se z něho tiskne kvůli větší tepelné roztažnosti materiálu. K tisku je tedy třeba vyhřívané podložky a někdy se používají také různé dodatečné tiskové techniky pro snížení pravděpodobnosti výskytu vad. ASA (Akrylonitril styren akrylát) je nástupcem ABS. Má menší teplotní roztažnost a tiskne se tedy lépe a je UV stabilní. Při tisku z ABS a ASA vzniká poměrně silný zápach a je tedy potřeba mít zakrytovaný tiskový prostor nebo dobré větrání při tisku. Ceny ABS jsou srovnatelné s PLA. ASA je trochu dražší. [4; 24; 19]

### **3.2.2 PETG**

V náročnosti tisku a v křehkosti se PETG (kopolyester) pohybuje mezi PLA a ABS/ASA. Tuhost je podobná ABS a pevnost je podobná PLA. PETG absorbuje poměrně hodně vlhkosti, která negativně ovlivňuje tisknutelnost. Z toho vyplývají nároky na skladování v suchu. Cena je srovnatelná s PLA. [4; 21]

### **3.2.3 PC**

PC (polykarbonát) je pevný, tuhý materiál, který je odolný jak vlivům teploty, tak rázům. Nevýhodou je cena, která je oproti PLA téměř dvojnásobná. Stejně jako PETG by měl být PC skladován v suchu pro lepší kvalitu tisku. [19; 25]

### **3.2.4 Nylon**

Nylon je odolný a pevný materiál s vysokou adhezí mezi vrstvami. Je odolný vůči tření, ale absorbuje vzdušnou vlhkost, což má negativní vliv na tisk. [4]

### 3.2.5 PP

PP (Polypropylen) má vyšší tepelnou odolnost než ABS nebo PLA. Je chemicky odolný a pružný. Mívá ale problémy s přilnavostí k tiskové podložce. [4]

### 3.2.6 Kompozity

Použít se dají mimo plasty pro tiskové struny kompozity. Typicky se skládají z plastové matrice s výztuhou ve formě uhlíkových vláken. Filament je velmi drahý ale má vynikající vlastnosti pro dynamicky namáhané součásti. [26]

### 3.2.7 Podpůrné materiály

Při tisku převisů jsou potřeba podpory. Ty mohou být ze stejného materiálu jako výtisk, nebo mohou být z materiálu, který lze snadno rozpustit. Tímto způsobem bude povrch tisku kvalitnější a je možné tisknout komplexnější geometrii. Obecně jsou tyto materiály mnohonásobně dražší a vyžadují tiskárnu s možností tisku více filamentů. Je tedy žádoucí vyhnout se nutnosti jejich použití. Mezi tyto materiály patří například PVA a BVOH, které se hodí ve spojení s PLA a jsou rozpustné ve vodě, nebo HIPS, který je vhodný ve spojení s ABS a je rozpustný lemonsolím. [4; 19]

### 3.2.8 Srovnání materiálů

V následující tabulce jsou porovnána vybraná data pro různé materiály z materiálových listů od výrobce filamentů Prusament. PC Blend je směs polykarbonátu. PC Blend Carbon Fiber je tato směs polykarbonátu s příměsí uhlíkových vláken. Mechanické vlastnosti jsou měřeny na tisknutých vzorcích při orientaci na plochu s plnou přímočarou výplní. [24; 25; 26; 27; 20]

Tabulka 1: Srovnání filamentů

Název materiálu	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Cena za kilogram
PLA	51 ± 3	2,3 ± 0,1	83 ± 6	700 Kč
PETG	47 ± 2	1,5 ± 0,1	66 ± 2	700 Kč
ASA	42 ± 1	1,6 ± 0,1	64 ± 1	820 Kč
PC Blend	63 ± 1	1,9 ± 0,1	88 ± 1	1440 Kč
PC Blend Carbon Fiber	55 ± 4	2,3 ± 0,1	85 ± 1	1880 Kč

## 4 Princip generování G-kódu

G-kód je v případě FFF tiskárny soubor instrukcí pro pohyb tiskárny. Zároveň obsahuje informace o požadovaném nastavení teplot, chlazení, rychlosti podávání filamentu a dalších nastaveních. G-kód je specifický pro konkrétní typ tiskárny.

Prvním krokem k získání G-kódu je získání 3D modelu pro tisk. Obecně lze stáhnout hotový model z internetu, použít nějakou metodu 3D skenování nebo vymodelovat vlastní model. Modelování vlastního modelu je pro účely této práce nejrelevantnější. Pro modelování lze využít širokou škálu programů. Nejjednodušším způsobem, jak rychle získat jednoduchý model je použití webové aplikace jako je Tinkercad. Pro složité umělecké tisky je vhodný Blender a v programu OpenSCAD se modeluje parametricky pomocí zdrojového kódu. Pro návrh ohybového nástroje jsou ale nejvhodnější profesionální CAD programy umožňující intuitivní parametrické modelování jako je Autodesk Fusion 360 nebo Autodesk Inventor Professional. Po vymodelování se model exportuje do souboru ve formátu STL. STL je zkratka pro Standard Tessellation Language. Soubor STL ukládá model jako sadu rozličných trojúhelníků představujících vodotěsnou trojúhelníkovou síť pro hranici modelu. Během výpočtu této trojúhelníkové sítě se mohou u složitějších modelů vyskytnout problémy způsobeny numerickou chybou. Příkladem chyb jsou třeba mezery, průniky sítě se sebou, trhliny a zdeformované trojúhelníky. V posledních letech bylo navrženo použití mnoha přístupů používající objemovou reprezentaci modelu. Nejjednodušší objemová reprezentace je založená na voxelu. Hlavním problémem této reprezentace je obrovská spotřeba paměti. Objemová reprezentace je zatím spíše záležitostí výzkumu. [4; 3]

STL soubor se poté importuje do programu, kterému se říká slicer. Tento program nařezá (naslicuje) model na jednotlivé vrstvy podle nastavení tisku a vytvoří G-kód pro tyto vrstvy. Slicer pracuje už i s plochou tiskárny, takže mimo parametry tisku určuje i polohu tisknutého objektu. Dále se v něm nastavují pomocné struktury jako jsou například podpěry, obrys nebo límec. Ve sliceru je

také většinou možné měnit měřítko modelu, otáčet kolem os a řezat či rozdělovat na více objektů. Některé slicery mohou pracovat i s jinými typy souborů jako jsou OBJ, AMF, 3MF nebo Prusa soubory. Většina slicerů je zdarma. Nejpoužívanější slicery jsou Slic3er, Simplify3D a Cura. V Česku je oblíbený program PrusaSlicer, který je založený na programu Slic3r. Jelikož je pro slicování každou tiskárnu specifické tak existují hotové a odladěné tiskové profily se základním nastavením. Podle toho, od jakého výrobce je uživatelem zakoupena 3D tiskárna se většinou odvíjí použitý slicer, protože většina výrobců má svůj slicer do kterého dodává profily pro své tiskárny. [4]

## 5 Parametry ovlivňující kvalitu 3D tištěných dílů

Kvalita a doba tisku je ovlivněna nejen použitou technologií a materiálem, ale i mnoha parametry tisku. Obecně se parametry nastavují ve sliceru. Kromě těchto nastavení má na tisk ještě vliv průměr použité trysky. Ten má vliv na použitelnou výšku vrstvy a šířku perimetrů. Větší průměr trysky často znamená rychlejší a hrubější tisk. Větší tryska také zlepšuje mechanické vlastnosti a téměř eliminuje riziko ucpání. Nejčastěji se používá tryska o průměru 0,4 mm. Dále jsou časté trysky o průměru 0,6 mm a 0,25 mm. Menší průměry trysek jsou určeny spíše pro šperky a jiné drobné tisky. [4]

### 5.1 Orientace výtisku

Kvůli anizotropii mechanických vlastností je při použití technologie FFF vhodné dbát na orientaci tisku. Mez kluzu se u PLA sníží o přibližně 30% a to už je znatelný rozdíl. Dále orientace tisku může vyžadovat tisk podpěr, což se projeví na době tisku a kvalitě ploch pod podporami. Plochy, které by při tisku v kontaktu s podložkou, mají velmi hladký, lesklý povrch. Obvod děr a jiných zakřivených útvarů, které nemají svou osu rovnoběžnou s osou tisku budou mít schodovitou strukturu a hrozí nutnost použití podpěr. Tato schodovitá struktura je tím výraznější, čím je šířka vrstvy větší. Při tlakovém namáhání by tato schodovitá struktura byla silněji opotřebována a zvýšil by se rozptyl v přesnosti ohýbaní. U lisovacího nástroje je to nevyhnutelné. U ohýbacího nástroje však lze tento problém díky neměnnému profilu v jednotlivých vrstvách eliminovat vhodnou orientací výtisku. V každé vrstvě by byl navrhnutý profil nástroje tisknut z boku. Tím se může zároveň vyhnout namáhání v ose tisku. Neměnný profil však výrazně omezuje flexibilitu v konstrukci nástroje, která je předností 3D tisku. Je tedy na uvážení konstruktéra, jestli vliv orientace bude respektovat. [4; 20]

### 5.2 Výška vrstvy

Čím je výška vrstvy vyšší, tím více jsou jednotlivé vrstvy patrné. Nejvíce je to viditelné na plochách, které jsou skoro rovnoběžné s tiskovou plochou. Nejběžnější výškou vrstvy je 0,15 mm. Neměla by být vyšší než 75% průměru

trysky. Nižší vrstvy se často volí proto, aby se dosáhlo detailnějšího výtisku, ale současně s tím se prodlužuje tiskový čas. Pro návrh ohýbacího stroje je však důležitější, že u FFF vedou tenčí vrstvy ke zlepšení adheze vrstev k sobě a zvýšení hustoty částí. Teplo z trysky je totiž blíže k předchozí vrstvě a tím pomáhá vrstvám k silnějšímu spojení. Snížením tloušťky vrstvy by se také měla snížit tvorba větších dutin, které negativně ovlivňují adhezi vrstvy a tím i pevnost nástroje. Nicméně tenké vrstvy velmi výrazně prodlužují dobu tisku. [4; 8]

### 5.3 Množství a vzor výplně

Množství výplně výrazně ovlivňuje dobu tisku, pevnost výtisku a spotřebu filamentu. Nastavuje se procentuální hodnotou – 0% pro duté objekty a 100% pro úplné vyplnění. Více materiálu povede k obecně výrazně lepším mechanickým vlastnostem výtisku. Čím vyšší je množství výplně, tím je také větší spojovací plocha mezi vrstvami. Větší spojovací plocha vede ke zvýšení adheze mezi vrstvami, což snižuje pravděpodobnost delaminace a lomu a podporuje pevnost součásti. V oblasti mezi dutým a plně vyplněným objektem je možné dát výplni různé vzory, které mají vliv na mechanické vlastnosti a dobu tisku. Pro plně vyplněný objekt se používá přímočará výplň. Množství výplně hraje v pevnosti, ekonomice a rychlosti výtisku nejdůležitější roli a rozděluje výtisky na pohledové a funkční. [4; 8]

Nezákladnějším dělením vzorů výplně by mohlo být dělení na 2D a 3D výplně. 3D výplně mají obecně na rozdíl od 2D výplní stejné vlastnosti ve všech směrech. To je dělá vhodnější pro většinu mechanických dílů kvůli vzniku prostorové napjatosti součásti. Dalším rozdělením je účel výplně, kterým bývá pevnost, rychlost tisku nebo ohebnost. U 2D výplní je typickou výplní pro pevnost mřížková výplň, pro rychlost přímočará výplň a pro ohebnost koncentrická výplň. Z hlediska návrhu ohýbacího nástroje jsou nejvýznamnější vzory výplně typu: přímočará, hvězdy (tri-hexagonální), mřížka, trojúhelníky, plástev, kubická a gyroid.

Přímocará výplň se skládá z vrstev vodorovných čar. Všechny čáry ve stejné vrstvě mají stejný směr, ale úhel mezi čarami následujících vrstev je 90 stupňů. Jinými slovy, tyto vodorovné čáry jsou vytištěny střídavě podél osy X a osy Y

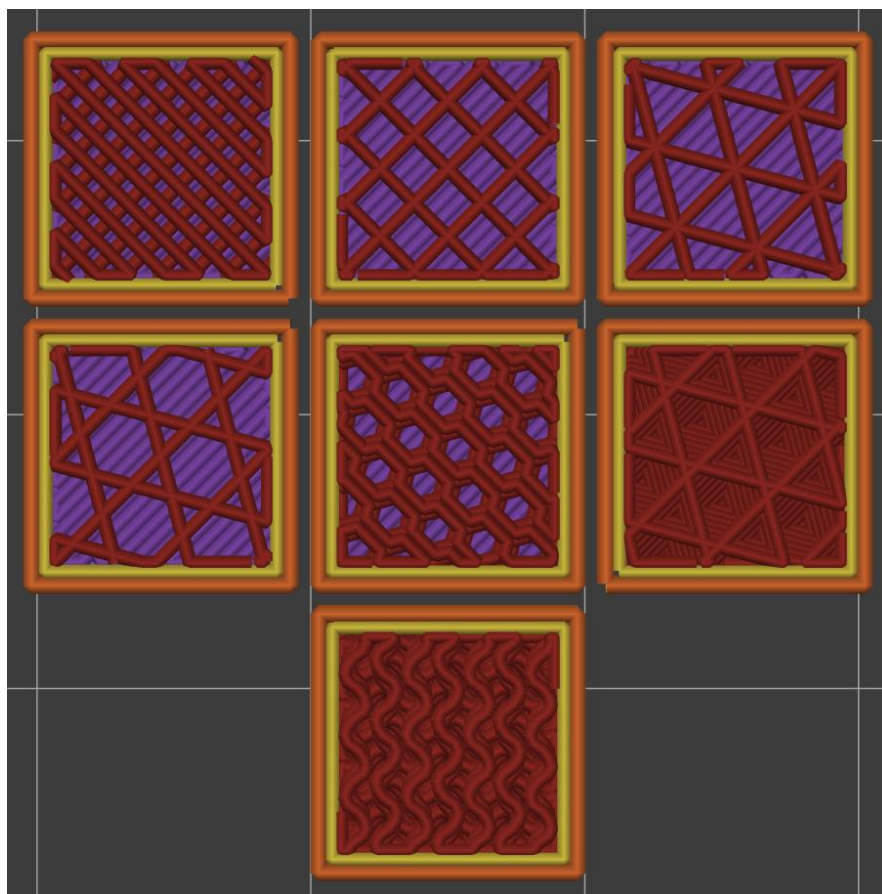
v rovině vrstvy. Vzor výplně čar se doporučuje většinou pro tisk zkušebních objektů a prototypů, protože spotřebovává méně materiálu a má rychlejší tisk než většina ostatních vzorů. Je také vhodný pro tisk dekorativních předmětů. Tisky jsou středně silné, když jsou stlačeny ze stran, ale protože neexistuje žádná strukturální podpora podél osy Z, nenesou velkou sílu ve vertikálním směru. Speciálním typem přímočaré výplně je výplň přímočará zarovnaná, kde se úhel následujících vrstev nemění. Takováto výplň je vhodnější pro zatížení ve směru Z a ohybné výtisky za cenu pevnosti ve směru rovnoběžném s rovinou tiskové plochy. [28]

Mřížková výplň je podobná přímočaré. Rozdíl je v tom, že u mřížkové výplně se každá vrstva se skládá z čar vytištěných podél osy X a osy Y. Vrstvy tak vypadají jako mřížka a díky tomu, na rozdíl od vzoru výplně čar, může mít jedna vrstva pevnost ve dvou rozměrech. Tento vzor výplně je pevnější, ale spotřebuje více materiálu a má pomalejší dobu tisku ve srovnání s výplní přímočarou. Trojúhelníková výplň se skládá z trojúhelníků, které jsou spojeny dohromady a tvoří tak identické vrstvy, které jsou na sebe naskládány. Na rozdíl od předchozích vzorů, kde jsou čáry filamentu tištěny pouze ve dvou směrech podél roviny XY, obsahuje trojúhelníkový vzor čáry tištěné ve třech směrech. To poskytuje vzoru jednotnou pevnost ve všech směrech a vzor je také odolnější vůči vnějším silovým účinkům. Hvězdicový vzor výplně je silný 2D vzor, který je podobný trojúhelníkovému vzoru. Čáry v každé vrstvě jsou také vytištěny ve třech směrech podél roviny XY, ale takovým způsobem, že se zdá, že šest trojúhelníků je spojeno v rozích dohromady a vytváří šesticípé hvězdy, které se spojují a vytváří vrstvu. Tyto vzory se v jednotlivých vrstvách kříží sami se sebou což způsobuje nežádanou akumulaci materiálu. Tento problém se nevyskytuje ve vzoru typu pláštěv. Tento vzor se skládá z napojených šestiuhelníků a vyniká svou pevností. Nevýhodou je větší spotřeba materiálu a oproti ostatním vzorům velmi dlouhá doba tisku. [28]

Kubický vzor výplně je silný 3D vzor výplně, který se skládá z naskládaných krychlí, které jsou nakloněny v úhlu 45 stupňů kolem osy X a osy Y. Jednotlivé vrstvy se zdánlivě podobají trojúhelníkovému nebo hvězdicovému vzoru.



Krychlový vzor výplně zvládne odolat dobře tlaku ze všech směrů, ale vyžaduje více materiálu a má pomalejší tisk. Jednotlivé krychličky jsou od sebe odděleny. Výplň tedy není propustná a uzavřené kapsičky vzduchu mohou fungovat jako izolace. Vzor výplně gyroid působí dojmem vln. Skládá se z konkávních nepravidelných zakřivení, která se vždy po několika vrstvách v návaznosti na předchozí vrstvu plynule překříží. Gyroid má nejvyšší poměr pevnosti k hmotnosti. Jeho perforovaná struktura propouští tekutiny a může se tedy například zaplnit pryskyřicí. Další výhodou je, že na rozdíl od kubického vzoru se v jednotlivých vrstvách vzor sám se sebou nekříží a nevzniká tak hromadění filamentu. Při nízkých hustotách výplně se však mohou objevit problémy s podporou této struktury. Existuje mnoho dalších vzorů jako je například Archimedova spirála, 3D plástev, Hilbertova křivka nebo kubický adaptivní vzor. Vhodností některých z těchto dalších vzorů by se mohlo zabývat v hlubším pohledu na tuto problematiku. [28]



Obrázek 2: Vzory výplně

Na tomto obrázku jsou ukázky představených vzorů z programu PrusaSlicer. Vzor výplně je zleva: přímočarý, mřížka, trojúhelníky, hvězdy, plástev, kubický a gyroid.

Nejvhodnější vzory a jejich tiskové vlastnosti jsou shrnuty v následující tabulce. Časy tisku a spotřebovaný materiál byli vyhodnoceny pro krychli o straně 50 mm se dvěma perimetry a s 50% výplně. Výška vrstvy byla nastavena na 0,3 mm a průměr filamentu na 1,75 mm. Rychlost pohybu tiskové hlavy pro tisk výplně byla nastavena na 85 mm/s. Rozdíly mezi časy tisku jsou tím výraznější, čím je tisknutý objekt větší. Tyto data byli získány z volně dostupného programu PrusaSlicer 2.4.2 založeným na programu Slic3r.

*Tabulka 2: Srovnání vzorů výplně*

Název vzoru	Typ vzoru	Doba tisku výplně	Délka spotřebovaného filamentu
Přímočarý	Rychlý 2D	1 hod. 48 min.	21,9 m
Hvězdy	Silný 2D	2 hod.	21,7 m
Plástev	Silný 2D	6 hod. 47 min.	25,5 m
Mřížka	Silný 2D	1 hod. 58 min.	22 m
Trojúhelníky	Silný 2D	2 hod. 4 min.	21,9 m
Gyroid	Silný 3D	4 hod. 32 min.	20,7 m
Kubický	Silný 3D	2 hod. 2 min.	21,8 m

Nejrychlejší vzor byl očekávaně vzor přímočarý. Vzhledem k tvarové podobnosti v jednotlivých vrstvách jsou vzory trojúhelníky, hvězdy a kubický srovnatelné jak v době tisku, tak spotřebě filamentu. Oproti přímočaré výplni by tyto vzory nespotebovali více filamentu a doba tisku by nebyla o moc delší. Gyroid má v jednotlivých vrstvách už složitější pohyby, a tak trvá znatelně déle. Doba tisku by byla více než dvojnásobná oproti přímočaré výplni. Spotřeba filamentu byla ale nejmenší. Ve srovnání s přímočarým vzorem byla o 4,6% menší. Plástev by měla oproti přímočaré výplni více než trojnásobnou dobu tisku. Také měla největší spotřebu materiálu. Oproti přímočaré výplni by bylo potřeba o 16% více filamentu.

Podle experimentů tlakových zkoušek jedna studie tvrdí, že při stejném využití materiálu jsou v tlaku při správné orientaci nejpevnější trojúhelníková a

hvězdicová výplň. V porovnání s kubickou výplní testovací válečky vydrželi o více než 50% větší sílu. Jelikož má kubický a trojúhelníkový vzor výplně podobnou spotřebu materiálu a dobu tisku, tak lze vyvodit, že nelze obecně říct, že 3D výplně jsou vhodnější pro všechny mechanicky namáhané díly. Při aplikacích s jednoduchým jednosměrným silovým působením mohou podat lepší výsledky 2D výplně. Pokud tak však není, tak je velmi těžké předvídat, který typ výplně je lepší. [29]

## 5.4 Perimetry a plné vrstvy

Nastavením plných vrstev se myslí počet spodních a vrchních vrstev výtisku, které mají 100% výplně. Perimetry jsou obvodové stěny modelu a nastavuje se jejich počet. Výsledná stěna výtisku bude mít šířku přibližně odpovídající průměru trysky vynásobeným počtem perimetrů. Více perimetrů bude mít stejně jako množství výplně dopad na zvýšení pevnosti a tuhosti součásti. Větší počet perimetrů může vést ke zvýšení geometrické přesnosti výtisku. [4; 8]

## 5.5 Ostatní parametry a nastavení sliceru

Dalším parametrem tisku je například teplota filamentu a podložky. Pro každý filament je určen nejvhodnější teplotní rozsah. Úpravou se budou měnit především vizuální vlastnosti tisku. Teplota trysky se pohybuje nejčastěji v rozmezí od 200 °C do 240 °C a teplota podložky od 60 °C do 100 °C. Nastavení chlazení modelu je relevantní v případech kdy předchozí vrstvy nemají dost času na ztuhnutí. Typicky jsou to úzké a vysoké objekty. [4]

Podpěry umožňují tisknout převisy, či taková místa, která svírají s podložkou úhel menší než cca 45°. Podpěry jsou po dokončení tisku odlámány nebo rozpuštěny. Cílem je množství podpěr minimalizovat, protože méně podpěr znamená rychlejší tisk a menší spotřebu materiálu. Jediným případem, kdy lze tisknout bez podpory v předchozí vrstvě je při přemostování, kdy dochází k tahání tiskových vláken mezi dvěma body o stejné výšce. Dalším nastavením je přidání obrysu, který se objektu nedotýká. Většinou se tiskne jen v několika málo vrstvách vždy dříve než samotné objekty v dané vrstvě. Díky tomu může sloužit ke kontrole přichycení první vrstvy, kontrole toku materiálu a případnému

doladění výšky osy Z. Další využití může mít obrys ve vytváření mikroklima okolo tisknutého objektu. Rychlosti tisku bývají odladěny v profilu tiskárny tak, aby byl tisk co nejrychlejší bez vzniku vad způsobených při vysokých rychlostech tisku. [4]

## 5.6 Vady 3D tisku FFF tiskáren

Princip FFF 3D tiskáren není příliš složitý, ale při tisku spolupracuje mnoho pohyblivých částí. V kombinaci s dlouhými dobami tisku tedy nikdy nevznikne bezchybný výtisk.

Stringing je vytváření dodatečných slabých vláken materiálu během přejezdů tiskové hlavy. Tyto vlákna lze připodobnit vláskům vystupujícím z objektu. Omezit tuto vadu je možné správným nastavením retrakce, což je nastavení zpětného vtažení filamentu před každým přejetím tiskové hlavy. Under-extrusion je vada, která se projevuje dírami a nekonzistentním povrchem tisku. Tato vada je způsobena nedostatečným průtokem materiálu tryskou. Při dodržení doporučených pracovních teplot bývá tato vada nejčastěji způsobena ucpanou tryskou. Při nadměrném průtoku materiálu tryskou vzniká vada over-extrusion. Ta se projevuje nerovným povrchem výtisku. Většina 3D tiskáren nemá jak monitorovat průtok materiálu tryskou. Pokud není tryska ucpaná a je použit správný průměr filamentu, tak se obě dvě vady se dají eliminovat správným nastavením rychlosti extruze. [4]

Při malém množství výplně, nedostatečném toku materiálu, nebo malém počtu vrchních plných vrstev mohou vznikat mezery ve vrchní vrstvě. Ve vrchní vrstvě se také mohou objevit „jizvy“. Ty vznikají při pohybu tiskové hlavy nad předešlou vrstvou. Při tom se může tisková hlava třít o předešlou vrstvu a vytvořit na rovných plochách viditelné dráhy. Vada může být důsledkem nadbytečné extruze materiálu, ale objevuje se i pokud je extruze nastavená správně. V některých slicerech je možné nastavit malý vertikální posun tiskové hlavy při přesunu na další místo odkud se má táhnout struna. Toto nastavení se někdy nazývá Z-hop.

Příliš velká rychlost tisku může způsobit nekonzistentní výplň. To může být problém obzvláště na rozhraní perimetru a výplně, kde se objeví dutiny. Tento

efekt je obzvláště výrazný u kruhových otvorů. Dutiny u kruhových otvorů lze také snižovat nastavením překrytí mezi výplní a perimetry, pokud to slicer umožňuje. Další vadou je delaminace. Jedná se o závažnou vadu, která způsobuje oddělení dvou vrstev. Často je způsobena zvolením moc velké výšky vrstvy nebo nedostatečnou teplotou tisku. Obecně je delaminace způsobena nedostatečným spojením vrstev.

Nejnebezpečnější jsou pro funkční výtisky vady způsobené tepelnou deformací. Nemusí být totiž vždy na první pohled zřejmé, ale mohou být závažné. Kroucení a tepelné deformace jsou způsobovány rozdílnými rychlostmi chladnutí. Pokud je chladnutí rychlejší, tak dochází také k menší deformaci. Tepelné deformace se snižují vyhříváním podložkou, uzavřením tiskového prostoru nebo omezením chlazení ventilátorem. Ke snížení výskytu tepelných deformací také nabízí slicery technologické přídatky. Límec je přidání materiálu okolo objektů v první vrstvě. Na rozdíl od obrysu se tisknutého objektu dotýká a po vytištění se odlomí. Raft je typ podpěry, která se tiskne pod celou kontaktní plochou modelu s podložkou. Tím se objekt zvedne o definovanou výšku. Kromě snižování kroucení límec a raft také zvyšuje přilnavost první vrstvy. Další možností je již zmiňovaný obrys k vytvoření mikroklima. [4]

## 6 Ohýbání

### 6.1 Obecné pojmy a mechanismy tváření

Stejně jako jiné tvářecí procesy je i ohýbání založené na velkých plastických deformacích, při kterých dochází k trvalé změně tvaru a rozměrů. V případě ohýbání je to konkrétně pružně plastická deformace způsobená momenty vnějších sil. Tato deformace je vyvolána účinkem vnějších sil pomocí tvářecího nástroje a stroje. Aby byla deformace skutečně trvalá, tak musí tyto vnější síly způsobit v ohybku napětí, které překročí mez kluzu. Před dosažením meze kluzu dochází k deformaci elastické, která je dočasná a po uvolnění napětí se deformovaná krystalická struktura vrací do původního stavu. Oproti tomu při plastické deformaci už dochází k pohybu jednotlivých částí kovů vůči sobě bez toho, aniž by byla porušena jejich soudržnost. Základním předpokladem tváření je, že během velkých plastických deformací, při kterých tváření probíhá se objem tělesa nemění, a tedy není samo o sobě spojeno se ztrátami materiálu. [30]

Trvalá deformace je umožněna postupným přemísťováním částic kovu a je podobná tečení viskózních látek. Odlišnosti spočívají především v krystalické stavbě kovů, která omezuje způsob pohybu částic na dva základní mechanismy, a to kluz a dvojčatění. Tyto mechanismy vychází z pohybu a vzniku mřížkových poruch v materiálu. Změny ve struktuře tvářeného materiálu se projevují změnou fyzikálních a mechanických vlastností. Při tváření za studena dochází ke zpevnování kovu tím, že jeho mez kluzu roste a blíží se mezi pevnosti. Tyto deformace také způsobují zbytková vnitřní napětí, která působí na materiál i po odlehčení. Pokud jsou zbytková napětí vyšší než mez pevnosti, tak dochází k porušení materiálu. Tyto zbytková napětí je možné zmenšovat žíháním na určitou teplotu. Tento děj se nazývá zotavování a jeho mechanismus souvisí s přesunem atomů, které po zotavení zaujímají stabilnější stavy. Při vyšších teplotách pak už dochází k rekrystalizaci, která obnovuje deformovanou strukturu materiálu a tím i odstraňuje případné zpevnění a zbytková napětí. [30]

V souvislosti s tvářením existují dva důležité pojmy pro výpočet potřebných tvářecích sil a prací a pro výběr tvářecích strojů. Těmito pojmy jsou přetvárná pevnost a přetvárný odpor. Přetvárná pevnost je tvářecí napětí, kterým se dosáhne plastické deformace bez uvažování pasivních odporů jako je například tření. Toto napětí je klíčové pro určení potřebných sil a prací. Přetvárná pevnosti je komplexní hodnota, která závisí na druhu materiálu, teplotě tváření, stupni deformace a deformační rychlosti. Závislost mezi přetvárnou pevností a stupni deformace při stálých ostatních parametrech udávají křivky zpevnění. Přetvárný odpor je napětí působící proti směru deformace. To závisí na teplotě, deformační rychlosti, mezi kluzu, tření a rozměrech tvářeného tělesa. [30]

Tváření se obecně rozděluje dle tvářecí teploty na tváření za studena, za poloohřevu a za tepla. Teploty se určují podle rekrystalizační teploty, která je pro tváření za studena do 40 % teploty tavení a pro tváření za tepla od 70 % teploty tavení. Další rozdělení je na plošné a objemové tváření. Při plošném tváření je malá třetí hlavní deformace a týká se většinou tváření plechů, kdy je polotovarem přístřih z plechu. [30]

## 6.2 Volba a příprava polotovarů pro ohýbání

Plechý jsou typickým polotovarem pro ohýbání, hluboké tažení, stříhání a tlačení. Ocelové plechy se dodávají v tabulích nebo ve svitcích. Dodávání ve svitcích je velmi efektivní, ale k jejich používání jsou potřeba další stroje jako jsou rovnačky, odvíječky a linka na podélné dělení. Svitky tedy nejsou vhodné pro menší objem produkce. Jako polotovar pro ohýbání 3D tištěným nástrojem by byl nejvhodnější přístřih z tabule plechu. Tvařitelnost materiálu polotovaru se kvalifikuje čtyřmi stupni: zaručená tvařitelnost, velmi dobrá tvařitelnost, dobrá tvařitelnost a omezená tvařitelnost. K dělení materiálu na požadovaný polotovar lze použít mnoho různých technologií. Je možné například řezat pilami či dráty, upichovat na soustruhu, lámat, řezat plamenem nebo vodním paprskem nebo sekát na bucharech a lisech. Pro plechy jsou také vhodné novější technologie jako je řezání laserem nebo plazmou.

K přípravě polotovarů pro jednoduché ruční ohýbání je ale nejvhodnější stříhání na nůžkách, které se u plechů provádí za studena. Stříhání je jedna z

nejrozšířenějších operací při tváření. Stříháním se rozumí oddělování části materiálu působením protilehlých řezných hran, způsobujících v řezné rovině smykové napětí. Protože je materiál elastický, tvárný a smykové napětí způsobuje tlak nožů na celé ploše, tak oddělení nikdy nenastane v žádané rovině. Stříhání se vždy bude jen přibližovat k čistému smyku podle toho, do jaké míry se tlak nožů přemění ve smykové napětí. V odstříhnuté ploše se rozeznává pásmo zaoblení, pásmo utrnutí, pásmo smyku a pásmo odtlačení. K úspěšnému stříhu je potřeba střížná vůle mezi noži, která se volí podle tloušťky a pevnosti materiálu. Často se používá také přidržovač stříhaného materiálu k zamezení natočení materiálu, které je vyvolané klopným momentem vzniklým při stříhání. Tento moment lze také snižovat zvětšováním úhlu čela nože. [31; 30]

## 6.3 Druhy ohýbání

Ohýbání může být plošné i objemové, za studena i za tepla. Tato práce je zaměřena hlavně na prosté ohýbání plechu. Při plošném tváření jde o ohyb rovinných ploch plechu v plochy vůči sobě různě orientované. Při objemovém tváření jde o ohýbání tyčí, profilů a výkovků. Pod ohýbání však spadají i další tvářecí operace. Zakružováním se tváří rovinná nebo členitá plocha v plochu válcovou nebo kuželovou. Lemováním se ohýbají okraje rovinné nebo prostorové plochy například pro ozdobné účely nebo k odstranění ostrých hran, Obrubováním se vyztuží kraje rovinné či prostorové plochy například ke zvýšení jakosti okraje. Osazováním se ohýbá promáčknutím v okraji nebo uvnitř rovinné plochy. Drápkováním se pevně spojí předehnuté okraje plechů tím, že se do sebe oba plechy zaklesnou a společně dohnou. Dále se ještě rozeznává ohraňování na ohraňovacích lisech, rovnání a zkručování, což je natáčení plochého nebo profilovaného polotovaru nebo výkovku vzhledem k sousední části kolem společné osy o určitý úhel. [30]

## 6.4 Teorie ohýbání

### 6.4.1 Deformace při ohybu

Ohýbání zasahuje poměrně malý objem polotovaru. Vzniklé tvary jsou rozvinutelné což umožňuje zjistit rozvinutou délku, a tedy i velikost polotovaru.

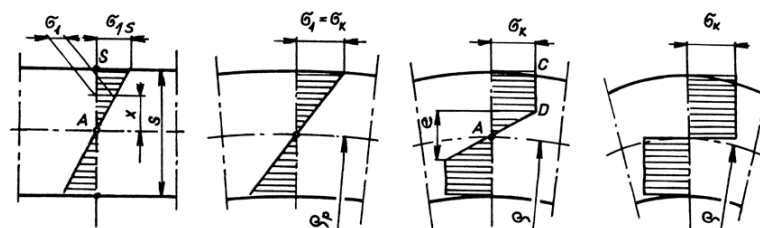


Materiál je na vnitřní straně v podélném směru namáhán tlakem, a tedy stlačován v podélném směru a rozšiřován v příčném směru. Na vnější straně je namáhání tahem a ohybek je roztahován v podélném směru a zužován v příčném směru. Příčné deformace jsou tím patrnější, čím je ohýbaný polotovar užší. U širokých polotovarů změnu délku vláken v podélném směru kompenzuje pouze změna tloušťky materiálu. Tloušťka stěny v rohu ohybku se ztenčuje s větším úhlem ohybu, menším poloměrem ohybu, menší tvárností materiálu a větším třením mezi materiálem a nástrojem. Nepřípustnému ztenčení lze zabránit pouze vytvořením zásoby materiálu v místě ohybu. Průběh napětí v ohybu ukazuje polohu neutrální vrstvy, ve které je napětí nulové. Neutrální vrstva neprochází středem průřezu. Čím je ohyb ostřejší, tím více je neutrální vrstva posunuta k ose ohybu. Posun neutrální vrstvy se počítá pomocí experimentálních vzorců. Znalost polohy této neutrální vrstvy slouží k zjištění rozvinutého polotovaru. Poloměry ohybu neutrální vrstvy totiž určují délky oblouku neutrální vrstvy. Výchozí délka polotovaru je pak součtem rovných částí a délek oblouků neutrální vrstvy. [30; 32]

Při ohýbání tenkých plechů může také dojít ke zvlnění povrchu. Tomu lze zabránit dodatečnou tahovou silou při ohýbání nebo bočním přitlačením materiálu k nástroji. Obojí vyžaduje složitější nástroje. [30; 32]

### 6.4.2 Fáze ohybu

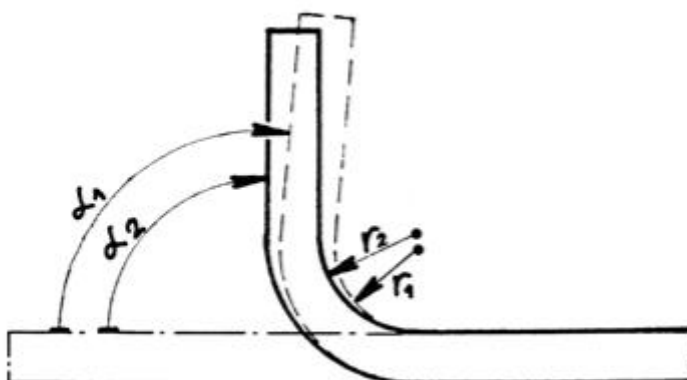
Průběh napětí také dělí ohyb na jednotlivé fáze ohybu. Nejprve se jedná o pružný ohyb, kdy napětí lineárně roste směrem ke krajním vláknům. Mezním stavem pružného ohybu je dosažení meze kluzu v krajních vláknech. Při dalším zatěžování se již jedná o pružně-elastický ohyb. Ve vláknech, ve kterých se dosáhne meze kluzu, už napětí neroste. Oblast plastického ohybu při dalším zatěžování roste, dokud se plastického ohybu nedosáhne v celém průřezu. Pak se jedná o čistě plastický ohyb. [32]



Obrázek 3: Fáze ohybu [32]

### 6.4.3 Odpružení

Odpružení po ohýbání je zmenšování úhlu ohybu a zvětšení poloměru ohybu po odlehčení. Vzniká v důsledku částečného uvolnění pružných deformací. Odpružení se zvětšuje s tvrdostí materiálu a s růstem poloměru ohybu. Naopak se zmenšuje s rostoucím úhlem ohybu, jelikož narůstá pásmo plastického ohybu. Odpružení je možné omezit či dokonce eliminovat mnoha způsoby. Může se například vyztužit místo ohybu žebry, pružně předehnout dno, zpevnit materiál v rohu rázem, vylisovat vyztužovací žebro na výlisku nebo kalibrovat rohy. Kalibrace rohů je zplastizování místa ohybu za účelem zmenšení oblasti pružných deformací. Obecně lze tedy odpružení kompenzovat menším úhlem ohybu nebo minimalizovat zvýšením tuhosti v rozích. Při ohybech o velkém poloměru se může zamezit odpružení také tím, že se materiál současně s ohýbáním bude namáhat tahem. Při tom se natáhne o 2 až 4 % své původní délky. [30; 32]



Obrázek 4: Vliv odpružení na úhel otevření [32]

$\alpha_1$  – úhel otevření před odpružením,  $r_1$  – vnitřní poloměr ohybu před odpružením,  $\alpha_2$  – úhel otevření po odpružení,  $r_2$  – vnitřní poloměr ohybu po odpružení

Velikost odpružení se určuje podle následujícího vztahu:

$$K = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cong \frac{r_1 + 0,5 \cdot s_0}{r_2 + 0,5 \cdot s_0} \quad (1)$$

kde  $s_0$  je počáteční tloušťka polotovaru. [32]

#### 6.4.4 Zbytková napětí při ohybu

S odpružením souvisí zbytkové napětí vznikající v ohybu. Při postupném odlehčování brání trvale deformovaná vlákna pružně deformovaným vláknům vrátit se do původního tvaru. Na vnější straně, kde jsou vlákna tažena, vzniknou po odlehčení zbytkové tlakové napětí a na vnitřní straně, kde jsou vlákna stlačována, vzniknou po odlehčení zbytkové tahové napětí. Tyto napětí mají vliv na pevnost ohybu. Při zatížení momentem působícím ve stejném směru jako při ohýbání nastane plastická deformace až hodnota zátěžného momentu překročí hodnotu momentu, při kterém byla součást ohnuta. Při zatížení momentem působícím v opačném směru jako při ohýbání však vznikne plastická deformace už i při nižší hodnotě momentu. To je způsobeno tím, že v případě ohybu ve směru souhlasném s předchozím ohybem zbytková napětí v krajních vláknech působí proti deformaci a v případě rovnání působí souhlasně s deformací. [30; 32]

#### 6.4.5 Poloměry ohybu

Nejmenší dovolený poloměr ohybu je nejmenší vnitřní poloměr ohybu, při kterém ještě nedochází k porušení materiálu. Porušení materiálu vzniká zpravidla ve vnějších vláknech, kde tahové napětí nesmí překročit mez pevnosti. Hodnota nejmenšího dovoleného poloměru je závislá i na orientaci ohybu vzhledem ke směru válcování plechu, který vytváří v materiálu vlákna. Pokud je osa ohybu kolmá na směr vláken materiálu, tak je minimální poloměr asi dvakrát menší. Malé poloměry ohybu sice více namáhají materiál, ale dochází poté k menšímu odpružení. Nejmenší délka ohýbaného ramene je dvojnásobek tloušťky materiálu. Nejmenší poloměr ohybu se určuje podle následujícího vztahu:

$$r_{min} = \frac{s}{2} \cdot \left( \frac{1}{\epsilon_m} - 1 \right) \quad (2)$$

kde  $r_{min}$  je nejmenší dovolený poloměr ohybu,  $s$  je tloušťka ohýbaného materiálu,  $\epsilon_m$  maximální rovnoměrné prodloužení na mez pevnosti. [32]

Pro jeden daný materiál závisí nejmenší poloměr ohybu pouze na tloušťce materiálu. Existují tedy koeficienty pro minimální poloměr, které po vynásobení tloušťkou materiálu dají minimální poloměr ohybu. Ty jsou dané v normě ČSN 22

7440. Například pro hliník je tento koeficient 0,35 a u měkké oceli se pohybuje v rozmezí 0,4 až 0,8. Tyto koeficienty berou v normě potaz i na jejich stav před ohybem a způsob ohybu. Minimální poloměry se používají pouze v nutných případech. Většinou je poloměr ohybu o 20% větší. [32]

Největší poloměr ohybu je určen tak, aby v krajních vláknech průřezu došlo k trvalé deformaci. Pokud by krajní vlákna nebyla zplastizována, tak by se po odlehčení materiál opět narovnal. Z pevnostního a technologického hlediska nejsou velké poloměry vhodné. Největší poloměr ohybu se určuje podle následujícího vztahu:

$$r_{max} = \frac{s}{2} \cdot \left( \frac{1}{\epsilon_e} - 1 \right) \quad (3)$$

kde  $r_{max}$  je největší dovolený poloměr ohybu,  $s$  je tloušťka ohýbaného materiálu,  $\epsilon_e$  maximální rovnoměrné prodloužení na mezi kluzu. [32]

#### 6.4.6 Technologie ohýbání

Jednoduché ohýbací stroje je možné konstruovat dvěma způsoby. První možností je ohýbání na ohýbačkách, kdy se část polotovaru sevře a pak se provede ohyb pohyblivou částí ohýbačky o požadovaný úhel. Ohyb tímto způsobem je nastavitelný a nevyžaduje speciální nástroje. Nevýhoda ale spočívá v jednoúčelovosti tohoto stroje. Také se mohou objevit problémy při ohybu složitějších tvarů nebo ostrých úhlů. Druhou možností je ohyb pomocí ohybníku a ohybnice, kdy se ohyb provádí tím, že ohybník tlačí polotovar do dutiny ohybnice. Pokud má ohybek po ohýbací operaci větší úhel než nástroje, tak se jedná o volné ohýbání. Pro přesnost ohybu je v takovém případě potřeba zajistit nějakým způsobem doraz v případě ručního ohybu nebo nastavit správně pracovní zdvih v případě strojního ohýbání. Nástroje ale mají univerzální tvar.

Další možností je prostý ohyb bez ražení, kdy ohybnice už má úhel odpovídající úhlu ohybu. Ohybník má ale menší úhel než ohybnice. Ohybník je tedy univerzální a ohybnice specifická pro danou operaci. V kontextu využití technologie 3D tisku to znamená, že pro více ohybů by se mohl zhotovit jeden ohybník ke kterému by se tisklo více ohybnic. Takovýto přístup kombinuje flexibilitu 3D tisku s lepšími vlastnostmi ocelových nástrojů. Oproti výhradně

plastovým nástrojům ocelový ohybník zdatně zvyšuje přesnost. Výroba ohybníku je oproti ohybnici také potenciálně snazší. Ohyb lze také provést tak, že ohybník i ohybnice mají stejný úhel odpovídající úhlu ohybu. Tento proces se nazývá ohyb ražením. Provádí se na lisech s tím, že se musí správně nastavit dolní úvrať beranu na maximální toleranci plechu, aby razicí síla nepřekročila jmenovitou sílu lisu. U plastových nástrojů by spíše hrozilo zničení nástroje. Ražení také zmenšuje odpružení a umožňuje ohýbat polotovary do menšího úhlu.

[30; 2; 32]

## 7 Návrh ohýbacího nástroje

Byli navrženy dva ohýbací nástroje skládající se z ohybníku a ohybnice. Jeden nástroj byl určen k ohybu hliníkových vzorků tloušťky 4 mm a druhý k ohybu ocelových plechů tloušťky 0,7 mm. Návrhem pro stroj na samotné ohýbání obou vzorků byl jednoduchý ruční svěrák. Ten měl po upnutí nástrojů fungovat jako ruční ohraňovací lis, který by vykonal požadovaný ohyb. Svěrák by měl simulovat situaci, kdy je potřeba provést ohyb co nejlevněji a nejrychleji bez investice do specializovaného vybavení. Dalo by se říct, že jedním z hlavních účelů této práce je rozšíření možností použití již pořízené 3D tiskárny. Pro modelování obou ohýbacích nástrojů byl použit program Autodesk Inventor Professional 2022. Pro slicování STL modelu byl použit program PrusaSlicer 2.4.2. Tisk nástrojů byl proveden na upravené 3D tiskárně Ender 3 PRO. Při návrhu geometrie nástroje se nebral velký ohled na směr tisku pro větší volnost v konstrukčním řešení.

### 7.1 Modelování nástrojů

Při modelování obou nástrojů bylo potřeba v první řadě myslet na způsob upnutí nástrojů. Upnutí v případě použitého svěráku bylo možné díky dvou děrám se závity M6, které sloužili k uchycení čelistí. Závítované díry se nacházely uprostřed čelistí a rozteč mezi nimi byla 75 mm. Pro upnutí nástroje bylo navrženo jednoduché upnutí pomocí šroubů a podložek. Pokud měl mít nástroj jednoduchou a dobře tisknutelnou geometrii tak tato rozteč omezuje šířku nástroje. Konkrétně rozteč a vnější průměr podložky omezuje maximální šířku nástroje ve směru delší hrany čelisti svěráku včetně zaoblení na 63 mm. Toto omezení by se v navazujících návrzích mohlo eliminovat třeba tím, že v nástroji vytiskla drážka ve tvaru písmene T. Šrouby, které by nástroj upínaly, by pak nevyčnívaly nad vnější povrch. To by umožnilo rozšířit šířku nástroje. Šířka by poté byla omezena hlavně šířkou čelistí, která byla 125 mm. Další možností je pořídit svěrák, který nemá upínání v ploše čelistí. Z použitého řešení upnutí pro návrh obou nástrojů vyplývalo vytisknutí dvou průchozích vystředěných děr o

průměru 7 mm vzdálených od sebe 75 mm. Průměr děr odpovídá hrubé díře pro šrouby velikosti M6. Výška podstavy nástroje byla zvolena 10 mm.

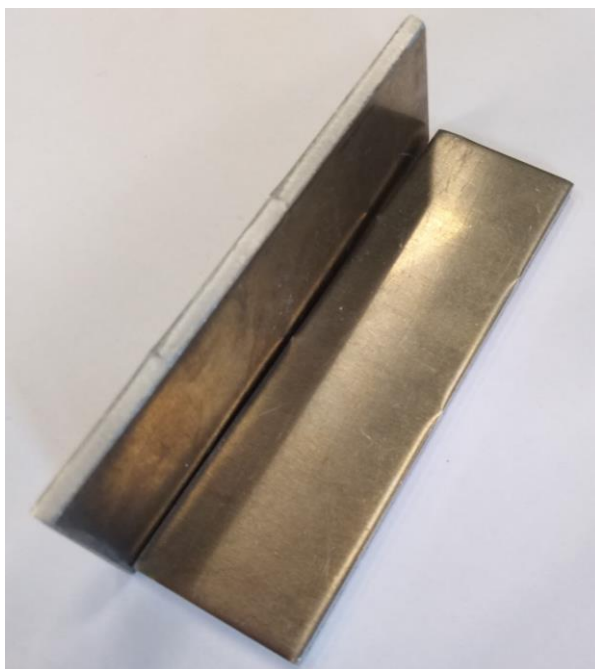
Nástroje byly konstruovány jako nástroje pro ohyb ražením. Jedním z cílů tohoto přístupu bylo zjištění proveditelnosti ohybu ražením pro plastové nástroje. Pokud by se tak nepodařilo, tak se nástroj může pořad použít jako nástroj pro volné ohýbání menších úhlů. V obou případech se jedná o V ohyb. Pro ohýbací nástroj na hliníkové vzorky byl zvolen úhel ohybu 90°. Pro ohýbací nástroj na ocelový plech byl zvolen úhel ohybu 87° aby se kompenzoval vliv odpružení a výsledný ohybek měl úhel bližší 90°. Cílem při ohýbání druhého ocelového plechu bylo ohnout plech do U profilu pomocí 3D tištěného nástroje a porovnat tento profil s profilem ohnutým na konvenční ohýbačce.

Vzorky pro ohyb hliníkového plechu tloušťky 4 mm měly délku 100 mm a šířku 30 mm. Při správné orientaci vzorků na výšku by tedy maximální šířka 63 mm na návrh ohýbacího nástroje pro tyto vzorky vystačila. Materiál vzorků byla slitina hliníku EN AW-6063 také označována jako AlMg0.7Si. Je to středně silná slitina s vysokou odolností proti korozi vhodná ke všeobecnému použití. Jedná se o slitinu hliníku, hořčíku a křemíku. Hořčík a křemík tvoří intermetalickou fázi, která umožňuje tepelné zpracování vytvrzováním. Slitina byla ve stavu T4, ve kterém má dobrou tvařitelnost. Tento stav označuje hliníkové slitiny po rozpouštěcím žíhání a přirozeném stárnutí. Minimální mez kluzu je 65 MPa, minimální pevnost v tahu je 130 MPa a minimální tažnost je 12 %. [33]

Vzorky pro ohyb plechu tloušťky 0,7 mm měly délku 500 mm a šířku 180 mm. Úkolem bylo vytvořit U profil s rameny délky 50 mm. Použitý plech byl z vysokopevnostní hlubokotažné oceli HX 180BD. Tato ocel se používá zejména v automobilovém průmyslu. Jedná se o nízkouhlíkovou ocel (IF) válcovanou za studena s příměsí manganu, křemíku, titanu a niobu. Minimální mez kluzu je 180 MPa, minimální pevnost v tahu je 330 MPa a minimální tažnost je 34 %. [34]

Tabulka 3: Shrnutí materiálů vzorků

Materiál	Min. mez kluzu	Min. pevnost v tahu	Tažnost
EN AW-6063	65 MPa	130 MPa	12 %
HX 180BD	180 MPa	330 MPa	34 %



Obrázek 5: Materiál 6063 pro první experiment



Obrázek 6: Materiál HX180 BD pro druhý experiment

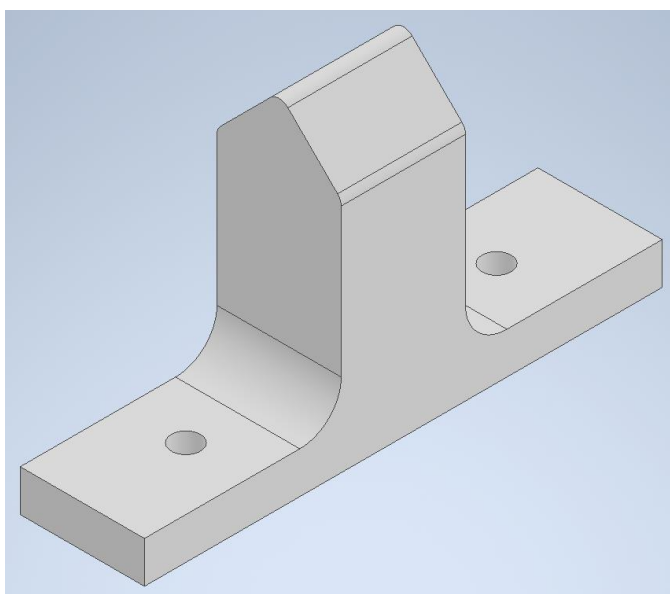


Orientace vzorků na výšku je také výhodná, protože se na ohybnici může lehce vytisknout výstupek s jehož pomocí se usnadní zakládání polotovaru a jednoznačně určí jeho poloha. Při orientaci na šířku by byl výstupek také možný, ale pro středění a zakládání by byly potřeba minimálně dva a prodlužovali by tedy tisk.

Šířka ohybníku i ohybnice byla zvolena 30 mm, což odpovídá šířce vzorků. Širší nástroj by pouze prodlužoval dobu tisku. Poloměr zaoblení špičky ohybníku určuje navržený minimální poloměr ohybu. Plastové nástroje nejsou vhodné pro malé poloměry zaoblení, protože malé poloměry zvyšují sílu potřebnou pro ohyb. Nástroj z plastu by velké síly nevydržel ostrá špička by byla podrobena velkému opotřebení. Velká tvářecí síla by pro ruční svěrák také v krajním případě mohla znamenat neschopnost provést tvářecí operaci nebo poničení svěráku. Orientační minimální poloměr ohybu pro hliník je při použití koeficientu 0,35:

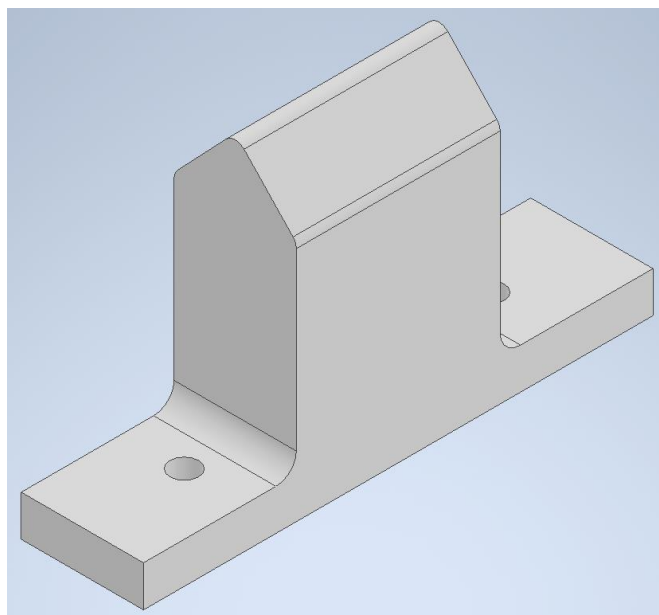
$$r_{min} = 0,35 \cdot s = 0,35 \cdot 4 = 1,4 \text{ mm}$$

Poloměr zaoblení špičky ohybníku byl zvolen 3 mm. Tato hodnota měla být bezpečně nad minimálním poloměrem ohybu a zároveň měla tvořit dostatečně robustní nástroj. Stejný poloměr byl zvolen na bocích špičky ohybníku. Mezi částí nástroje konající ohyb a částí pro upnutí do svěráku bylo navrženo poměrně velké zaoblení 10 mm, aby se zmenšil vliv vrubu v rohu nástroje a tím se eliminovala nežádaná koncentrace napětí.



Obrázek 7: Model ohybníku prvního nástroje

Ohybník pro plechový profil má minimální poloměr ohybu menší. Pro zajištění dostatečné robustnosti nástroje byl ale zvolen poloměr špičky také 3 mm. Poloměr boků špičky zůstal také 3 mm. Poloměr zaoblení mezi podstavou a tělem nástroje byl zmenšen na 5 mm. Menší poloměr zaoblení umožnil rozšíření činné části ohybníku a ohybnice na 50 mm. Nástroj byl určen k ohybu plechu do požadovaného profilu plechu. Širší nástroj by tvářecí proces urychlil a nejspíše zpřesnil.

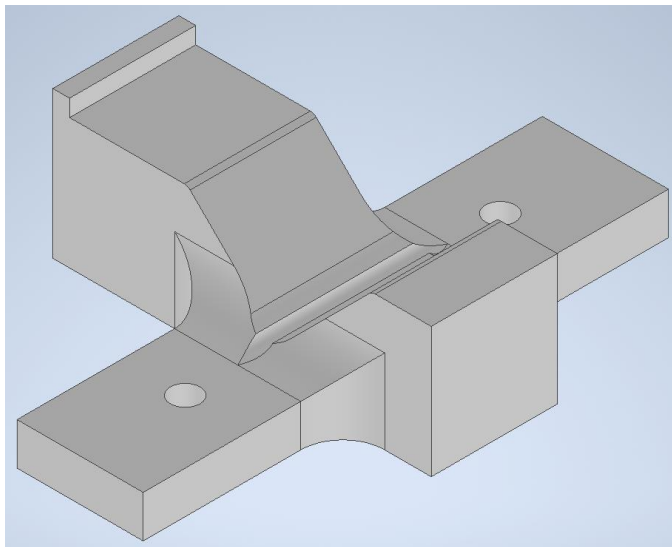


Obrázek 8: Model ohybníku druhého nástroje

Při návrhu ohybnice pro ohybník bylo potřeba myslet na offset. Offset je odsazení nástrojů vůči sobě, které je nutné, protože ohybník a ohybnice doléhají na ohýbaný plech, ne na sebe. Nástroje z plastu by neměly být citlivé na své odsazení. Odsazení obou ohybnic bylo navrženo pro nominální hodnoty ohýbaných plechů. Jak již bylo řečeno, tak pro ohybnici na hliníkové vzorky byl navržen výstupek pro zakládání a polohování vzorku. Tloušťka výstupku byla zvolena 4 mm a výstupek vyčnívá 4 mm nad tělo ohybnice. Přechod mezi tělem a podstavou nástroje byl vyřešen podobně jako u ohybníků zaoblením s poloměrem 10 mm.

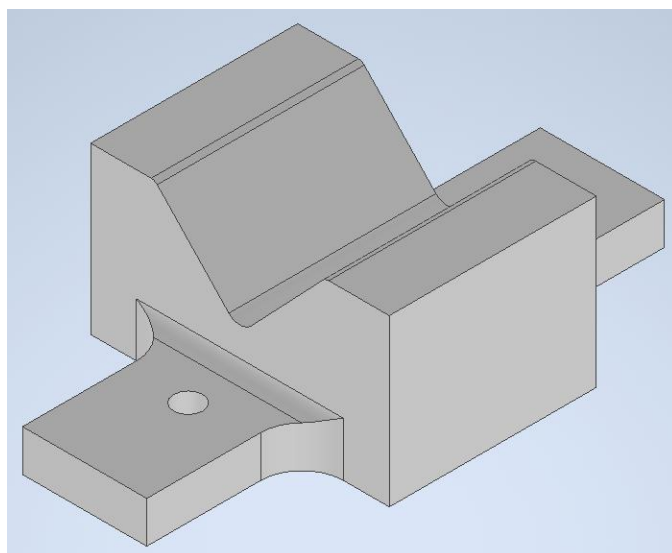
Jelikož se předpokládají velké síly a namáhání materiálu v případě ohybu hliníkových vzorků, tak se pro tuto ohybnici navrhla drážka zabírající přibližně třetinu poloměru dutiny ohybnice. Jelikož právě na vnější straně ohybu dochází

nejčastěji k porušení materiálu, tak byla snaha zmenšit namáhání v tomto místě. Poloměr zaoblení na vrchních hranách dutiny byl zvolen 2 mm.



*Obrázek 9: Model ohybnice prvního nástroje*

Ohybnice pro profilování ocelového plechu byla navržena bez drážky ve středu zaoblení dutiny, šířka odpovídala příslušnému ohybníku a ohybnice byla navržena bez výstupku. Poloměr mezi podstavou a tělem ve směru pracovního zdvihu nástroje byl zmenšen na 3 mm. Toto výrazné zmenšení bylo umožněno relativní robustností této ohybnice. Tělo ohybnice se totiž muselo zvýšit, aby při postupném ohýbání plechu nedošlo ke kontaktu plechu se šrouby.



*Obrázek 10: Model ohybnice druhého nástroje*

K nástrojům byli zhotoveny výkresy, které jsou součástí přílohy k této práci.

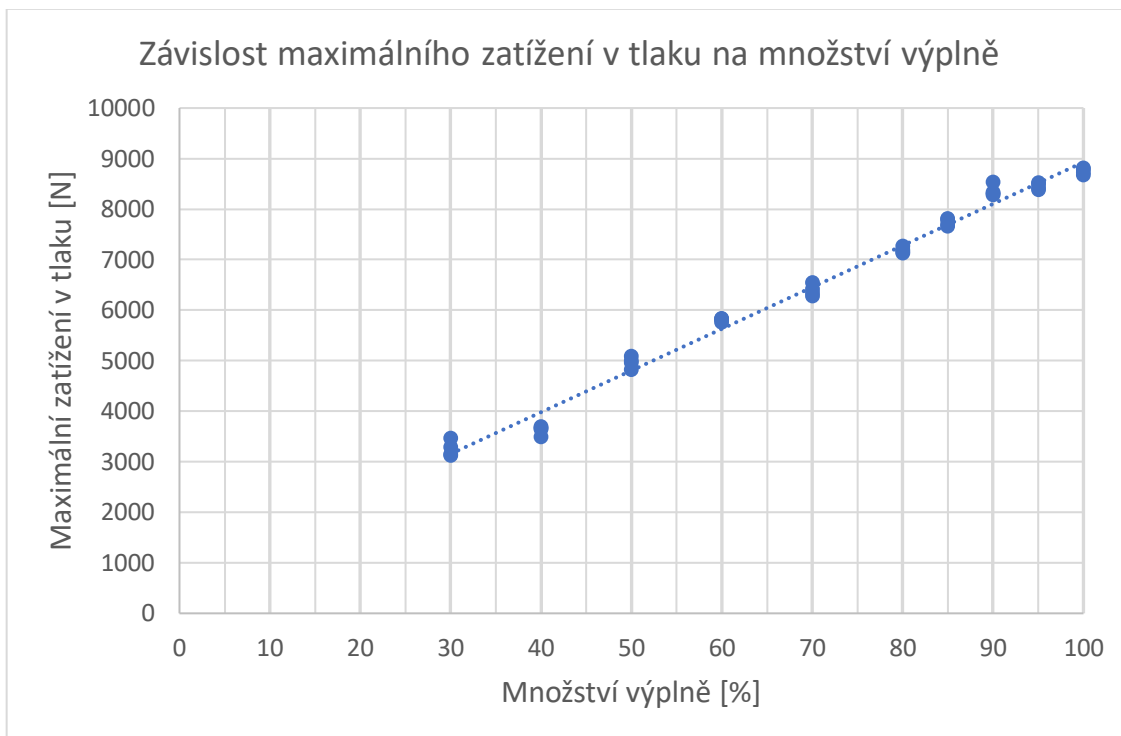
## 7.2 Tisknutí nástrojů

### 7.2.1 Mechanické zkoušky materiálů

Jako materiál nástrojů se zvolilo PLA od Creality. Výrobce udává pevnost v tahu 60 MPa. Tisková teplota pro PLA od Creality se pohybuje v rozmezí 195 až 210 °C. Průměr tohoto filamentu je  $1,75 \pm 0,03$ . Pro lepší poznání vlivu parametrů tisku a vlastností tohoto PLA se provedly tlakové a tahové zkoušky. [35]

Vzorky pro tlakovou zkoušku měly tvar krychle o straně 10 mm. V první řadě se testoval zejména vliv množství výplně. Oblast množství výplně, která byla v kontextu ohýbacího nástroje zajímavá byla od 30 % po 100 %. V tomto rozsahu množství výplně bylo zkoušeno 10 typů vzorků s tím, že se každá zkouška opakovala čtyřikrát, aby se snížil vliv náhodných chyb v měření nebo vzorcích. Od 30 % do 80 % bylo množství výplně odstupňováno po 10 % a od 80 % do 100 % bylo odstupňováno po 5 %. Zvoleným typem výplně byla plástev. Nastavená výška vrstev byla 0,3 mm. Vzorky se tiskly se třemi perimetry a plnými spodními a vrchními vrstvami.

Přesnost výšky vzorků kolísala v řádu několika setin milimetru, což je pro účely ohýbacího nástroje postačující. Výtisky s nejmenším množstvím výplně vydržely zatížení přibližně 3 kN. Do 90 % procent roste pevnost v tlaku téměř lineárně. Od 90% výplně se už maximální zatížení téměř nemění a ustaluje se okolo hodnoty 9 kN. Rozptyl hodnot při opakování zkoušek byl většinou okolo 150 N. Nejvyšších hodnot dosahovaly vzorky se 100 % množství výplně. Cena filamentu k výtisku těchto vzorků nepřesáhla 20 Kč. V následujícím grafu jsou vynesena data z měření.



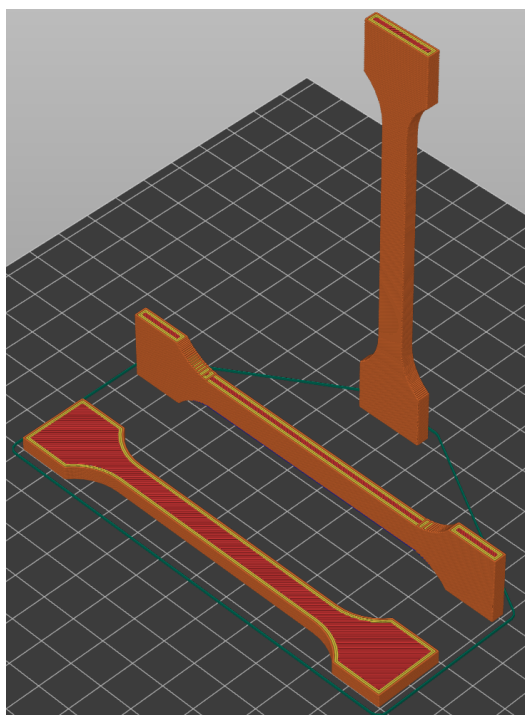
Obrázek 11: Závislost maximálního zatížení v tlaku na množství výplně

V dalších zkouškách se testoval vliv výšky vrstvy. Celkem se testovalo 6 vzorků v sadách se třemi opakováními. Typem výplně byla plástev a množství výplně bylo 50 %. Tryska měla průměr 0,4 mm. Nejnížší testovaná výška byla 0,05 mm a nejvyšší byla 0,3 mm. Rozptyl hodnot v jednotlivých sadách byl okolo 200 N. Při výšce vrstvy 0,05 mm bylo maximální zatížení okolo 6,1 kN. Od 0,05 mm do 0,1 mm byl naměřen pokles maximálního zatížení na hodnotu okolo 5,6 kN. Pro vyšší vrstvy byl naměřen skokový nárůst maximálního zatížení. Maximální zatížení mělo poté téměř konstantní charakter a pohybovalo se okolo 6,5 kN. Hledání příčiny vzniklého zlomu ve zkoumané závislosti by muselo být předmětem hlubšího bádání. Lepší vlastností vyšších vrstev jsou však příznivé kvůli urychlení tisku. V následujícím grafu jsou vynesena naměřená data.



Obrázek 12: Závislost maximálního zatížení v tlaku na výšce vrstvy

V tahových zkouškách se testovala pevnost v tahu při tisknutí vzorků v různých směrech orientace vzorků vůči tisknuté podložce. Zkoušely se tři typy vzorků v sadách po třech opakování. Všechny vzorky měly plnou přímočarou výplň, 3 perimetry, výšku vrstvy 0,3 mm. Zkušební tělesa se lišily pouze ve směru orientace tisku. Výsledné pevnosti v tahu poměrně silně kolísaly. Rozptyl se při opakování pohyboval okolo 10 MPa. Nejhůře vycházely dle očekávání vzorky tisknuté ve stoje. Ty měly v průměru pevnost v tahu 36 MPa. To je pokles o 40 % od pevnosti v tahu udávané výrobcem. Vzorky tisknuté na hraně a na plochu měly podobné pevnosti v tahu, které se v průměru pohybovaly okolo 52 MPa. Je to menší pokles, ale pořád je to poměrně významný pokles o 13,3 % od hodnoty udávané výrobcem. Tento pokles je nejspíš důsledkem vad v tisku. Pevnost filamentu udávaná výrobcem nejspíše byla pevnost v tahu samotné tiskové struny. Vzorky na plochu vycházely v průměru o trochu lépe, ale tento rozdíl je vzhledem rozptylu hodnot zanedbatelný, protože je o řád menší. V následujícím obrázku jsou ukázky orientací tisku vzorku pro tahovou zkoušku. Vlevo je orientace na plochu, uprostřed je orientace na hraně a napravo je orientace ve stoje.



Obrázek 13: Ukázka orientací vzorků pro tahovou zkoušku



Obrázek 14: Záběr z tahové zkoušky

## 7.2.2 Tiskové parametry nástrojů

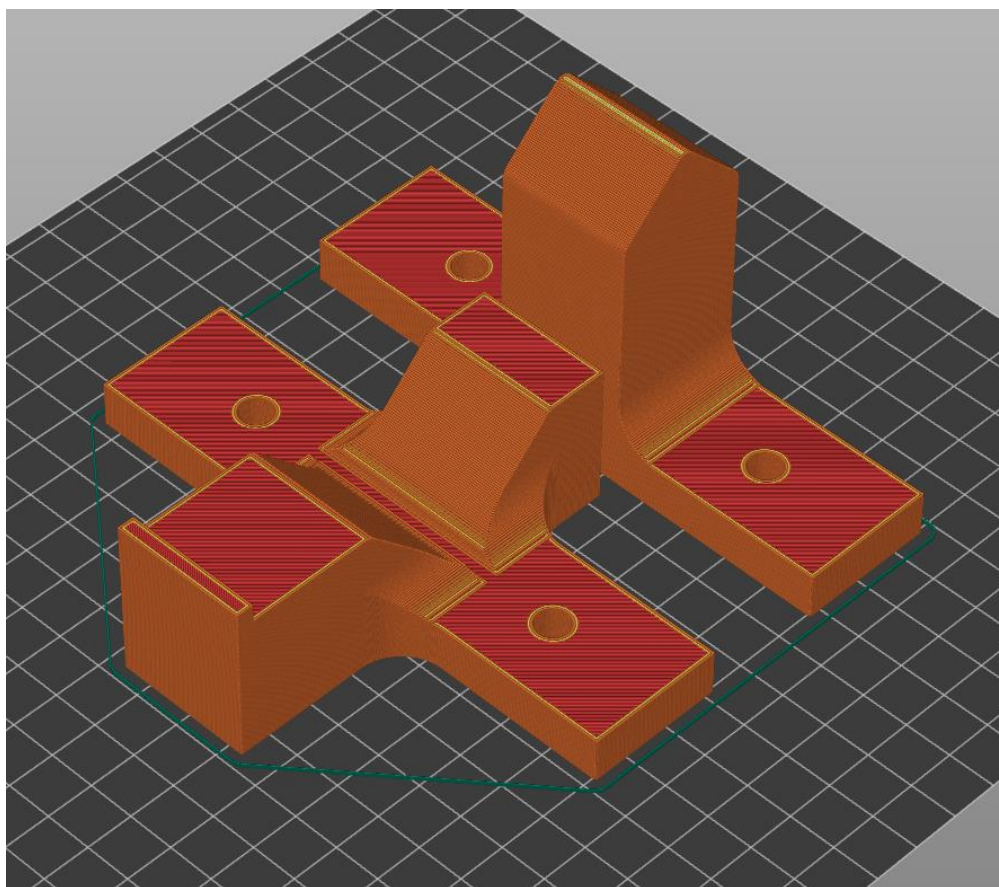
Pro nástroj na ohyb hliníkového plechu s tloušťkou 4 mm bylo potřeba, aby byl nástroj co nejrobustnější. Jedná se o tlustý plech a předpokládalo se dle výpočtů z numerické simulace, že tvářecí síla potřebná k ohybu tohoto polotovaru se bude přibližovat hranici použitelnosti navržených nástrojů při zvoleném materiálu nástrojů a podmínkách, při kterých měl být ohyb prováděn. Byla zvolena plná výplň s přímočarým vzorem. Výška vrstvy byla 0,3 mm. Tisklo se se třemi perimetry a průměrem trysky 0,4 mm. U nástroje na ohyb materiálu HX180BD s tloušťkou 0,7 mm se nepředpokládala velká tvářecí síla, proto se množství výplně snížilo na 50 % pro ušetření času tisku. Vzor výplně zůstal přímočarý a ostatní parametry zůstaly také stejné.

Nástroje se tiskly směrem od podstavy k tělu nástroje. Tvářecí síly při této orientaci působí ve směru tisku, což je nejméně příznivý směr působení. Vzniklá schodovitá struktura na funkčních plochách nástroje je také více opotřebovávána kvůli menší ploše kontaktu s ohýbaným polotovarem. Jedním z důvodů, proč se i přes tyto nevýhody zvolil tento směr tisku bylo praktické zkoušení významnosti těchto nepříznivých vlivů. Dále se předpokládalo, že pevnost v tlaku nebude tak výrazně ovlivněna slabším spojením mezi jednotlivými vrstvami jako pevnost v tahu. Snížení pevnosti je v případě ohybu tlustějšího vzorku kompenzováno plnou výplní. Jelikož tento směr tisku pro oba nástroje nevyžaduje žádné podpory, tak se tímto výrazně nenavýšuje tiskový čas ani cena nástroje. U nástroje na profilování tenkého plechu už plná výplň zvolena nebyla kvůli nižším nárokům na nástroj. Předpokládalo se také, že vzhledem k pružné deformaci nástrojů nebude silnější opotřebování nástrojů rozhodující faktor v přesnosti ohybků. Zvolený směr tisku má také výhodu v přesnějších dírách pro upínací šrouby, které mohly být hladké, a tedy bez vrubů.

Obrys kolem výtisku se tiskl podle základního nastavení konfigurace tiskárny. Zrcadlová podložka tiskárny se před tiskem nanasla 3D lakem, což je sprej, který umožňuje lepší fixaci výtisku s tiskovou platformu, takže nedojde ani při tisknutí větších výtisků k oddělení výtisku od tiskové platformy. Ohybnice nástroje na hliníkový tlustší plech se tiskla 4 hodiny 2 minuty a příslušný ohybník



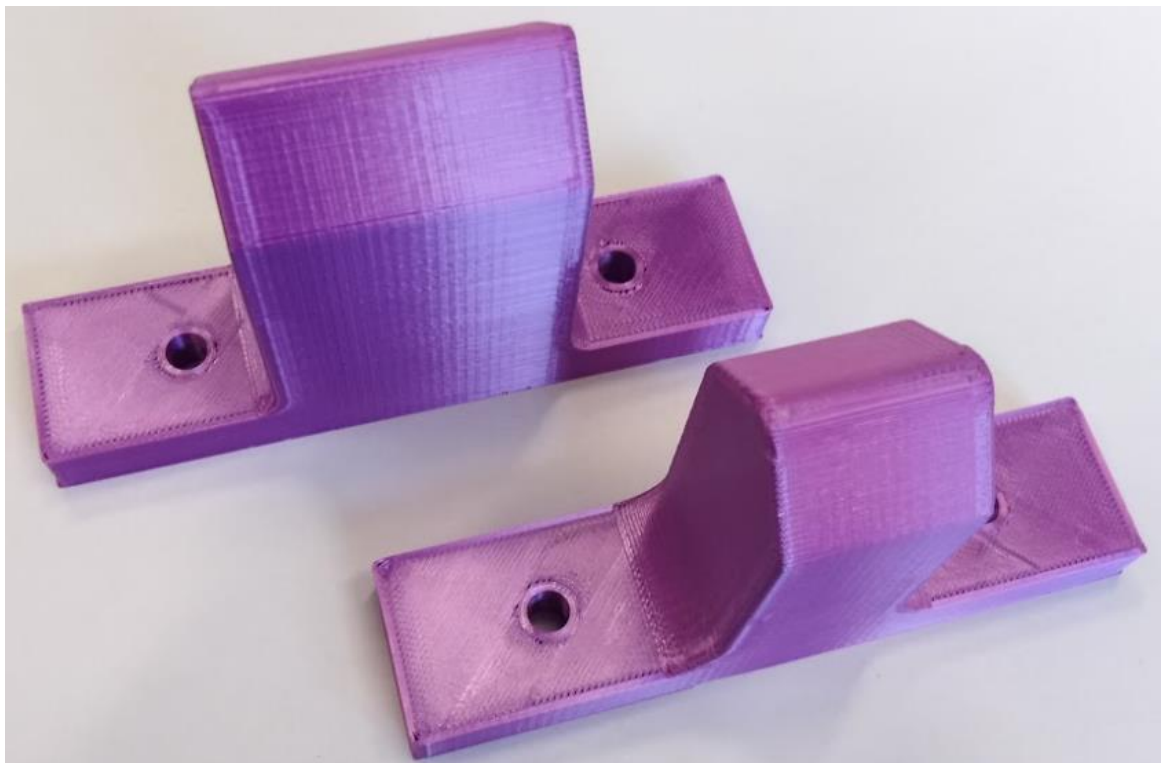
3 hodiny 35 minut. Ohybnice nástroje na ocelový plech se tiskla 3 hodiny 43 minut a příslušný ohybník se tiskl 3 hodiny 15 minut.



*Obrázek 15: Ukázka naslicovaného nástroje na hliníkový plech*



Obrázek 16: Vytisknuté ohybnice na hliníkový plech (vpravo) a na ocelový plech (vlevo)

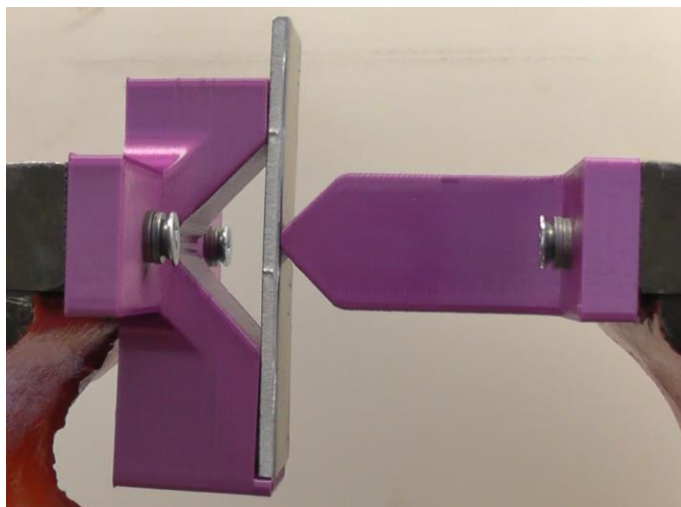


Obrázek 17: Vytisknuté ohybníky na hliníkový plech (vpravo) a na ocelový plech (vlevo)

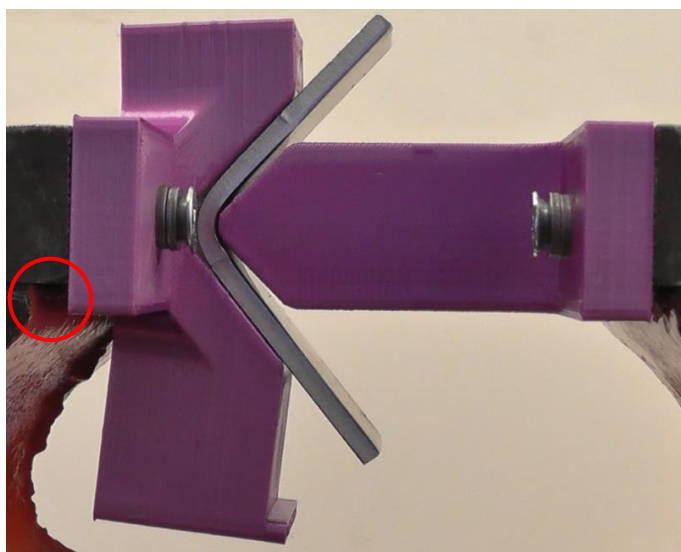
## 7.3 Zkoušky nástrojů

### 7.3.1 Ohýbací nástroj č. 1 pro materiál EN AW 6063

Prvně se ověřoval návrh ohýbacího stroje pro hliníkové vzorky. Celkem se ohýbalo 5 vzorků a při zkoušce se pořizoval video záznam k zpětné analýze. Vzorky se nejprve postavily na výstupek a přidržovaly se, zatímco se stahoval svěrák, dokud se vzorku lehce nedotkl tak, aby se vzorek nemusel přidržovat, ale zároveň aby se s ním bylo možno ještě posouvat. Následně se vzorek vycentroval na střed nástroje a stahováním svěráku se provedl ohyb. Ke stahování svěráku musela být vyvinuta poměrně velká síla. Tento způsob ohybu by se tady za zkoušených podmínek nehodil pro ohyb mnoha kusů nejen kvůli produktivitě, ale také kvůli fyzické náročnosti tohoto procesu. Tento problém by však bylo poměrně lehké vyřešit prodloužením ramene, které ovládá stahovací šroub svěráku například dočasným nasazením trubky na toto rameno.



Obrázek 18: Horní úvrať pracovního zdvihu



Obrázek 19: Dolní úvrať pracovního zdvíhu

Při dolní úvrati docházelo k výraznému rozevírání ohybnice a to zejména v její dolní části. Výraznější ohyb v dolní části si lze vyložit nesymetrickým charakterem čelisti na které je nástroj upnut. To má za následek to, že část podstavy, za kterou je ohybnice upnuta, nedoléhá na čelist. To v dolní části ohybnice způsobuje výraznější ohyb nástroje. Problémová oblast je na obrázku dolní úvrati zvýrazněna červeným kruhem. Vzorky se neohýbaly přesně ve středu. To by mohl být další důsledek nerovnoměrného průhybu. Ohybnice se ale prohýbá i v horní části ohybnice. To se děje protože ohýbaný materiál tlačí na ohybnici nejvíce na kraji dutiny a tím vytváří ohybový moment. Čelist na straně ohybníku také není vůči upnutí symetrická. Namáhání ohybníku je však koncentrované ve špičce nástroje a nevytváří tedy vůči středu nástroje rameno nutné pro vznik ohybového momentu. Kvůli průhybu ohybnice nebyly schopny obě části nástroje dosednout na vzorek a jedná se tedy o prostý ohyb bez ražení.



Obrázek 20: Srovnání vzorků

Tabulka 4: Úhly ohybu vzorků

Číslo vzorku	1	2	3	4	5
Úhel ohybu [°]	101	102	102,5	106	102,5

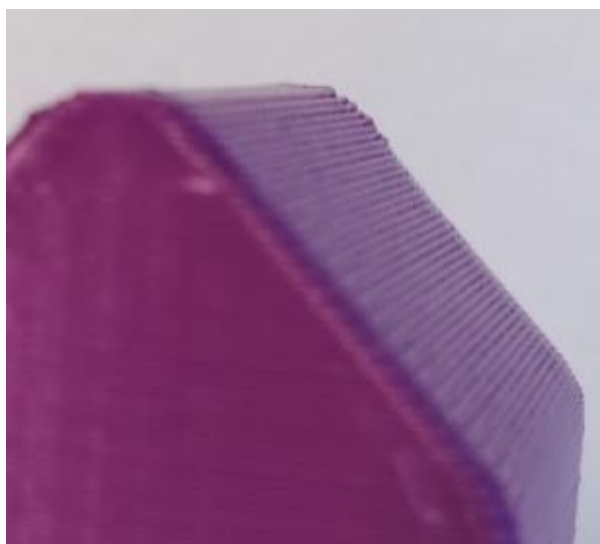
K vyhodnocení výsledného úhlu ohybu byly hrany vzorku obkresleny na papír a následně změřeny úhloměrem s rozlišením 0,5°. Vzhledem k očekávané přesnosti ohybu mělo toto rozlišení v prvotním návrhu tohoto nástroje stačit. Vzorky se neohýbaly přesně ve středu vzorku. To by mohl být další důsledek nerovnoměrného průhybu ohybnice.

Při ohybu čtvrtého vzorku bylo z videozáznamu zřejmé, že nebyl proveden úplný pracovní zdvih. Tento problém by nenastal kdyby byl nějakým způsobem nastaven doraz. Dalším řešením by mohlo být označení místa, kam až se má s ramenem svěráku otočit. Rameno je tvořeno trubkou v posuvném uložení, takže správná absolutní poloha dolní úvrati by musela být zřejmá alespoň v rozmezí 180°. Tvářecí síla ke konci tvářecí operace narůstá. Z tohoto důvodu by nejspíš nebyl problém absolutní polohu ramene v dolní úvrati v intervalu 180° poznat. Pokud by tedy nedošlo k porušení materiálu či nástroje, tak silnější utáhnutí svěráku vadit nebude. Otázkou je jestli je to v pořádku z hlediska bezpečnosti. PLA je totiž sice poměrně pevný ale křehký materiál a pod velkým napětím by mohl potenciálně prasknout takovým způsobem, že ohrozí zdraví pracovníka.

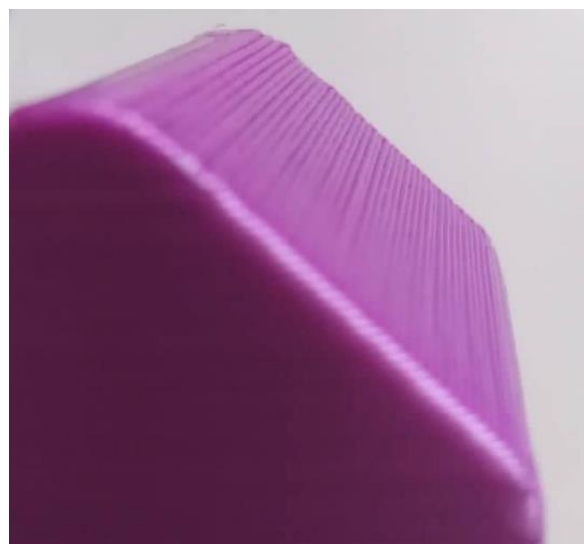
Při prvním ohýbání pomocí 3D tisknutého nástroje vzniká největší opotřebení. Míra opotřebení poté ostře klesá. První vzorek měl tedy největší úhel

ohybu  $101^\circ$ . Druhý, třetí a pátý vzorek ukazovaly už hodnoty víceméně ustálené. Čtvrtý vzorek sice ukazuje úskalí použité metody ale není reprezentativní. Navíc by se mohl lehce opět vložit do svěráku a dohnout na hodnotu blízkou ostatním vzorkům. Úhel ohybu je tedy poměrně konzistentní. Úhly ohybu se ale od navrženého úhlu  $90^\circ$  výrazně liší. Tato odchylka hodnot od navrženého úhlu ohybu nastala hlavně kvůli již zmíněnému průhybu nástrojů a při další iteraci návrhu nástroje by bylo potřeba tento problém vyřešit nebo kompenzovat. Problém by se nejspíše vyřešil úplným podložením ohybnice. K tomuto účelu by se mohla vyrobit či zakoupit dostatečně široká čelist. Pokud by se rozhodlo průhub kompenzovat, tak by se v dalším návrhu zmenšil navržený úhel ohybu a zvýšila tuhost nástroje zvýšením podstavu.

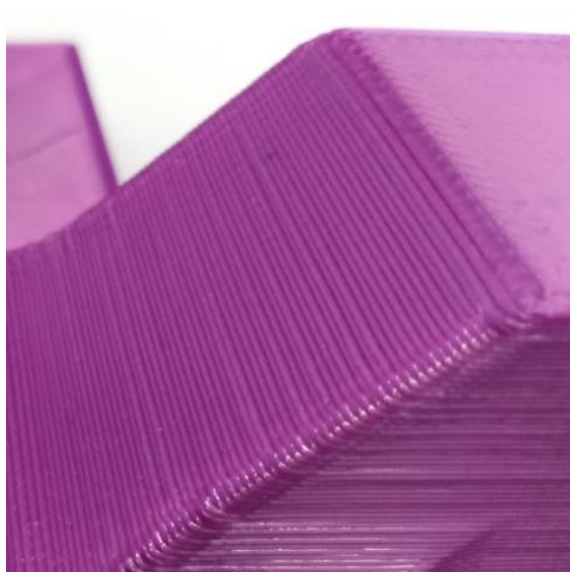
Na ohybnici jsou zezadu vidět rýhy, které vznikly při jejím průhybu přes hranu čelisti svěráku. Největší opotřebení bylo ale na vstupní hraně dutiny ohybnice a na špičce ohybníku. Při další úpravě návrhu by zdvojnásobil poloměr vstupní hrany ohybnice a pokud by to bylo možné, tak by se také zmenšil poloměr u špičky ohybníku. V oblasti okolo vstupní hrany ohybnice dochází k výraznému tření, které má za následek opotřebení. Při větším poloměru by se opotřebení rozložilo na více vláken. V následujících obrázcích jsou detaily hran po výtisku a po ohybu pěti vzorků. Opotřebení je nejvíc patrné v stlačení vrchních vrstev oproti předešlým. V opotřeбенých místech dochází k poklesu drsnosti povrchu.



*Obrázek 21: Detail ohybníku před experimentem*



*Obrázek 22: Detail ohybníku po experimentu*



*Obrázek 23: Detail ohybnice před experimentem*

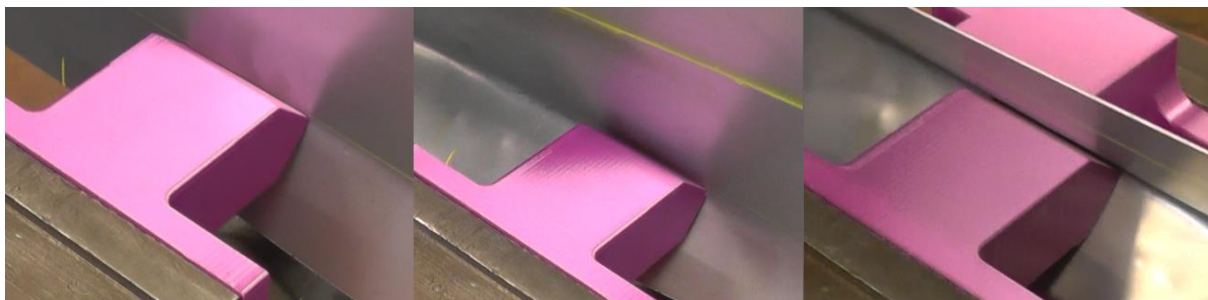


*Obrázek 24: Detail ohybnice po experimentu*

Mimo poškození na povrchu nástrojů nebyly nástroje nijak trvale poškozené. Průhyb nástrojů byl tedy pružný. K hlubšímu poznání vlivu opotřebení na úhel ohybu by bylo třeba provést zkoušku s více vzorky. Na druhou stranu se tento typ nástroje hodí více do kusové výroby, kde by bylo například zapotřebí vyrobit jednorázově pouze 5 ohybků tohoto typu.

### 7.3.2 Ohýbací nástroj č. 2 pro materiál HX180BD

Druhý nástroj se týkal ohýbání plechu HX180BD do U-profilu. V rámci přípravy druhé zkoušky se nastříhal na pákových nůžkách vybraný plech na rozměry 500x180. Následně se narýsovaly fixem čáry 50 mm od okraje k navádění nástroje při ohýbání plechu. V průběhu tohoto experimentu byl také pořizován videozáznam k zpětné analýze.



Obrázek 25: Průběh profilování

Plech se ohýbal postupně v několika progresivně větších úhlech ohybu, aby se co nejvíce omezilo zvlnění materiálu. V kombinaci s poměrně krátkou délkou nástroje bylo profilování plechu poměrně zdlouhavé a celkově zabralo přibližně 30 minut. Při ohybu nedocházelo k tak výraznému průhybu nástrojů jako u první zkoušky. Pro porovnání byl také ohnut stejný profil na konvenční ohýbačce za přibližně desetinu času.



Obrázek 26: Ohýbání profilu na konvenční ohýbačce





*Obrázek 27: Porovnání profilů*

Výsledný profil má v průměru větší úhel ohybu než  $90^\circ$ . Protože se ohyb prováděl nerovnoměrně, a tak se plech poměrně výrazně zvlnil. Zvlnění je také způsobeno nedokonalým sledováním předkresleného místa ohybu nástrojem. Kvalita konečného profilu je silně závislá na zručnosti pracovníka. Na obrázku se ohýbalo pravé rameno jako druhé a lze poznat jisté zlepšení v konzistenci ohybu a ve zmenšené vlnitosti. To, že byly plastové nástroje měkčí nezabránilo poškození povrchu.

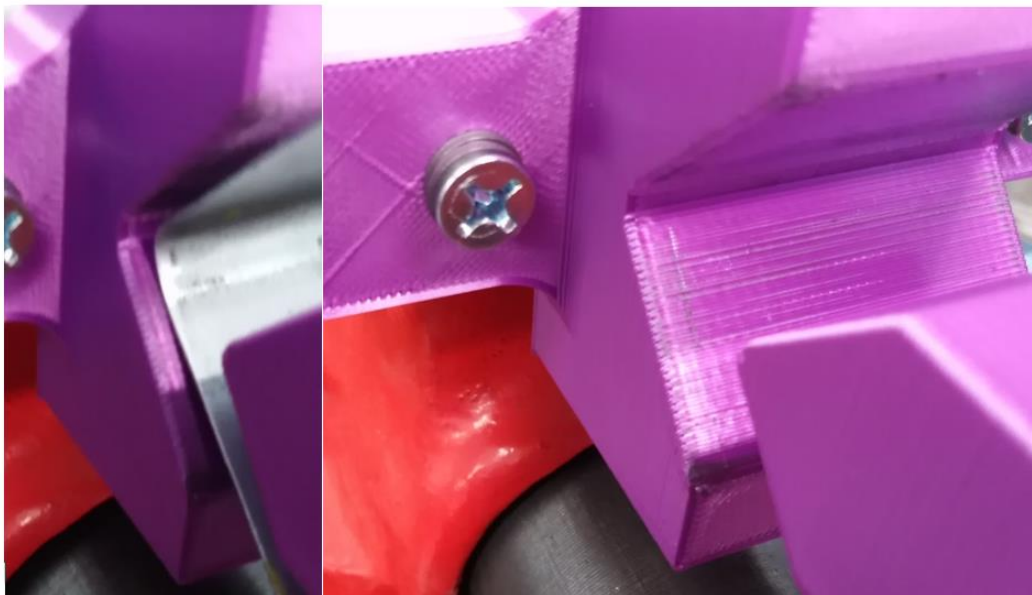


*Obrázek 28: Defekty na ohýbaném profilu*

Na tomto obrázku ukazujícím profil zespoda lze vidět mnoho škrábanců, které byly vytvořeny při posouvání plechu do nadcházející pozice pro další pracovní zdvih. Kromě zhoršení vzhledu by tyto škrábance mohly negativně ovlivnit odolnost vůči korozi. Tento plech byl zároveň pozinkován a je možné že se při profilování poškodila povrchová vrstva. Na obrázku lze také pozorovat dutiny, které byly nejspíše vytvořeny nedokonalým přidržováním plechu.

Výsledný profil by se rozhodně nehodil pro estetické účely a je otázkou, jestli by vůbec byl použitelný pro funkční účely. Tato metoda se obecně nehodí na takto jednoduché profily. Úpravou nástroje lze totiž například vytvořit vyosený nástroj, který by byl schopen provést ohyb v jinak neproveditelných místech. I neupravený nástroj však může poskytovat větší tvůrčí svobodu v tvaru ohybku. Profil byl také na tuto šířku nástroje moc dlouhý. Čím je poměr mezi šířkou nástroje a délkou profilu menší, tím více vzniká prostoru pro chyby a nedokonalosti. V ideálním případě by měl být nástroj stejně široký jako délka profilu. Pak lze provést operaci mnohem rychleji a pouze na jeden pracovní zdvih. Navíc odpadají problémy s vadami vznikajícími při posouvání a přidržování.

Opotřebení špičky nástroje se u tohoto nástroje nezkoumalo. Bylo však zpozorováno, že při ohýbání na kraji plechu se otřep plechu vryl do nástroje a zanechal rýhu. Je nepravděpodobné, že toto nějakým způsobem ovlivnilo kvalitu ohybků, ale rýha představuje vrub, který by mohl snižovat maximální životnost nástroje. V další iteraci návrhu tohoto nástroje by se zmenšil úhel ohybu. Také by se přidal výstupek, který by usnadnil a zpřesnil počáteční ohyby.

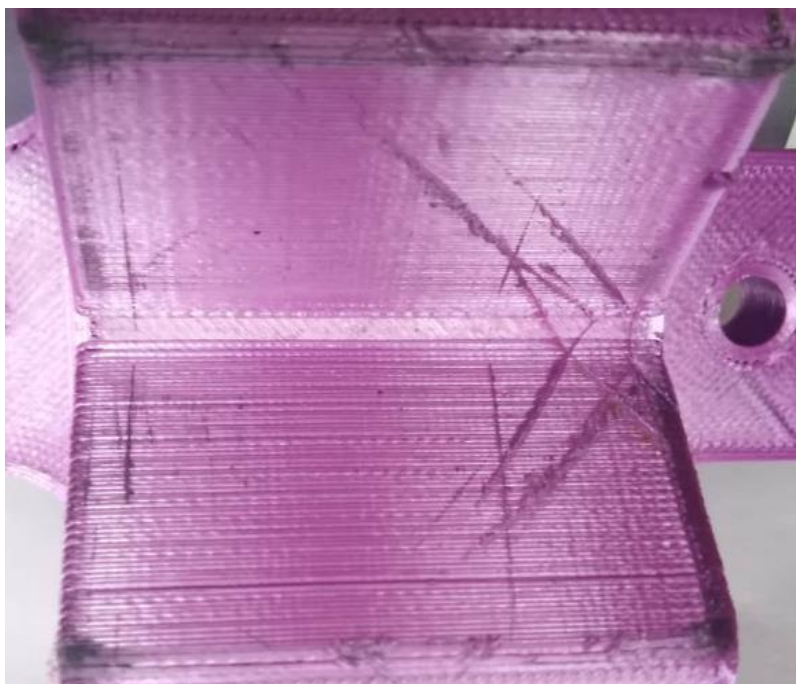


*Obrázek 29: Poškození nástroje otřepem na hraně plechu*

### 7.3.3 Destrukční zkoušky ohýbacího nástroje na tenký plech

Nástroje jsou sice navrženy na jeden účel, ale volnost v návrhu tvaru umožňuje provést i složité nebo nezvyklé ohyby. Vzhledem k metodice ohybu je teoreticky možné navrhnout univerzální nástroj pro nepřesné, ale tvarem členité, ohyby. Druhý nástroj k takovému účelu navrhnout nebyl, ale členitými ohyby se zrychlí a zvýrazní opotřebení, které může při ohýbání touto metodou nastat. Zkoušky také ukázaly možné úskalí této metody. Pro členité ohyby by byl vhodnější první nástroj, jelikož je kratší a má větší množství výplně, což by mu nejspíše umožnilo lépe odolat otláčení hran. Zkušební výstřížek z plechu byl ze stejného materiálu jako v druhé zkoušce.

Nejprve byl proveden ohyb v rohu výstřížku. Celkem byl proveden třikrát. Rohy plechu se začínají ohýbat později než rovné části. K vytvoření ohybového momentu se totiž musí hrana plechu opřít o ohybnici. Pokud by se vytvářel členitý ohyb na několik pracovních zdvihů s proměnnou hloubkou, tak by neměl ohyb zasahovat do rohů, protože ty se v prvních ohybech neohnou. Otřepy v rozích zanechaly viditelné rýhy na ohybnici. Tyto rýhy byly mnohem výraznější než rýhy vytvořené otřepy při ohýbání v druhé zkoušce. Výraznější byly nejspíše kvůli nerovnoměrnému ohybu.



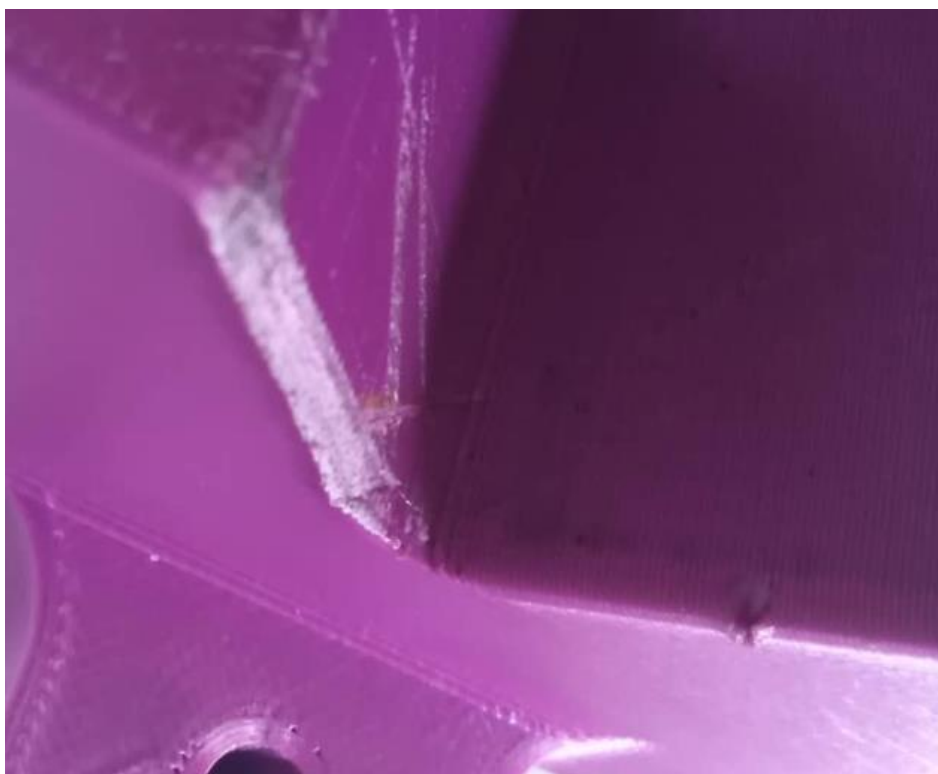
Obrázek 30: Poškození nástroje při ohybu rohu

Poté se zkoušel ohnout v plechu půlkruh vedený ze dvou předešlých ohnutí v rohu. Půlkruh nebyl přesný a jeho ohnutí způsobilo nerovnoměrné zvlnění plechu. I se specializovaným nástrojem by ohyb nejspíše nebyl vyhovující. Účel této zkoušky byl ale hlavně v simulaci opotřebení způsobené nedokonalé přímým ohybem. V rozích nástrojů vznikly otláčením otřepy.

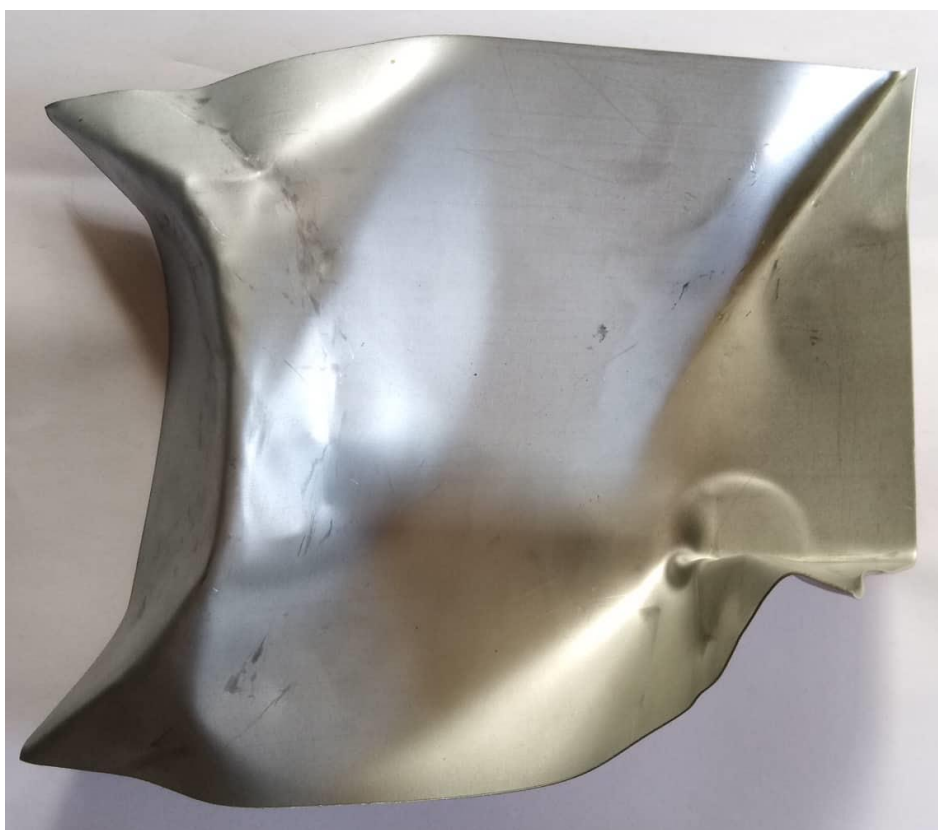


*Obrázek 31: Otláčení rohů nástroje*

Účelem poslední zkoušky bylo nástroj co nejvíce poškodit. Přibližně 70 mm od jednoho rohu se dvakrát plech ohnul. Při druhém ohnutí se výrazně otláčil ohybník a roh se zvedl téměř kolmo vzhůru. Tento roh se vložil do nástroje způsobem, který roh kroutil. Při kroucení se plech do ohybnice na jedné straně zaryl a na straně druhé značně otláčil boční hranu. Nástroj se sice poškodil, ale nezničil a bylo by jím nejspíše možné ohýbat se srovnatelnou kvalitou ohybků. Nástroj i ohybek se špinily. To mohlo být způsobeno nedostatečnou čistotou plechu nebo poškozením povrchové vrstvy plechu. Špína se ukládá hlavně ve spárách mezi vrstvami nástroje a je obtížně odstranitelná.



Obrázek 32: Poškození hran nástroje



Obrázek 33: Plech po destrukční zkoušce nástrojů

## 8 Závěr

Byli navrženy celkem dva ohýbací nástroje. Výsledné ohybky sice nevyhovovaly, ale z provedených zkoušek vyplývá směr dalšího vývinu těchto 3D tištěných nástrojů. Obecně lze říct, že by se měly co nejvíce zvětšit poloměry v rozích nástroje. Dále by se měl zvětšit nástroj v ose Z, nebo by se měla vyměnit čelist svěráku z důvodu podpory tvářecích nástrojů. Tato metoda ohybu je použitelná pro kusovou výrobu, jelikož za správných podmínek je ohyb poměrně konzistentní. Tvar nástroje by musel nejspíše projít mnoha změnami, než by se dosáhlo uspokojivého výsledku, ale vývoj není drahý. Při ceně tohoto filamentu 449 Kč za kilogram tisknutí nástrojů stálo bez zahrnutí provozních nákladů 3D tiskárny celkem 181 Kč. Navíc vývoj nevyžaduje velkou odbornost při empirickém způsobu navrhování. Mnoho problémů, na které se v této práci narazilo by také stačilo vyřešit jednou. Pokud by se poté navrhoval nástroj pro jiný úhel ohybu, tak by byl vývoj mnohem rychlejší.

Zjištění potenciálu této metody pro výrobu většího počtu kusů je nad rozsah této práce. Při více pracovních cyklech by se mohly objevit další problémy. Například by se mohl rozšiřovat úhel ohybu nebo by mohl nástroj zničit únavou materiálu. Je také možné, že přesnost ohybu bude vždy v pracovních podmínkách kolísat v rozsahu jednoho i více stupňů. Lze však s jistotou říct, že tato metoda je použitelná a rozšiřuje možnosti použití 3D tiskárny. S vývojem 3D tisku a hlubším probádání této poměrně nové problematiky budou nástroje lepší a dostupnější. Tuto metodu ohýbání tedy má smysl zvážit a případně rozvíjet. Další vývoj by mohl probíhat s využitím numerických simulací ke snížení počtu neúspěšných návrhů. V navazujících zkouškách by se také mohly provádět destrukční zkoušky nástrojů pro zjištění rizika zranění operátora.

## Bibliografie

- [1] TONDINI, Fabio, Ulfar ARINBJARNAR, Alberto BASSO a Chris Valentin NIELSEN. 3D printing to facilitate flexible sheet metal forming production. *Procedia CIRP*. 2021, **103**, 91-96. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2021.10.014
- [2] NAKAMURA, Naotaka, Ken-ichiro MORI, Fumie ABE a Yohei ABE. Bending of sheet metals using plastic tools made with 3D printer. *Procedia Manufacturing*. 2018, **15**, 737-742. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2018.07.312
- [3] The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *CAD Computer Aided Design*. 2015, **69**, 65-89. Dostupné z: doi:10.1016/j.cad.2015.04.001
- [4] *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. In: . Praha: Prusa research a.s., 2019 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
- [5] PIRES, Ricardo. DLP vs SLA 3D printing technologies. In: *All3dp* [online]. 2019 [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/dlp-vs-sla-3d-printing-technologies-shootout/>
- [6] *3D printing speed* [online]. Sculpteo [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/3d-printing-speed-definition/>
- [7] *Layer thickness* [online]. Sculpteo [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/layer-thickness-definition/>
- [8] The performance of 3d printed polymer tools in sheet metal forming. *Metals*. 2021, **11**(8). ISSN 20754701. Dostupné z: doi:10.1016/j.cad.2015.04.001
- [9] DWAMENA, Michael. *Best print speed settings for 3D printing* [online]. In: . [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://3dprinterly.com/best-print-speed-settings-for-3d-printing/>

- [10] GAO, Xia. Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond. *Additive Manufacturing*. 2021, **37**. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101658
- [11] ARCEO, Facundo. 3D Filament Glass Transition Temperatures. In: *3D Solved* [online]. [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://3dsolved.com/3d-filament-glass-transition-temperatures/>
- [12] 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers*. 2022, **3**, 33-42. Dostupné z: doi:10.1016/j.susoc.2021.09.004
- [13] *3D printing* [online]. Dassault Systèmes, 2018 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/3D-printing>
- [14] KOTTURKAR, Shravan. How Does Post Processing Work in Metal 3D Printing?. In: *Rapid DMLS* [online]. 2021 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.rapiddmls.com/metal-3d-printing-post-processing/>
- [15] JONES, Gordon. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained. In: *All3dp* [online]. 2021 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>
- [16] LEAL, R. Additive manufacturing tooling for the automotive industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, **92**(5-8), 1671-1676. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-017-0239-8
- [17] RANE, Kedarnath a Matteo STRANO. A comprehensive review of extrusion-based additive manufacturing processes for rapid production of metallic and ceramic parts. *Advances in Manufacturing*. 2019, **7**(2), 155-173. ISSN 2095-3127. Dostupné z: doi:10.1007/s40436-019-00253-6
- [18] TONDINI, Fabio, Alberto BASSO, Ulfar ARINBJARNAR a Chris Valentin NIELSEN. The Performance of 3D Printed Polymer Tools in Sheet Metal Forming. *Metals*. 2021, **11**(8). ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met11081256
- [19] *Prusa Tabulka Materiálů* [online]. Prusa Research [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/cs/materials>



- [20] *TECHNICKÝ LIST Prusament PLA* [online]. Prusa Polymers, 2018 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: [https://prusament.com/media/2020/05/PLA\\_\\_TechSheet\\_\\_CZ\\_\\_22052020.pdf](https://prusament.com/media/2020/05/PLA__TechSheet__CZ__22052020.pdf)
- [21] *Best 3D Printer Filament – The Ultimate Guide* [online]. All3DP, 2021 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>
- [22] *Technický list Prusament PLA Recycled* [online]. Prusa Polymers, 2021 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://prusament.com/media/2021/12/technicky-list.pdf>
- [23] 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*. 2019, **79**, 143-146. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2019.02.030
- [24] *Technický list Prusament ASA* [online]. Prusa Polymers [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: [https://prusament.com/media/2018/09/ASA\\_\\_DataSheet\\_\\_CZE.pdf](https://prusament.com/media/2018/09/ASA__DataSheet__CZE.pdf)
- [25] *Technický list Prusament PC Blend* [online]. Prusa Polymers [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: [https://prusament.com/media/2018/09/PCBLEND\\_\\_TechSheet\\_\\_CZE.pdf](https://prusament.com/media/2018/09/PCBLEND__TechSheet__CZE.pdf)
- [26] *Technický list Prusament PC Blend Carbon Fiber* [online]. Prusa Polymers [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: [https://prusament.com/media/2021/06/PCB\\_\\_CF\\_\\_TDS\\_\\_CS-1.pdf](https://prusament.com/media/2021/06/PCB__CF__TDS__CS-1.pdf)
- [27] *TECHNICKÝ LIST Prusament PETG* [online]. Prusa Polymers [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: [https://prusament.com/media/2020/05/PETG\\_\\_TechSheet\\_\\_CZ\\_\\_22052020.pdf](https://prusament.com/media/2020/05/PETG__TechSheet__CZ__22052020.pdf)
- [28] ARCEO, Facundo. Infill Patterns; Which is the Strongest one for 3D printing?. In: *3dsolved* [online]. [cit. 2022-07-21]. Dostupné z:

<https://3dsolved.com/infill-patterns-which-is-the-strongest-one-for-3d-printing/>

- [29] SCHUH, Günther, Georg BERGWEILER, Philipp BICKENDORF, Falko FIEDLER a Can COLAG. Sheet Metal Forming Using Additively Manufactured Polymer Tools. *Procedia CIRP*. 2020, **93**, 20-25. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2020.04.013
- [30] NOVOTNÝ, Jiljí, Jan ŠANOVEC, Bohumír BEDNÁŘ a Viktor KREIBICH. *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-2351-6.
- [31] PALÁT, Hynek. *Dělení materiálu*. Opava, 2011. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/6540265-Zpusoby-deleni-materialu.html>
- [32] ČADA, Radek. *TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ A SLÉVÁNÍ – TEORETICKÝ ZÁKLAD: Ohýbání*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3015-5.
- [33] Slitina hliníku EN AW 6063. In: *Hliníkové profily Proal* [online]. NPS PROAL [cit. 2022-08-08]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-6063/>
- [34] *Higher-strength IF steels HX: Product information* [online]. In: . Thyssenkrupp Steel Europe, 2016 [cit. 2022-08-08]. Dostupné z: [https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content\\_1/publikationen/produktinformationen/if\\_hx/thyssenkrupp\\_if-hx\\_product\\_information\\_steel\\_en.pdf](https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/produktinformationen/if_hx/thyssenkrupp_if-hx_product_information_steel_en.pdf)
- [35] Creality tisková struna, CR PLA. In: *Crealitystore* [online]. [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://www.crealitystore.cz/produkt/creality-filament-ender-pla-kopirovat/>

# Seznam tabulek

TABULKA 1: SROVNÁNÍ FILAMENTŮ .....	19
TABULKA 2: SROVNÁNÍ VZORŮ VÝPLNĚ .....	26
TABULKA 3: SHRUTÍ MATERIÁLŮ VZORKŮ.....	40
TABULKA 4: ÚHLY OHYBU VZORKŮ .....	53

# Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: SCHÉMA TRYSKY .....	12
OBRÁZEK 2: VZORY VÝPLNĚ .....	25
OBRÁZEK 3: FÁZE OHYBU.....	33
OBRÁZEK 4: VLIV ODPRUŽENÍ NA ÚHEL OTEVŘENÍ .....	34
OBRÁZEK 5: MATERIÁL 6063 PRO PRVNÍ EXPERIMENT .....	40
OBRÁZEK 6: MATERIÁL HX180 BD PRO DRUHÝ EXPERIMENT.....	40
OBRÁZEK 7: MODEL OHYBNÍKU PRVNÍHO NÁSTROJE .....	41
OBRÁZEK 8: MODEL OHYBNÍKU DRUHÉHO NÁSTROJE.....	42
OBRÁZEK 9: MODEL OHYBNICE PRVNÍHO NÁSTROJE.....	43
OBRÁZEK 10: MODEL OHYBNICE DRUHÉHO NÁSTROJE .....	43
OBRÁZEK 11: ZÁVISLOST MAXIMÁLNÍHO ZATÍŽENÍ V TLAKU NA MNOŽSTVÍ VÝPLNĚ .....	45
OBRÁZEK 12: ZÁVISLOST MAXIMÁLNÍHO ZATÍŽENÍ V TLAKU NA VÝŠCE VRSTVY .....	46
OBRÁZEK 13: UKÁZKA ORIENTACÍ VZORKŮ PRO TAHOVOU ZKOUŠKU .....	47
OBRÁZEK 14: ZÁBĚR Z TAHOVÉ ZKOUŠKY .....	47
OBRÁZEK 15: UKÁZKA NASLICOVANÉHO NÁSTROJE NA HLINÍKOVÝ PLECH .....	49
OBRÁZEK 16: VYTISKNUTÉ OHYBNICE NA HLINÍKOVÝ PLECH (VPRAVO) A NA OCELOVÝ PLECH (VLEVO).....	50
OBRÁZEK 17: VYTISKNUTÉ OHYBNÍKY NA HLINÍKOVÝ PLECH (VPRAVO) A NA OCELOVÝ PLECH (VLEVO).....	50
OBRÁZEK 18: HORNÍ ÚVRAŤ PRACOVNÍHO ZDVIHU .....	51
OBRÁZEK 19: DOLNÍ ÚVRAŤ PRACOVNÍHO ZDVIHU.....	52
OBRÁZEK 20: SROVNÁNÍ VZORKŮ .....	53
OBRÁZEK 21: DETAIL OHYBNÍKU PŘED EXPERIMENTEM .....	55
OBRÁZEK 22: DETAIL OHYBNÍKU PO EXPERIMENTU .....	55
OBRÁZEK 23: DETAIL OHYBNICE PŘED EXPERIMENTEM .....	55
OBRÁZEK 24: DETAIL OHYBNICE PO EXPERIMENTU.....	55
OBRÁZEK 25: PRŮBĚH PROFILOVÁNÍ.....	56
OBRÁZEK 26: OHÝBÁNÍ PROFILU NA KONVENČNÍ OHÝBAČCE .....	56
OBRÁZEK 27: POROVNÁNÍ PROFILŮ .....	57
OBRÁZEK 28: DEFEKTY NA OHÝBANÉM PROFILU .....	57
OBRÁZEK 29: POŠKOZENÍ NÁSTROJE OTŘEPEM NA HRANĚ PLECHU .....	58
OBRÁZEK 30: POŠKOZENÍ NÁSTROJE PŘI OHYBU ROHU.....	59
OBRÁZEK 31: OTLAČENÍ ROHŮ NÁSTROJE .....	60
OBRÁZEK 32: POŠKOZENÍ HRAN NÁSTROJE .....	61
OBRÁZEK 33: PLECH PO DESTRUKČNÍ ZKOUŠCE NÁSTROJŮ .....	61

# Seznam příloh

PŘÍLOHA 1: VÝKRES OHYBNÍKU NÁSTROJE Č. 1

PŘÍLOHA 2: VÝKRES OHYBNICE NÁSTROJE Č. 1

PŘÍLOHA 3: VÝKRES OHYBNÍKU NÁSTROJE Č. 2

PŘÍLOHA 3: VÝKRES OHYBNICE NÁSTROJE Č. 2