

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

**Janů
Jan**

2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Janů	Jméno: Jan	Osobní číslo: 474838
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní		
Zadávací katedra/ústav:	Ústav strojírenské technologie		
Studijní program:	Výrobní inženýrství		
Specializace:	Bez specializace		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh jednoduchých 3D tištěných lisovacích nástrojů

Název diplomové práce anglicky:

Design of simple 3D printed stamping tools

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 konstrukčního řešení nástroje
- 3) Ověření funkčnosti navrženého řešení
- 4) Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Literatura:
ČSN EN ISO 527-1
ASM Handbook 14B
Základy 3D tisku
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vít Novák ústav strojírenské technologie FS

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

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

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

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2022**

Ing. Vít Novák podpis vedoucí(ho) práce	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc. podpis děkana(ky)
--	--	---

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____	_____
Datum převzetí zadání	Podpis studenta

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem jednoduchých 3D tištěných nástrojů pro lisování plechu. Práce ověřuje lisovatelnost dvou zadaných dílů pomocí numerické simulace a lisováním nástroji, které byly vyrobeny metodou Fused Filament Fabrication z materiálu PLA.

Klíčová slova:

3D tisk, výlisek, lisovatelnost, tváření za studena, tváření plechu

Abstract

This diploma thesis deals with the design of simple 3D printed tools for sheet metal stamping. This thesis verifies the pressability of two specified parts by numerical simulation and pressing with tools that were made by the Fused Filament Fabrication method from PLA material.

Keywords:

3D printing, pressed part, pressability, cold forming, sheet metal forming

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma **Návrh jednoduchých 3D tištěných lisovacích nástrojů** 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

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu Ing. Vítu Novákovi a Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D. za jejich odborné vedení a cenné rady při řešení mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Havelkovi za realizaci simulace lisování v softwaru Autoform. V neposlední řadě mé díky patří rodině a přítelkyni za podporu po celou dobu studia.

Obsah

1	Úvod	8
2	Plošné tváření	9
2.1	Úvod plošného tváření	9
2.1.1	Polotovary pro plošné tváření.....	9
2.1.2	Dělení plošného tváření.....	9
2.2	Teorie ohýbání plechu.....	10
2.2.1	Neutrální osa.....	10
2.2.2	Odpružení	11
2.2.3	Porušení materiálu při ohýbání.....	12
2.3	Způsoby ohýbání plechu	13
2.3.1	Prosté ohýbání	13
2.3.2	Ohraňování	14
2.3.3	Lemování.....	15
2.3.4	Zakružování.....	16
2.3.5	Rovnění	16
3	3D tištěné plastové nástroje pro tváření plechu.....	17
3.1	Použití	17
3.2	Materiály	19
3.3	Technologie.....	20
3.4	Výhody 3D tištěného ohýbacího nástroje	21
3.5	Nevýhody 3D tištěného ohýbacího nástroje	21
4	Výroba z materiálu PLA pomocí FFF	22
4.1	Obecné informace o filamentu PLA	22
4.2	Mechanické vlastnosti 3D tištěného PLA.....	22
4.3	Faktory ovlivňující mechanické vlastnosti 3D tištěného materiálu.	23
4.3.1	Orientace tisku.....	23

4.3.2	Tloušťka vrstvy	24
4.3.3	Výplň.....	24
4.3.4	Vliv rychlosti tisku a teploty trysky	26
4.3.5	Shrnutí vlivu parametrů tisk na mechanické vlastnosti výtisků.....	27
5	Experimenty s použitím 3D tištěných nástrojů	28
5.1	Ohraňování s vložkami z PLA a PC	28
5.2	Ohraňování s nástroji z PLA	28
5.3	Prosté ohýbání.....	29
6	Praktická část.....	30
6.1	Díl č.1 Krypt.....	30
6.1.1	Analýza dílu	30
6.1.2	Nástroje	31
6.1.3	Simulace	32
6.1.4	Tisk.....	36
6.1.5	Lisování.....	38
6.1.6	Shrnutí	40
6.2	Díl č.2 Plech příruby	43
6.2.1	Analýza dílu	43
6.2.2	Nástroje	45
6.2.3	Simulace	47
6.2.4	Tisk.....	51
6.2.5	Lisování.....	52
6.2.6	Shrnutí	57
7	Závěr.....	58
	Seznam obrázků	60
	Seznam tabulek	63
	Bibliografie	64

1 Úvod

Ve své diplomové práci se zabývám využitím plastového 3D tisku pro výrobu tvářecích nástrojů. V teoretické části popisuji základy plošného tváření a především proces ohýbání. Dále se věnuji technologii plastového 3D tisku a jeho možným uplatněním při výrobě ohýbacích nástrojů. V praktické části navrhuji plastové aditivně vyrobené nástroje pro lisování dvou zadaných součástí. Ověření funkčnosti je provedeno numerickými simulacemi a reálným lisováním.

V průmyslu je ohýbání plechu velmi častým procesem výroby. Podobně jako u jiných procesů tváření se při tváření plechu mění tvar polotovaru plastickou deformací při zachování objemu. Jednou z nejčastějších ohybových operací je ohýbání plechu mezi dvěma kovovými nástroji tvaru V. Tyto nástroje se používají kvůli možnosti získat různé úhly ohybu s pouze jednou sadou nástrojů. V dnešní době se automobilový i letecký průmysl zaměřuje více na specializovanou výrobu a má vyšší poptávku po menších sériových výrobcích. Právě pro menší série nebo kusovou výrobu se může jevit jako vhodné řešení použít 3D tištěné plastové nástroje, které je možné vyrobit rychle, levně a v podstatě kdekoliv. [1]

Standartní nástroj pro ohýbání plechu je vyroben z kovu. Nejvíce se používá nástrojová ocel, aby bylo možné dosáhnout dlouhé životnosti a stabilního ohýbacího výkonu. V případě zakázkové výroby, při které se velmi často mění například tloušťka polotovaru nebo tvar nástrojů, se nástroje z oceli nemusejí vyplatit. Z těchto důvodů se přibližně před třiceti lety objevila myšlenka rychlých nástrojů neboli rapidtooling. V poslední době, kdy se zvyšuje poptávka pro zkrácení výrobních časů, je nutné zefektivnit a zrychlit výrobu prototypů a nástrojů. Díky aditivním technologiím je možné rapidtooling realizovat a tyto procesy urychlit. [1]

2 Plošné tváření

2.1 Úvod plošného tváření

Plošné tváření je proces, který převážně probíhá za studena a při kterém se z většinou plechového polotovaru při minimální změně tloušťky a plochy vyrábí díly prostorového tvaru. Při plošném tváření jsou části přístřihu plechu deformovány pružně, což po odlehčení vede k jevu zvanému odpružení. Odpružení materiálu je geometrická nestejnorodost tvaru. [2] [3]

Díly vyrobené plošným tvářením se nazývají výlisky. Výlisky mohou být velkoplošné nebo s velmi malými rozměry. Charakteristickými znaky pro výlisky jsou nízká hmotnost, dobrá pevnost i tuhost a tvarová různorodost. Oproti svařencům a odlitkům lze dosáhnout 10-50 % úspory materiálu při 25-75 % pracnosti výroby. [2]

Výrobní postup výlisků obsahuje přípravné, tvářecí a dokončovací operace. Pro součást lisovanou z plechu začíná výrobní postup dělením výchozího plechu a následnými úpravami na požadovaný přístřih. Před samotným tvářením může předcházet nanášení maziva. Následuje proces tváření. Po tváření přichází na řadu čištění a úpravy po tváření, jako je odstranění přídavků a klempířské úpravy. Posledním krokem jsou dokončovací operace. Mezi ně se řadí např. děrování otvorů nebo povrchové úpravy. [2]

Výlisky mohou být určeny pro další operace jako jsou svařování nebo pájení, ale mohou být určeny přímo k montáži nebo na prodej jako hotové díly. [2]

2.1.1 Polotovary pro plošné tváření [2]

- Plech – V tabulích nebo svitkách
- Tenkostěnné profily – Tyče
- Trubky – Většinou s povrchovou úpravou a TZ

2.1.2 Dělení plošného tváření [2]

Podle deformace

- Deformace s místním porušením soudržnosti materiál
- Deformace tvárné, změna tvaru bez porušení soudržnosti

Podle lisařských operací

- Stříhání
- Ohýbání
- Tažení
- Tlačení

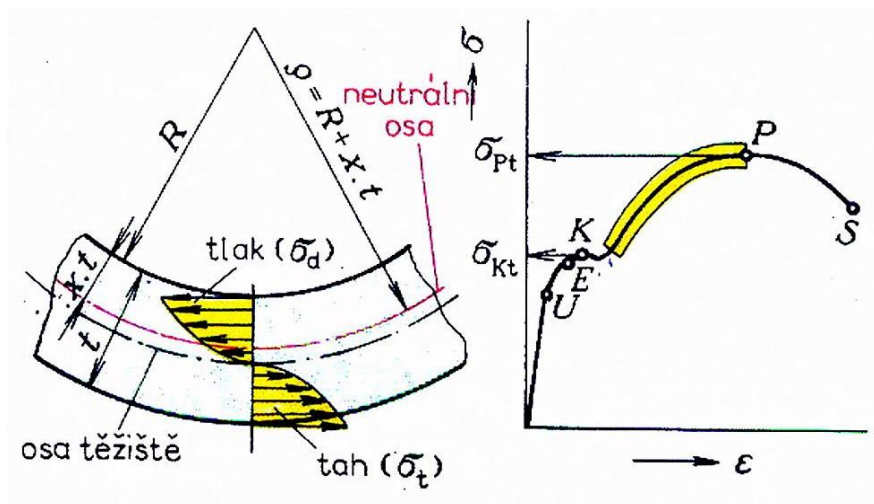
2.2 Teorie ohýbání plechu

Ohýbání je tvářecí proces, při kterém je materiál deformován do určitého úhlu ohybu se zaoblením hran bez podstatné změny průřezu. Nástroje na ohýbání jsou takzvaná ohýbadla sestávající se z ohybníku a ohybnice. Výrobkem ohýbání je výlisek ohybek. Pro dosažení žádoucího tvaru platí stejné zákony plasticity jako u jiných tvářecích operací. Pro dosažení trvalého ohybu je nutné být ohybovým napětím v oblasti mezi napětím na mezi kluzu a napětím na mezi pevnosti materiálu. Vzniklá plastická deformace je doprovázena deformací elastickou. Po průřezu je to elasticko-plastická deformace jejíž průběh se liší od povrchu materiálu k neutrální ose. [2]

2.2.1 Neutrální osa

Při tváření ohýbáním se deformuje průřez součásti. Na vlákna na vnitřní straně ohybu působí zejména tlaková napětí, a proto jsou tato vlákna v podélném směru stlačována a roztahována ve směru příčném. Vlákna na vnější straně ohybu jsou namáhána hlavně tahem, takže tato vlákna jsou v podélném směru roztahována a naopak stlačována ve směru příčném. V přechodu mezi částí materiálu namáhanou tlakem a částí namáhanou tahem se nachází takzvaná neutrální osa. Tato spojnice vláken bez napětí a bez deformace se při ohýbání ani nezkrátí, ani neprodlouží. Neutrální osa je před tvářecí operací uprostřed průřezu, při následném ohýbání se posouvá směrem k vnitřní straně ohybu. Neutrální osa není stejná jako osa těžiště součásti, viz obr. 1. [3]

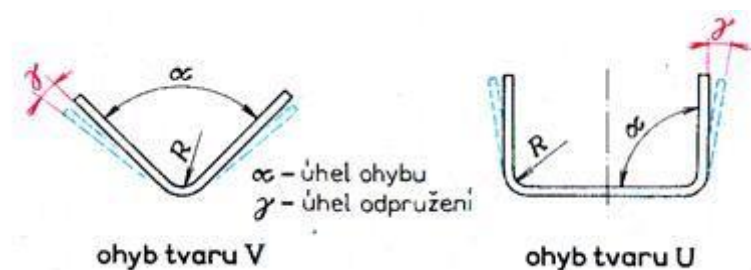
Díky délce neutrální osy s připočtením délky úseků, které nebyly ohýbány, je možné určit délku přístřihu před tvářením. [3]



Obr. 1 Schéma neutrální osy [3]

2.2.2 Odpružení

Při odlehčení po deformaci tělesa má materiál snahu vrátit se do původní tvaru. To je způsobeno vlivem pružné deformace v oblasti okolo neutrální osy. Jak moc se materiál vrátí do původního tvaru vyjadřuje úhel β případně γ neboli úhel odpružení, viz obr. 2. Čím je přístřih nebo ramena ohybu delší, tím více se úhel odpružení u ohybku projeví na celkové odchylce od požadovaného tvaru. Velikost úhlu β závisí na mnoha faktorech. Mezi ty nejdůležitější patří kvalita materiálu, tloušťka materiálu, úhel ohybu a v neposlední řadě způsob ohýbání. [2] [3]

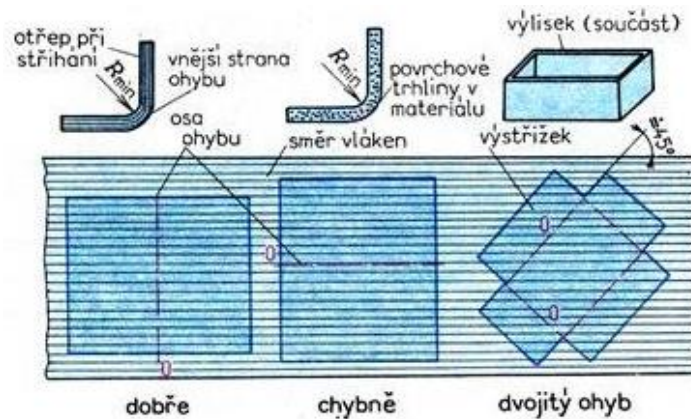


Obr. 2 Odpružení materiálu u V a U ohybu [3]

Odchylku tvaru materiálu díky odpružení lze řešit např. korekcí nástroje. Nástroj se navrhne s úhlem ohybu lišícím se od požadovaného úhlu o úhel odpružení. Další možností je zvýšení lisovací síly na konci tvářecího cyklu. Díky tomu dochází v místě ohybu k místní plastické deformaci a tím se hodnota odpružení snižuje. V neposlední řadě lze v některých případech přistoupit k mírné změně návrhu tvaru dílu. V místě ohybu může být navíc vylisováno vyztužovací žebro. Tato metoda však není vždy realizovatelná, protože nemusí být vhodné místo na ohybku, kam ono žebro umístit. [2] [3]

2.2.3 Porušení materiálu při ohýbání

Porušením materiálu se rozumí vznik trhlin na vnější straně a nastává v momentu, ve kterém dojde k překročení limitní hodnoty poloměru ohybu R_{\min} . Vliv na to má míra plastičnosti materiálu, stav materiálu a jeho povrchu (TZ, tvářený za studena nebo za tepla atd.), tloušťka plechu, způsob ohýbání a směr vláken po válcování plechu. Osa ohybu by neměla být rovnoběžná se směrem vláken plechu, jinak se zvyšuje riziko povrchových trhlin na materiálu. Minimální úhel, který by spolu měly osa ohybu a směr vláken svírat, je 30° . V případě dvojitého ohybu je vhodné, aby úhel mezi vlákny a osou ohybu byl 45° . Správně zvolená orientace je znázorněná na obr. 3. [3]



Obr. 3 Volba orientace směru vláken materiálu [3]

Orientační hodnoty R_{\min} pro ideální podmínky, kde t je tloušťka plechu [2]:

Měkká ocel $R_{\min}=(0,4-0,8)t$

Středně tvrdá ocel $R_{\min}=1,5t$

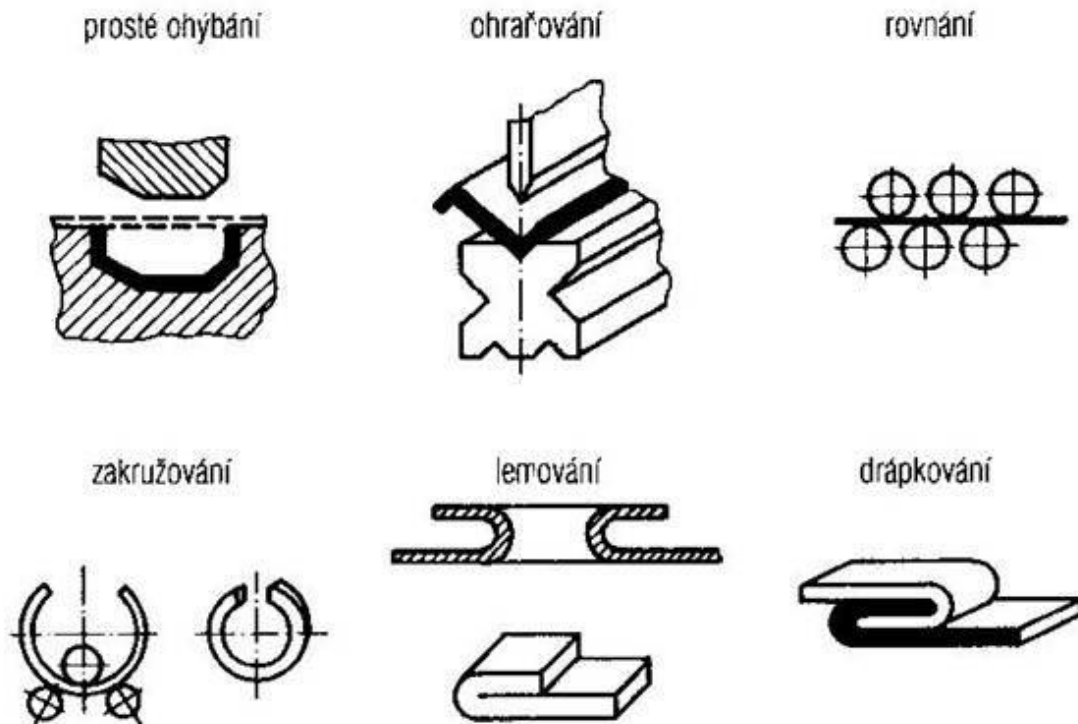
Měď $R_{\min}=0,25t$

Hliník $R_{\min}=0,35t$

U poloměru ohybu je důležitá i hodnota R_{\max} neboli maximální poloměr ohybu. Tato hodnota udává maximální úhel ohybu, při kterém dojde k plastické deformaci, a tedy k žádané trvalé změně tvaru materiálu. [2]

2.3 Způsoby ohýbání plechu

Na obr. 4 jsou znázorněny různé způsoby ohýbání. V dalších odstavcích budou jednotlivé způsoby blíže popsány.



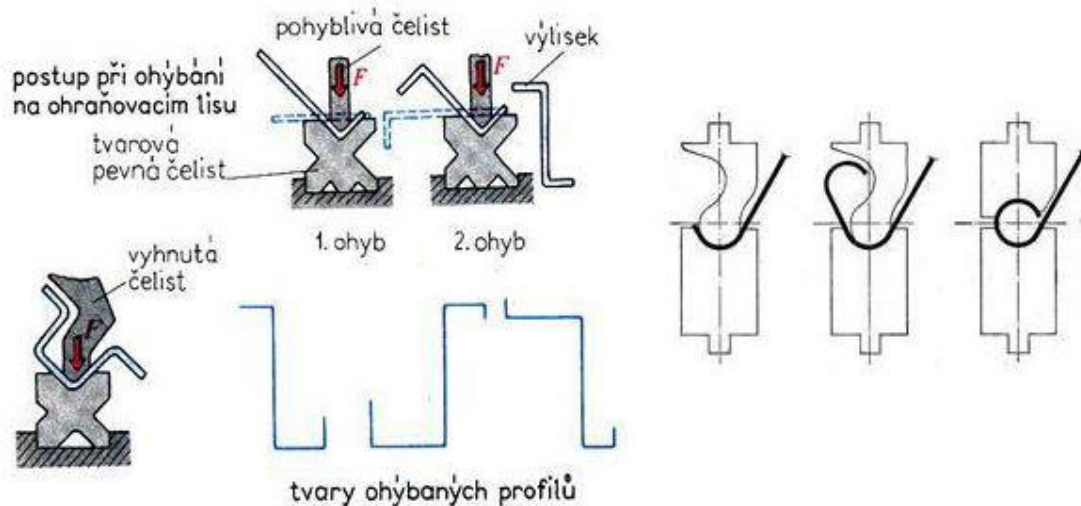
Obr. 4 Různé způsoby ohybu [23]

2.3.1 Prosté ohýbání

Prosté ohýbání realizované na ručních strojích nebo mechanických lisech je vhodné pro díly s menšími rozměry s ostrými poloměry. Celkový tvar součásti může vznikat kombinacemi V a U ohybů, které se různí velikostí a průběhem ohybové síly. Nástroje používané při prostém ohýbání se mohou navrhovat jako jednoduché, postupové nebo sdružené. Jako polotovar slouží přístřih nebo pás plechu. [2]

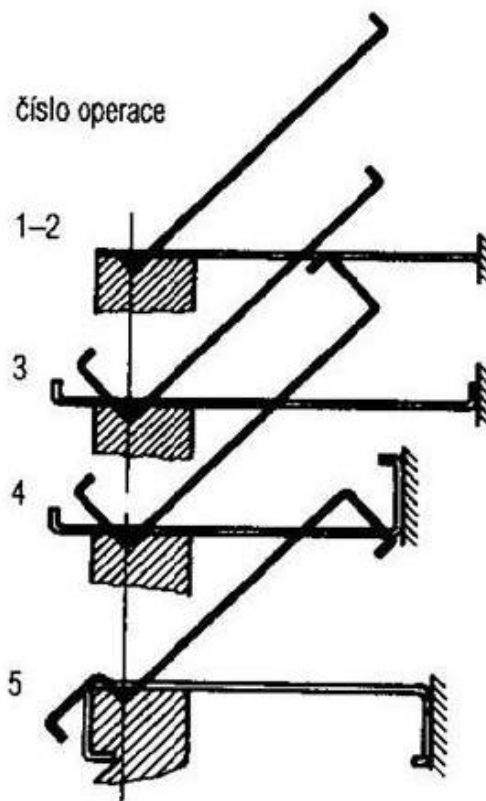
2.3.2 Ohraňování

Ohraňování, zobrazeno na obr. 5, je určeno pro tváření pásu plechu různých profilových tvarů, složených z kombinací ohybů V a U. [2]



Obr. 5 Možnosti ohraňování [3]

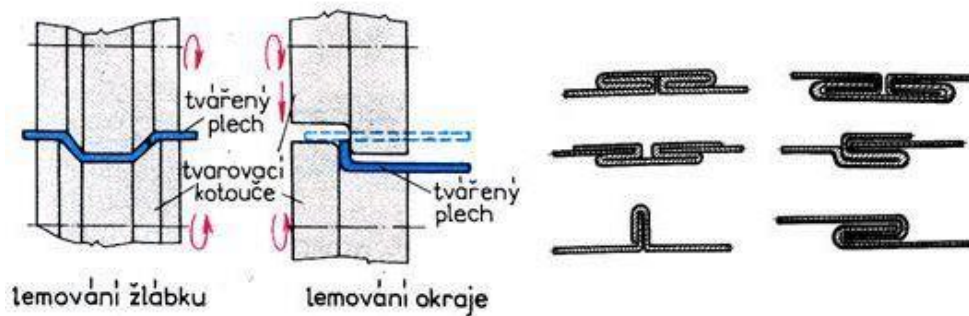
Jedná se o podobnou technologii jako prosté ohýbání s tím rozdílem, že při ohraňování se jednotlivé ohyby realizují samostatně a celkový tvar je vytvořený postupně, viz obr. 6. [2]



Obr. 6 Postupná výroba součásti ohraňováním [23]

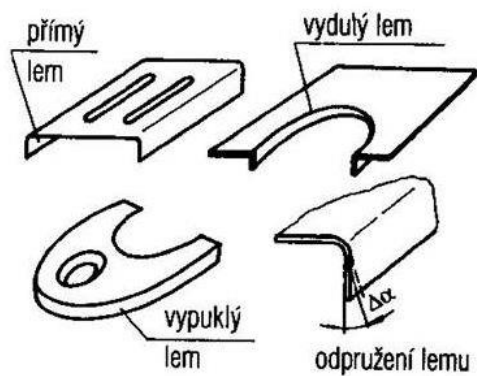
2.3.3 Lemování

Lemování, které je znázorněno na obr. 7, slouží k zaoblení ostrých hran ohnutím rovinných nebo prostorových ploch. [2]



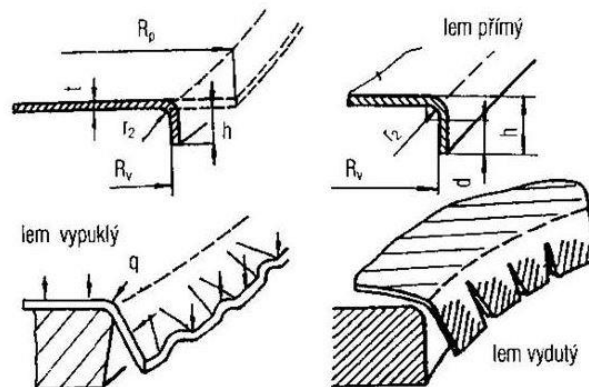
Obr. 7 Lemování [3]

Na obr. 8 je možné vidět různé druhy lemů.



Obr. 8 Příklady lemů [23]

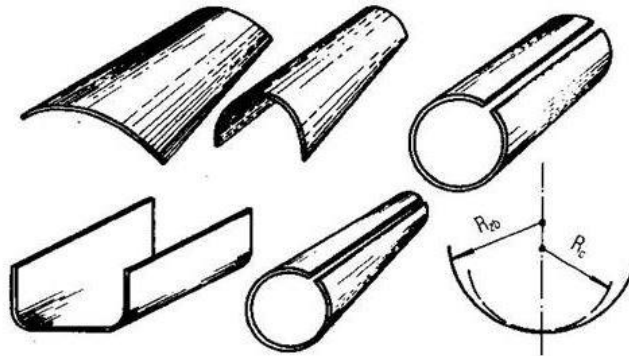
U vypuklého lemu hrozí nebezpečí, že se plech zvlíní. Je to způsobeno spěchováním přebytečného materiálu. Naproti tomu u vydutého lemu hrozí v důsledku natahování materiálu vznik trhlin. Oběma těmto problémům, které jsou na obr. 9, lze předcházet navržením nízké výšky lemu, použitím tlustšího plechu nebo použitím menšího úhlu ohybu. [2]



Obr. 9 Zvlnění a praskání materiálu u lemování [23]

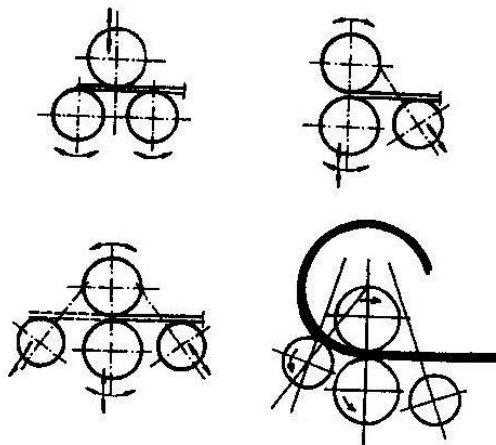
2.3.4 Zakružování

Jedná se o tvářecí proces probíhající za tepla nebo za studena, podle tloušťky polotovaru. Zakružování je volné ohýbání materiálu do kruhových či nekruhových příčných tvarů s velkými poloměry. Na obr. 10 jsou schémata dílu vyráběných zakružováním. [2]



Obr. 10 Díly vyráběné zakružováním [23]

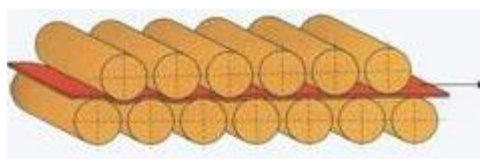
Proces zakružování probíhá na stroji zvaném zakružovačka. Ta má většinou 3 a více válců, na nichž je plech zakružován, viz obr. 11. [2]



Obr. 11 Schéma zakružování [23]

2.3.5 Rovnání

Rovnání, viz obr. 12, může být ruční nebo strojní. Ruční rovnání plechu se provádí kladivem na kovadlině. Strojní rovnání slouží pro rovnání tabulí nebo pásů plechu a realizuje se na rovnačkách. Rovnačka má od 7 do 17 poháněných válců. Na prvních válcích působí největší ohybová síla s postupem plechu mezi dalšími válci se se ohybové napětí snižuje. [2]



Obr. 12 Schéma rovnání [3]

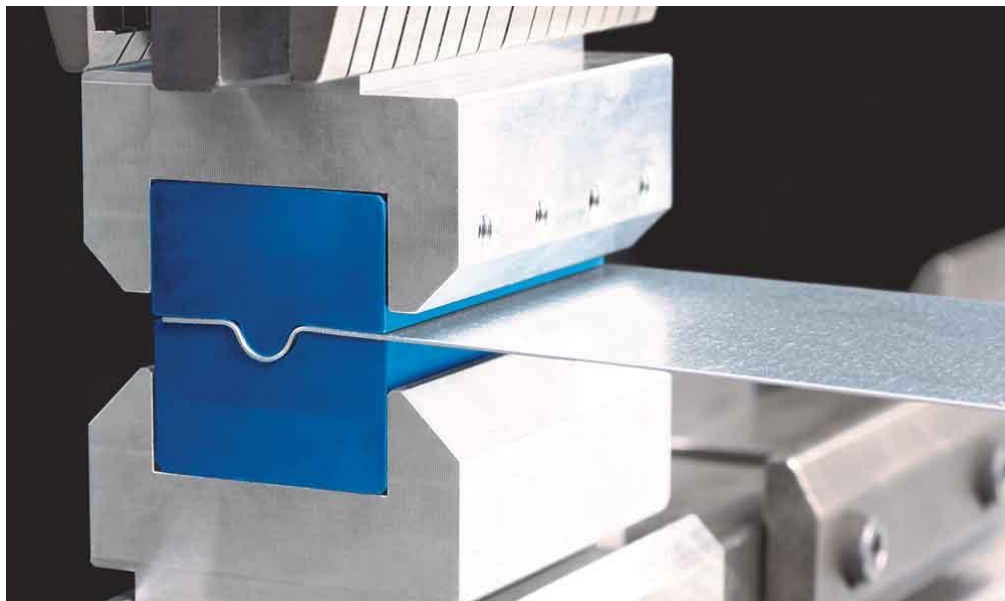
3 3D tištěné plastové nástroje pro tváření plechu

3.1 Použití

Plastové nástroje vyrobené 3D tiskem pro tváření plechů je možné využít v mnoha aplikacích. Používají se hlavně pro nízko-silové operace a pro díly s nízkým objemem výroby v řádech maximálně stovek kusů. [4]

Další velmi užitečnou výhodou použití 3D tištěných nástrojů je možnost vyrobit prototypové zkušební díly. Například když zákazník zadá nejdříve výrobu dílu o malém počtu kusů a rozhodnutí poptat velkou sérii těchto dílů nechá až po posouzení kvality zkušebních kusů. Výrobce tedy použije plastové nástroje vyrobené 3D tiskem, které na výrobu několika zkušebních kusů dostačují. Tím si vyzkouší samotný výrobní proces, ale také bude výroba nástroje několikanásobně rychlejší a především levnější než konvenčně vyráběný nástroj z oceli. V případě, že zakázka přeroste v sériovou výrobu, výrobce použije konvenční ohýbací nástroje. [4]

Proces výroby 3D tištěného nástroje lze ještě zrychlit při použití univerzálních základů vyrobených z kovu, viz obr. 13 a obr. 14. Na 3D tiskárně se tedy nemusí vyrábět celý razník nebo matrice, ale pouze hrot nástroje, který bude mít při použití této základny menší objem, a tím se čas tisku zkrátí. Dále se tím zlepší pevnost nástroje. [5] V neposlední řadě tento systém umožňuje rychlou a snadnou výměnu nástroje, protože plastová část nástroje, která se mění, je velmi lehká. [6]

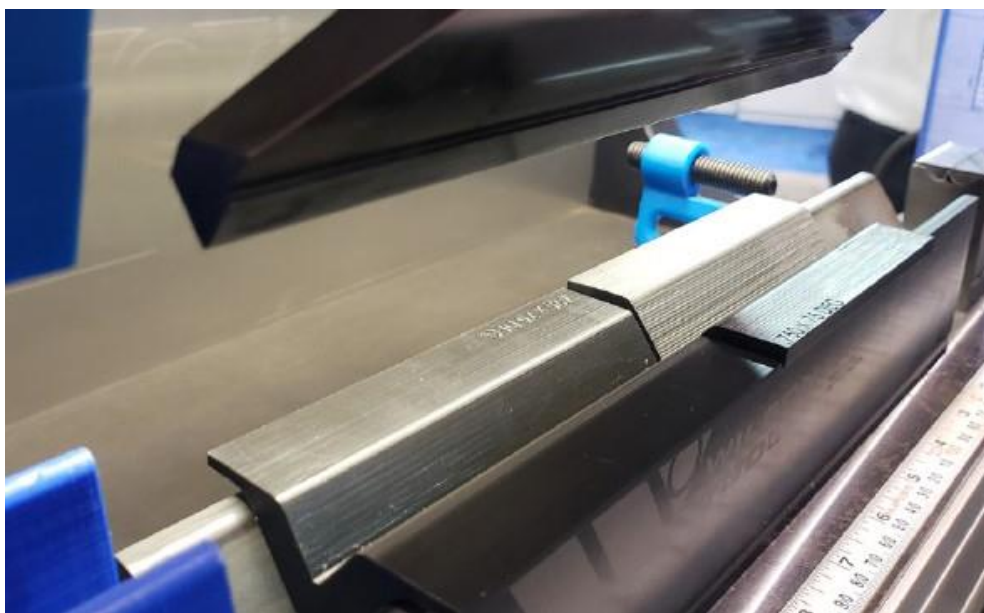


Obr. 13 Použití nástroje vyrobeného FFF k tváření plechu [5]



Obr. 14 Použití nástroje vyrobeného FFF k tváření plechu [6]

Méně častým způsobem použití aditivních technologií při výrobě nástrojů pro ohýbání plechů je náhrada uretanových nebo jiných ochran ocelových nástrojů. Na 3D tiskárně se vyrobí plastová vložka se stejnou geometrií, jakou má nástroj, a následně se do nástroje vloží, viz obr. 15. [5]

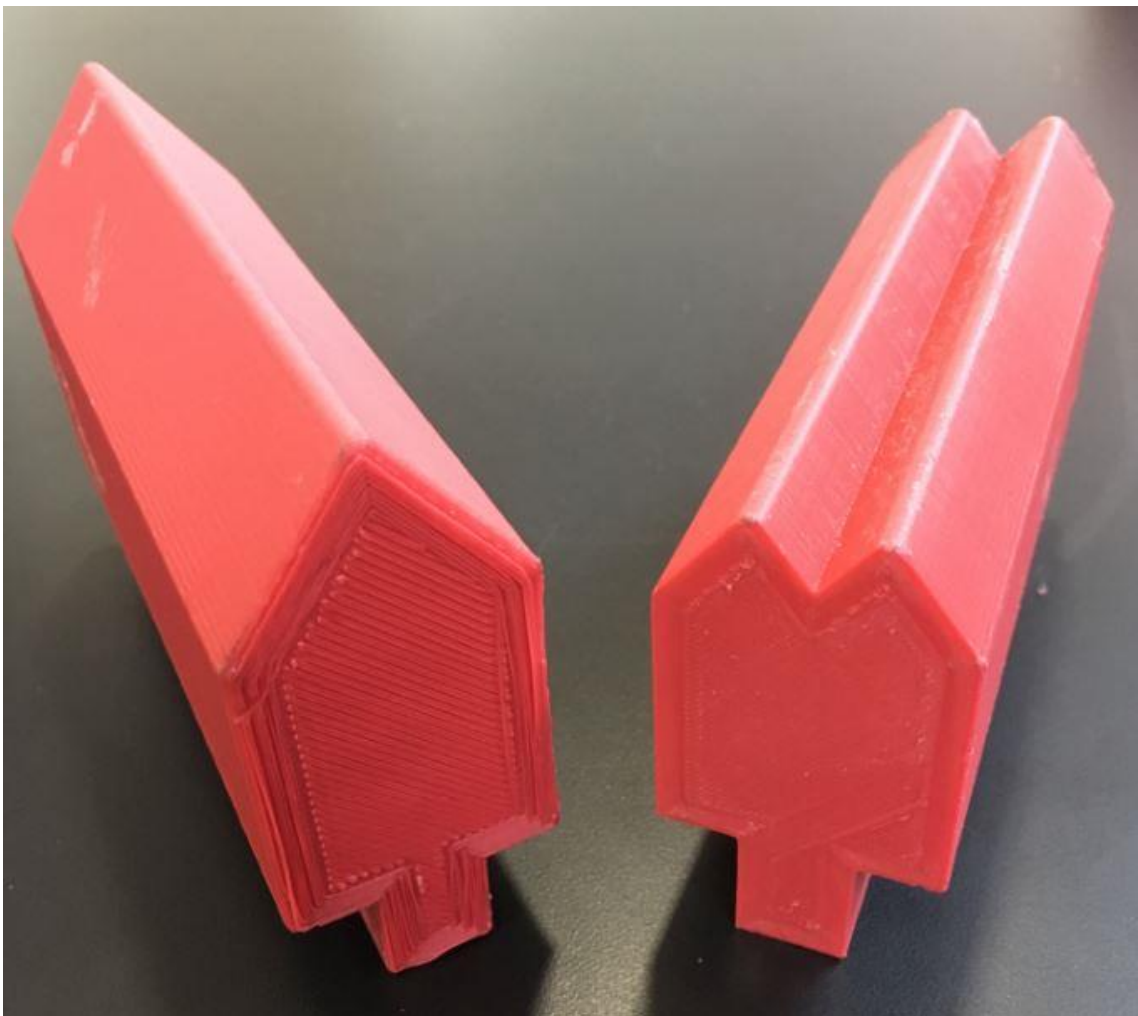


Obr. 15 Použití plastové vložky vyrobené FFF [6]

Při použití 3D tištěných nástrojů je nutné vzít v úvahu životnost nástroje, která i při použití nejlepších materiálů bude několikanásobně nižší než u konvenčních nástrojů. Dalším důležitým faktorem je anizotropie mechanických vlastností, která je pro 3D tisk a především pro technologie FFF typická, proto některé geometrie nástrojů nejsou pro tuto technologii vhodné. [5]

3.2 Materiály

Materiál se volí podle konkrétní aplikace. Často používaným materiálem je PLA, které je díky svým mechanickým vlastnostem a také jednoduchosti tisku vhodné pro výrobu nástrojů, viz obr. 16. [4] Pro náročnější aplikace, při kterých je nutná vysoká pevnost a schopnost nástroje nepoškodit tvářený materiál odřením povrchu, se mohou použít kompozitní materiály, například nylon s uhlíkovými vlákny. [5]

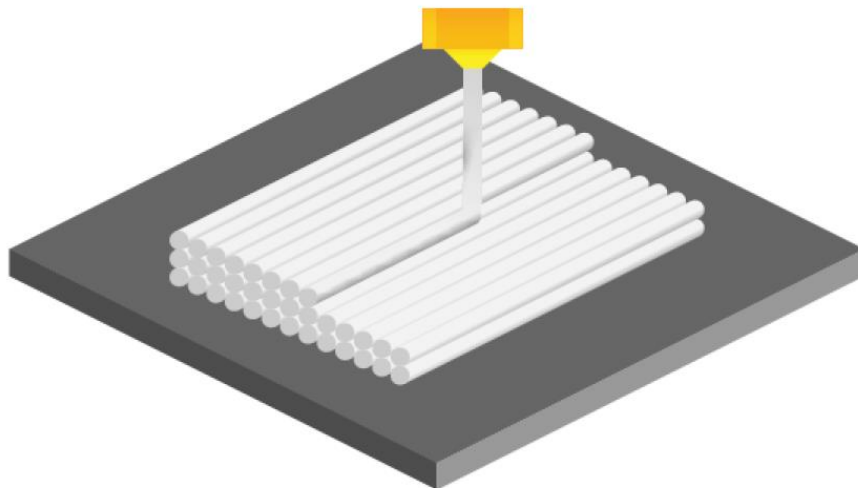


Obr. 16 Nástroj k tváření plechu vyrobený FFF z PLA [4]

3.3 Technologie

Pro výrobu plastových ohýbacích nástrojů 3D tiskem se nejvíce využívají dvě technologie. Jedná se o FFF a SLA. Protože v praktické části byla použita technologie FFF, budou následující řádky stručně věnovány pouze tomuto způsobu 3D tisku.

Technologie FFF neboli Fused Filament Fabrication je technologie 3D tisku založená na nanášení roztaveného plastového materiálu vrstvu po vrstvě, viz obr. 17. Tiskový materiál před samotným tiskem je ve formě struny nejčastěji o průměru 1,75 mm svinuté na cívce. Jedním slovem se tento materiál nazývá filament. Na trhu jsou dostupné různé druhy filamentů, lišící se chemickým složením, mechanickými vlastnostmi, cenou atd. Nejvíce rozšířeným a používaným materiálem u technologie FFF je PLA, které je použito v experimentální části, a proto je mu věnována jedna z následujících kapitol. [7]



Obr. 17 Schéma vytačování materiálu ve vrstvách [7]

Stroj, na kterém je 3D tisk realizovaný, se nazývá 3D tiskárna. FFF 3D tiskárna může být podle způsobu pohybu tiskové hlavy v tiskovém prostoru kartézská, delta, nebo polární. Příklad kartézské tiskárny je zobrazen na obr. 18. Všechny tři druhy tiskáren mají několik společných základních komponent, které mohou být v mírně odlišných specifikacích. Vždy se na FFF tiskárně nachází extruder neboli tisková hlava, ve které dochází k natavení materiálu a přes trysku k následnému nanášení do pracovního prostoru. Dále je nedílnou součástí tisková podložka, na které je výtisk vyráběn. Další součástí je rám tiskárny, který tvoří nosnou konstrukci 3D tiskárny. O pohon pohyblivých částí tiskáren se nejčastěji starají krokové motory. Poslední základní komponentou je

řídící jednotka, která řídí chod tiskárny od pohybů krokových motorů po nahřívání tiskové podložky a trysky. [7]



Obr. 18 Kartézská 3D tiskárna Original Prusa XL [24]

3.4 Výhody 3D tištěného ohýbacího nástroje

1. Rychlost výroby nástroje
2. Cena (cena materiálu na jeden nástroj do 20 amerických dolarů podle velikosti)
3. Nástroj je šetrný k povrchu tvářeného dílu
4. Možnost vyzkoušení výrobního procesu a výroby prototypů nebo malých sérií se značně zredukovanými vstupními náklady

3.5 Nevýhody 3D tištěného ohýbacího nástroje

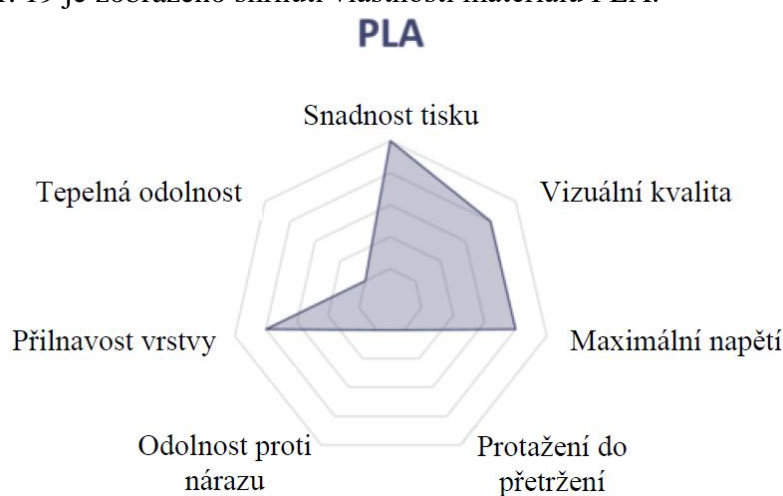
1. Mechanické vlastnosti (pevnost, odolnost proti opotřebení atd. výrazně horší než u konvenčních nástrojů)
2. Přesnost výroby
3. Životnost nástroje
4. Geometrie nástroje

4 Výroba z materiálu PLA pomocí FFF

4.1 Obecné informace o filamentu PLA

Kyselina polyléčná neboli PLA je jedním z nejrozšířenějších materiálů v plastovém 3D tisku. To, co tento materiál činí atraktivním, je nízká cena, snadnost tisku, dobré statické mechanické vlastnosti, nízká tepelná roztažnost a s tím spojená rozměrová stálost. Mezi hlavní nevýhody PLA patří špatná tepelná odolnost, křehkost a nepoužitelnost pro venkovní aplikace, při kterých je díl vystaven slunečnímu záření nebo vlivům nepříznivého počasí. [8]

Na obr. 19 je zobrazeno shrnutí vlastností materiálu PLA.



4.2 Mechanické vlastnosti 3D tištěného PLA

V tab. 1 jsou vyjádřeny mechanické vlastnosti materiálu 3D tištěného PLA metodou FFF. Data platí pro vzorečky tištěné na ležato, tedy situaci, kdy je rovina s největší plochou vzorku rovnoběžná s rovinou tiskové podložky. Vzorky byly tištěny s plnou výplní. [9]

Tab. 1 Mech vlastnosti PLA [9]

Pevnost v tahu	$49 \pm 1,0$ MPa
Pevnost v ohybu	$157 \pm 1,7$ MPa
Rázová houževnatost	$14 \pm 1,9$ KJ/m ²

Na mechanické vlastnosti materiálů tištěných metodou FFF má vliv mnoho faktorů a kvůli různým nastavením tisku, výrobcům materiálu i např. barvou materiálu je nutné vždy jasně definovat, za jakých podmínek byly hodnoty mechanických vlastností naměřeny, protože se od sebe pro stejný materiál mohou vzájemně výrazně lišit. Které

faktory a jakou měrou tyto faktory ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu je rozebráno v následující kapitole.

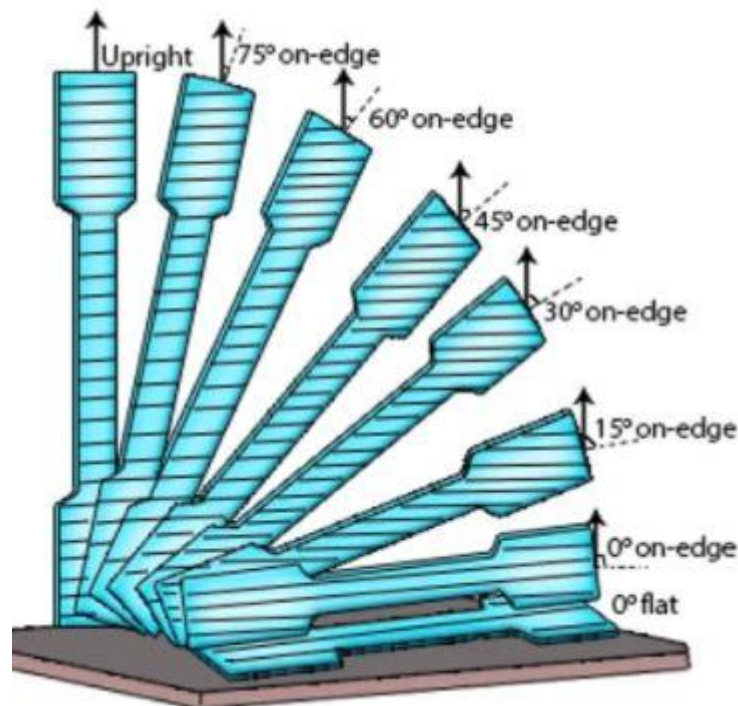
4.3 Faktory ovlivňující mechanické vlastnosti 3D tištěného materiálu.

V FFF technologii je mnoho procesních parametrů, které lze nastavit a jimiž se v některých případech výrazně mění mechanické vlastnosti. Mezi nejdůležitější parametry ovlivňující kvalitu tisku a mechanické vlastnosti výrobku patří orientace tisku, teplota tisku, hustota výplně, styl výplně, orientace výplně, tloušťka vrstvy, počet perimetrů, průměr trysky, následné tepelné zpracování. Obecně jsou parametry tisku na sobě závislé a vždy je nutné nastavovat tyto parametry podle dané aplikace. [10]

4.3.1 Orientace tisku

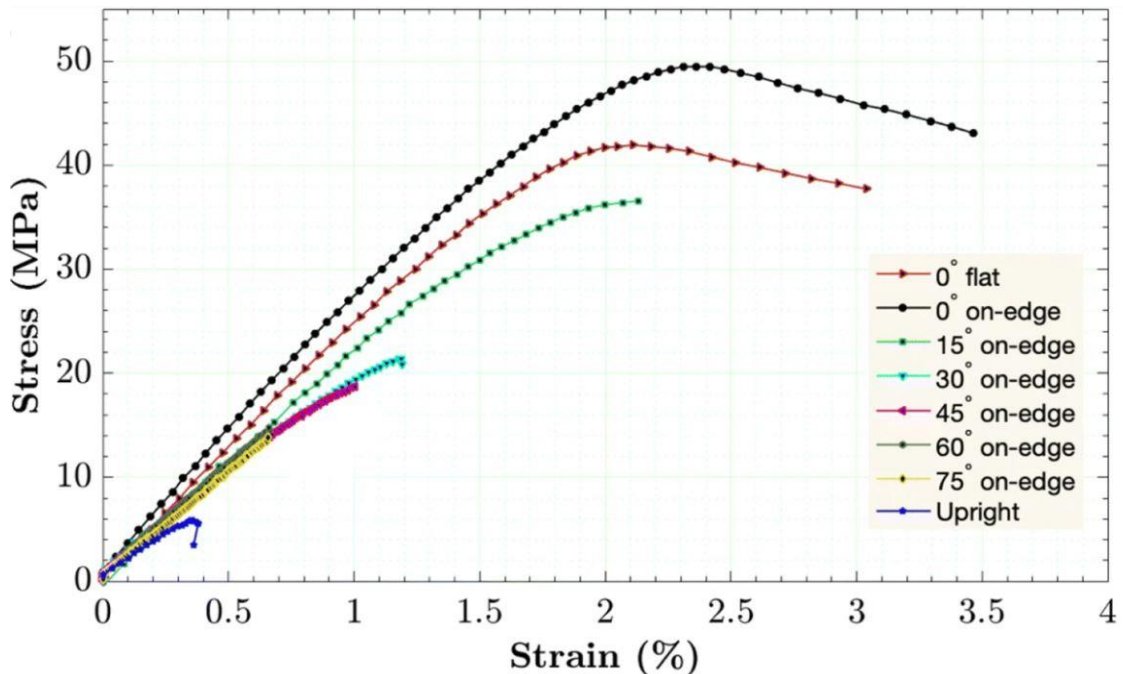
Orientace tisku se volí vždy podle geometrie vyráběného dílu. Výrobky metodou FFF vykazují pod různými úhly anizotropii mechanických vlastností. Orientace tisku kromě mechanických vlastností ovlivňuje také drsnost povrchu, množství použitého materiálu kvůli případnému použití podpor a i výrobní čas. [11] [12]

Na obr. 20 jsou znázorněny možnosti orientace tisku.



Obr. 20 Ukázka možné orientace tisku [12]

Jak orientace tisku ovlivňuje pevnost v tahu pro vzorky vytištěné z PLA z obr. 20, je možné vidět na závislosti, viz obr. 21. Nejlepší hodnoty mechanických vlastností vykazují vzorky s orientací tištěných vláken ve směru následného namáhání. Pro orientace obr. 20 jsou to orientace naplocho 0° a na boku 0° . [12]



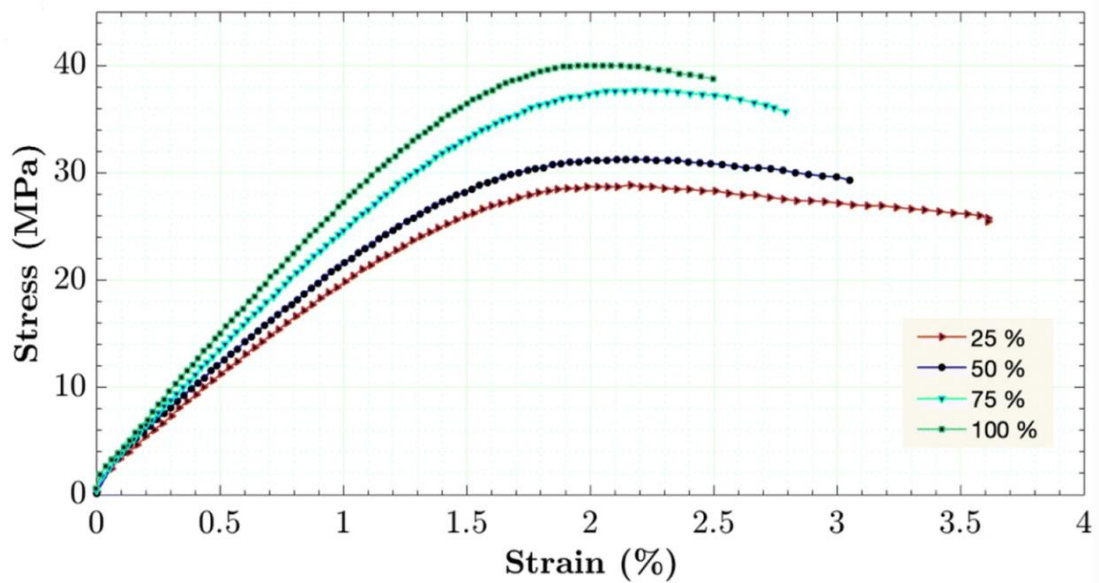
Obr. 21 Závislost tahového napětí na deformaci pro různou orientaci tisku [12]

4.3.2 Tloušťka vrstvy

Tloušťka vrstvy přímo souvisí s časem tisku. Čím menší je výška jedné vrstvy, tím více vrstev je nutné nanést pro vyrobení dílu, to pak způsobuje delší čas výroby. [11]

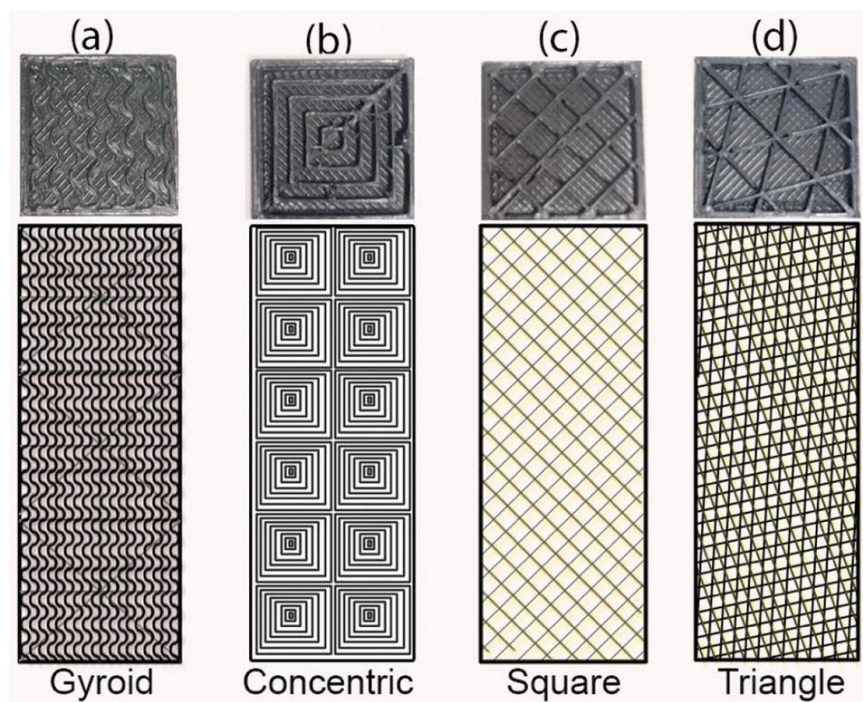
4.3.3 Výplň

Množství filamentu vytištěného uvnitř perimetrů je známo jako hustota výplně. Hustota výplně přímo ovlivňuje mechanické vlastnosti dílu, jeho hmotnost, čas výroby a tím vším i cenu za díl. [11] Na obr. 22 je znázorněna závislost tahového napětí na deformaci pro různé nastavení hustoty výplně. Vyšší hustota výplně zvyšuje pevnost v tahu a mírně snižuje tažnost. [12]



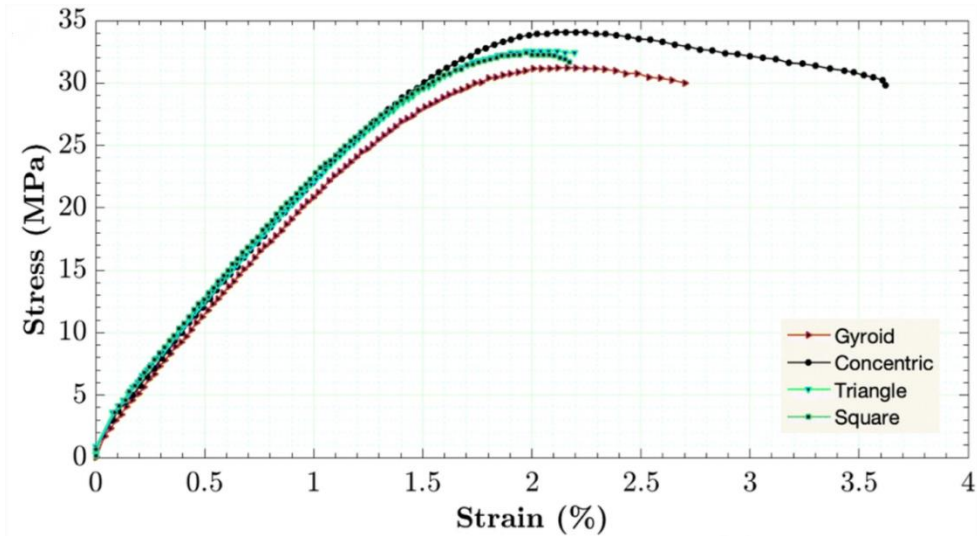
Obr. 22 Závislost tahového napětí na deformaci pro různou výplň [12]

Další parametr související s výplní je vzor. Na obr. 23 jsou zobrazeny nejpoužívanější vzory výplně.



Obr. 23 Příklady vzorů výplně [12]

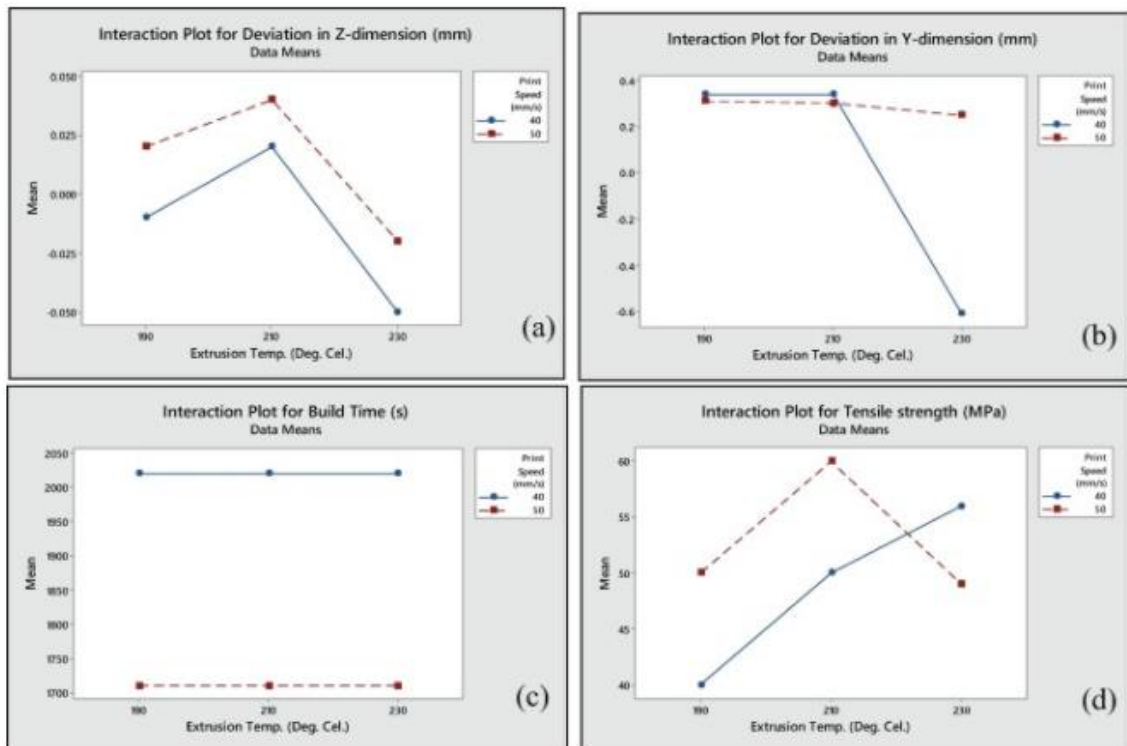
Stejně jako hustota výplně i její vzor ovlivňuje mechanické vlastnosti a čas výroby. Vliv vzoru výplně na mechanické vlastnosti je na obr. 24. Jako nejlepší ze čtyř vzorů z obr. 24 se jeví koncentrický vzor. Hodnota maximálního napětí je nejvyšší a také dosahuje největšího prodloužení do přetržení. [12]



Obr. 24 Závislost tahového napětí na deformaci pro různé vzory výplně [12]

4.3.4 Vliv rychlosti tisku a teploty trysky

Rychlost tisku označuje rychlost pohybu tiskové hlavy. Rychlost tisku hlavně ovlivňuje čas výroby dílu, přesnost výroby a mechanické vlastnosti výrobků. Běžné PLA má výrobcem doporučenou rychlost tisku okolo 50 mm/s. [13]



Obr. 25 Vliv rychlosti a teploty tisku na různé vlastnosti [13]

Teplota trysky je doporučována výrobcem daného PLA filamentu. Hodnoty jsou 190-230 °C. Teplota tisku ovlivňuje, jak k sobě jednotlivé vrstvy materiálu přilnou i přesnost samotné extruze. Při vyšší teplotě totiž může z trysky vytéct vyšší množství materiálu. [13]

Na obr. 25 jsou zobrazeny vlivy kombinace rychlosti tisku a teploty tisku na přesnost v osách stavby y a z, dále vliv na čas výroby a na maximální pevnost v tahu. Data odpovídají tištěným vzorkům pro zkoušku tahem z materiálu PLA. [13]

4.3.5 Shrnutí vlivu parametrů tisk na mechanické vlastnosti výtisků

V práci „Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology“ podle použité metody ANOVA bylo vyhodnoceno, že mezi statisticky významné parametry z pohledu pevnosti v tahu patří orientace tisku, průměr trysky a hustota výplně. [14] To ovšem neznamená, že ostatní parametry není třeba brát v úvahu, protože v této práci byly z každého zkoumaného parametru použita pouze tři nastavení a tím nebylo pokryto celé spektrum možností. V neposlední řadě práce nezkoumá všechny nastavitelné parametry.

5 Experimenty s použitím 3D tištěných nástrojů

5.1 Ohraňování s vložkami z PLA a PC

V práci Manufacturing and performance of 3D printed plastic tools for air bending applications bylo zkoumáno, zda lze použít 3D tištěné plastové vložky (zelená součást, viz obr. 26) do ohraňovacích lisů k ohýbání plechu z ocelových a hliníkových materiálů. Bylo zjištěno, že při zvolení vhodných tiskových parametrů je možné použít tyto vložky pro nízké série. Konkrétně polykarbonátové vložky vykazovaly konzistentní výsledky úhlů ohybu a s tím spojený úhel odpružení pro 130 odlisovaných plechů z oceli C45 o tloušťce 1,5 mm. [1]

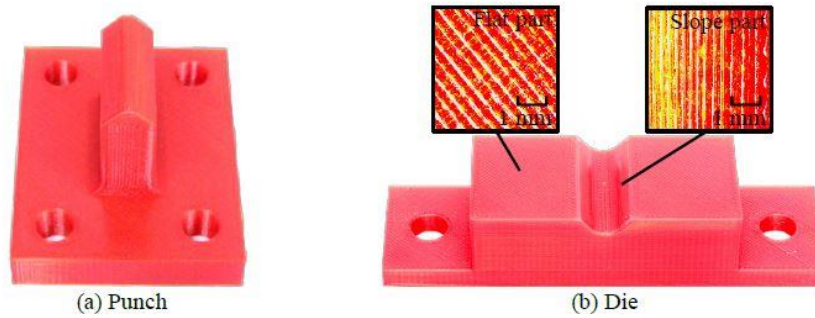


Obr. 26 Plastová vložka v lise [1]

V další části práce byl zkoumán vliv různých vzorů výplně, respektive směru výplně u nástrojů z materiálu PLA. Zde bylo zjištěno, že i použitý vzor při stejné míře výplně má vliv na konzistentnost ohýbání.

5.2 Ohraňování s nástroji z PLA

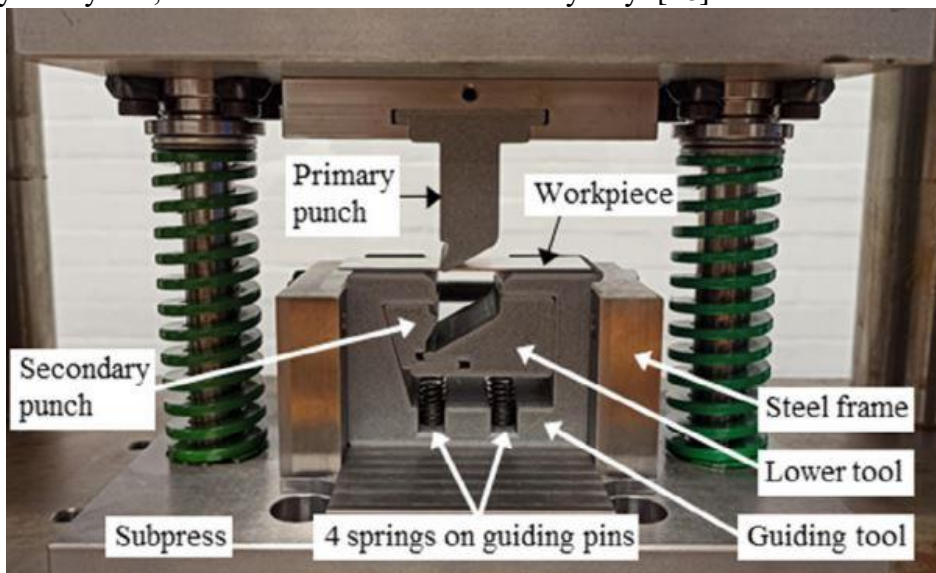
Práce Bending of sheet metals using plastic tools made with 3D printer zpracovává téma použití celých 3D tištěných nástrojů k ohraňování. V práci jsou použity plastové nástroje, kovové nástroje a jejich kombinace, aby bylo možné srovnání jednotlivých variant pro ohýbání plechu z oceli a hliníkových slitin. Závěrem této práce je, že 3D tištěné plastové nástroje viz obr. 27 je možné k ohýbání plechu využít, ale je potřeba myslet na to, že při působení síly se plastové nástroje už při relativně nízkém zatížení elasticky deformují, to vede ke změně jejich geometrie a tím i změně geometrie ohybu. Bylo zjištěno, že pro rozměrovou přesnost výrobků je vhodné použít ocelový razník a plastovou matici. Naměřené úhly odpružení, se pro všechny varianty použitých nástrojů lišily minimálně. [15]



Obr. 27 Plastové ohraňovací nástroje [15]

5.3 Prosté ohýbání

Práce 3D printing to facilitate flexible sheet metal forming production pojednává o možnosti lisovat hliníkový plech nástroji z PLA vyrobenými na 3D tiskárně, viz obr. 29. Na obr. 28 je zobrazeno několik vylisovaných plechů. V práci je porovnána rychlost výroby nástroje a náklady na výrobu mezi plastovou FFF a kovovým EDM. Výsledkem práce je, že výroba plastových nástrojů včetně jednorázového výdaje v podobě pořízení profesionální 3D tiskárny (cena tiskárny použitá v experimentu: 50 000 CZK) vyjde mírně draž než výroba kovového nástroje EDM. Avšak při výrobě další sestavy nástrojů už je 3D tisk výrazně levnější variantou, což pro zakázkovou výrobu, při které se často mění vyráběný kus, činí velmi atraktivní variantu výroby. [16]



Obr. 29 Lisování PLA nástroji [16]



Obr. 28 Vylisované plechy [16]

6 Praktická část

Cílem praktické části je ověření lisovatelnosti dvou zadaných dílů pomocí 3D tištěných nástrojů. Toto ověření bylo provedeno nejdříve numerickými simulacemi k odhalení potenciálních problémů a následně proběhlo i reálné lisování s nástroji vyrobenými na 3D tiskárně.

6.1 Díl č.1 Kryt

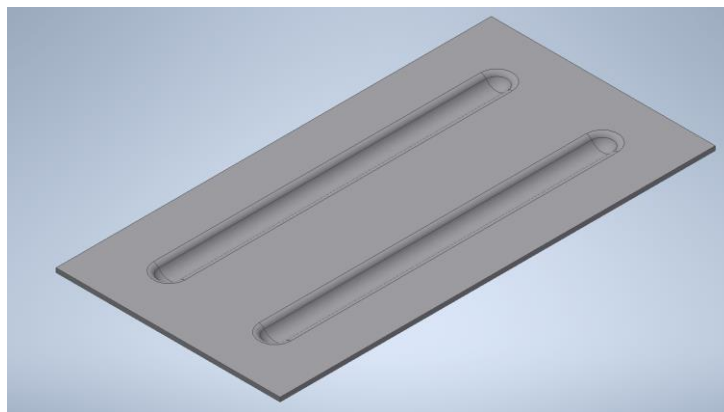
6.1.1 Analýza dílu

U zadaného dílu č. 1 se jedná o náhradu za poškozený kus na historickém stroji, konkrétně součást ze servisní skříňky traktoru Zetor 15, viz obr. 30.

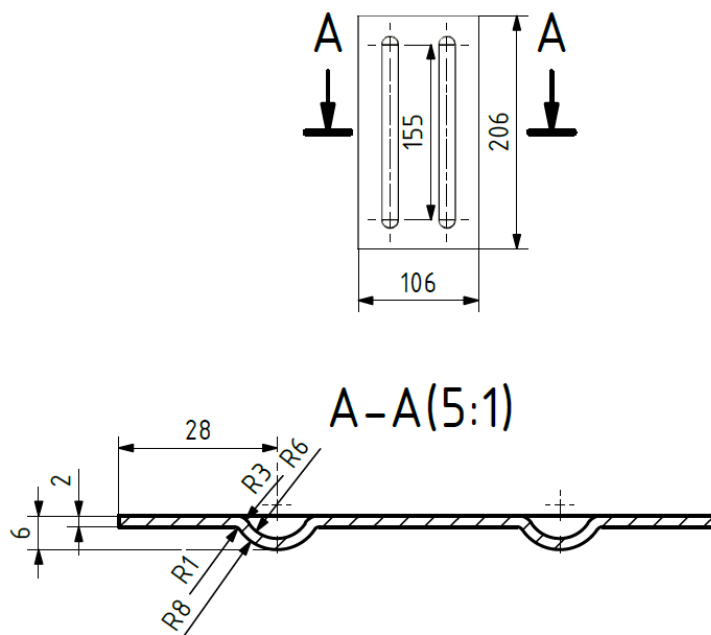


Obr. 30 Zadaný díl č.1 Kryt

Jedná se o vcelku jednoduchý plechový díl, ve kterém jsou v ose součásti dvě díry o průměru 10 mm a následně dva podélné výstupky, které je cíl pomocí lisování na přístříhu zrealizovat. Dominantní operací při výrobě tohoto dílu je takzvané ražení, pro které je charakteristická vysoká lisovací síla. Tento díl tedy mimo jiné slouží k ověření, co vše mohou plastové nástroje vyrobené 3D tiskem vydržet. Výkres součásti bez děr a její 3D vizualizace z Autodesk Inventor jsou zobrazeny na obr. 31 a obr. 32. Materiálem dílu je konstrukční ocel.



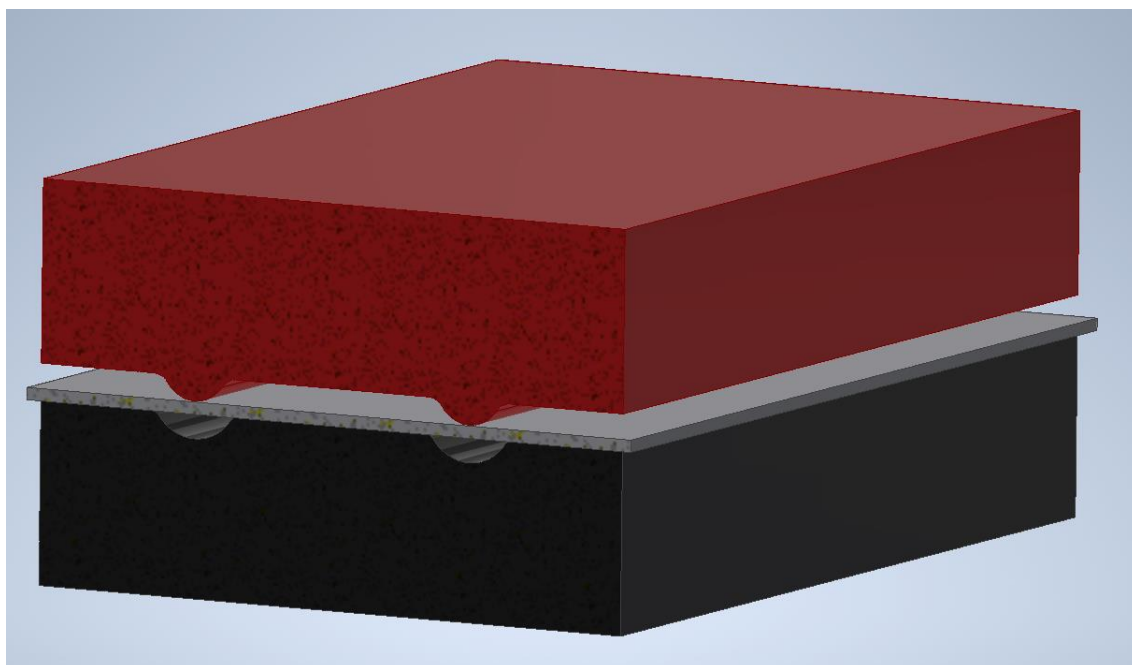
Obr. 31 3D vizualizace 1. dílu



Obr. 32 Výkres 1. vyráběného dílu

6.1.2 Nástroje

Geometrie nástrojů byla vytvořena jako otisk jedné strany modelu finálního výrobku do hranolu a následně to samé s druhou stranou. Do nástrojů nebyl navržen žádný ofset. Sestava nástrojů s přístřihem v řezu je znázorněna na obr. 33.



Obr. 33 Modelová sestava nástrojů a přístřihu pro díl 1

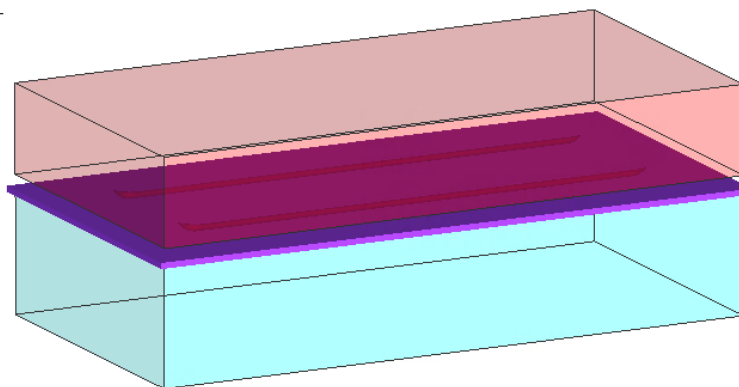
6.1.3 Simulace

Numerické simulace procesu lisování byly provedeny v softwaru Simufact forming. Jako vstupní parametry bylo nutné do simulačního programu nahrát CAD modely nástrojů a přístřihu. Dále bylo třeba nastavit materiál přístřihu. Pro simulaci byl zvolen stejný materiál, ze kterého se následně mělo lisovat, a to DC01. Jelikož se simulace nezabývá deformací nástrojů, protože by se musela vytvořit materiálová karta použitého PLA, materiál nástrojů nebylo potřeba volit a software počítá s absolutně tuhými nástroji. Dalším parametrem, který bylo nutné nastavit je tvářecí stroj. V případě dílu č.1 byl zvolen hydraulický lis s rychlostí posuvu beranu 2 mm/s. Předposledním nutným parametrem je nastavení tření, které jsem zvolil z dostupných možností jako špatné, protože pro následné lisování nebude použito žádné mazivo a tisková struktura nástrojů je hrubá, kvůli použití výšky vrstvy 0,3mm. V neposlední řadě bylo potřeba nastavit teplotu tváření a teplotu předehřevu. Obě tyto hodnoty jsou 20°C.

Nastavení samotné simulace spočívalo v zapolohování nástrojů a přístřihu vůči sobě, viz obr. 34, a nastavení osy pohybu horního nástroje. Pro přístřih bylo potřeba vytvořit síť bodů, a to nastavením velikosti jednoho elementu. Základní velikost jednoho elementu jsem zvolil 4 mm a pro oblast, ve které mají vzniknout výstupky, jsem síť 3x zjemnil, jak je zobrazeno na obr. 35. Dále bylo nutné nastavit čas nebo zdvih stroje. Z výkresu, viz obr. 32, je patrné, že pro vylisování dílu je nutné, aby zdvih horního nástroje byl 4 mm.

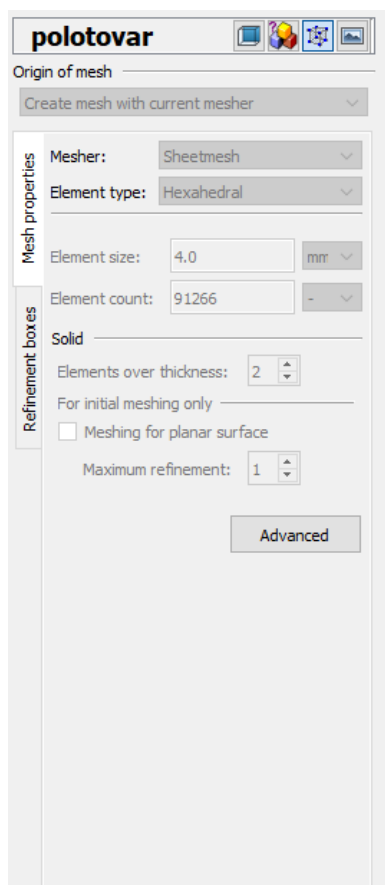
Model legend

	polotovár
	nastroj-dolní
	nastroj-horní




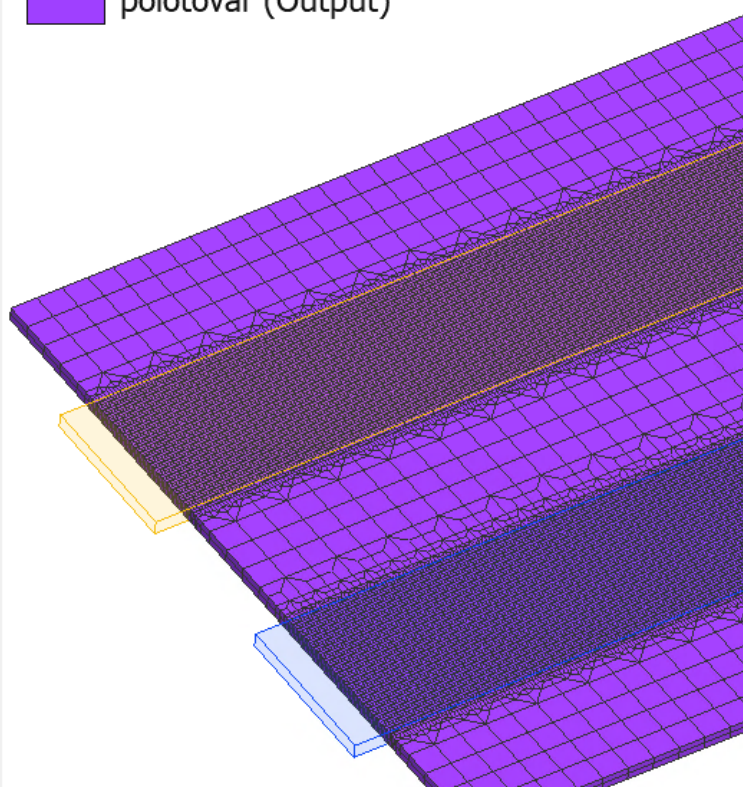
Obr. 34 Zaploňování pro díl č.1

Jako poslední ze základní volby bylo nutné vybrat, které výstupy výsledku jsou požadovány, např. deformace, napětí, změna povrchu přístříhu apod. Z pokročilého nastavení bylo možné volit výpočtový řešič, přístup k tření apod. Zde jsem vše nechal na možnosti automaticky pro obecné tváření plechu.



Model legend

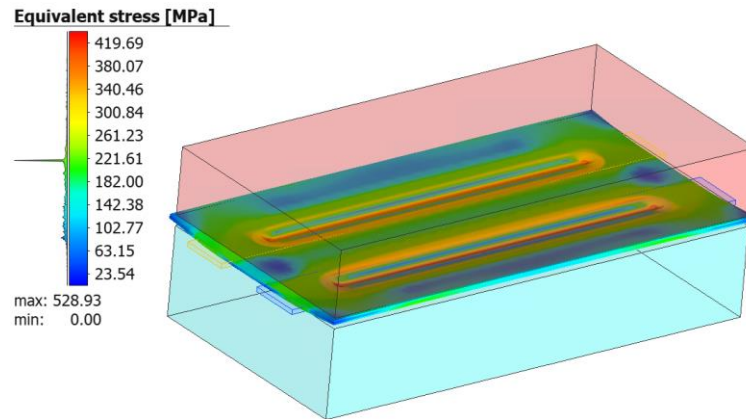
	polotovár (Output)
---	--------------------



Obr. 35 Síť pro simulaci Krytu

Průběh simulace

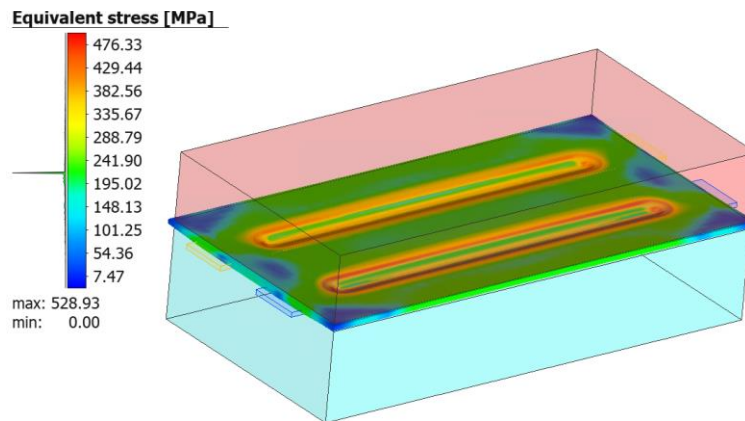
Na sekvenci obrázků obr. 38, obr. 37 a obr. 36 je znázorněn postupný průběh simulovaného lisování.



stroke4mm - Results - 1

Sub-stage: Forming
Progress: 33.33%

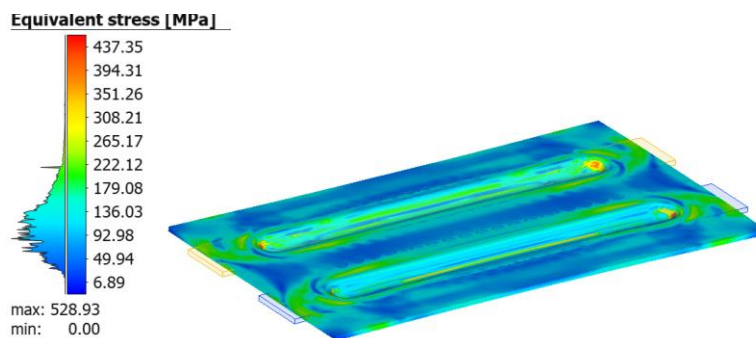
Obr. 38 Průběh simulovaného lisování 33%



stroke4mm - Results - 1

Sub-stage: Forming
Progress: 66.67%

Obr. 37 Průběh simulovaného lisování 66%



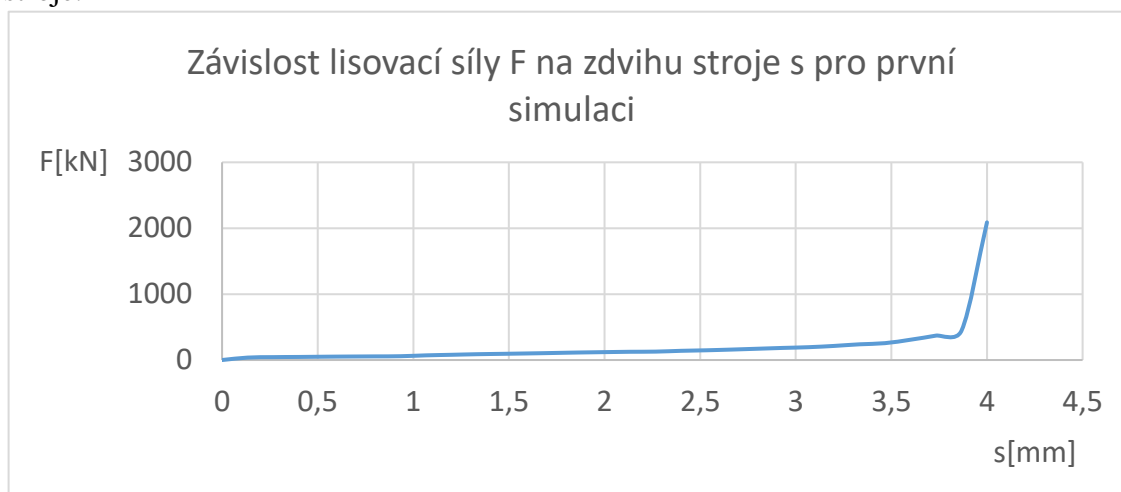
stroke4mm - Results - 1

Sub-stage: release_wp
Progress: 100.00%

Obr. 36 Průběh simulovaného lisování 100%

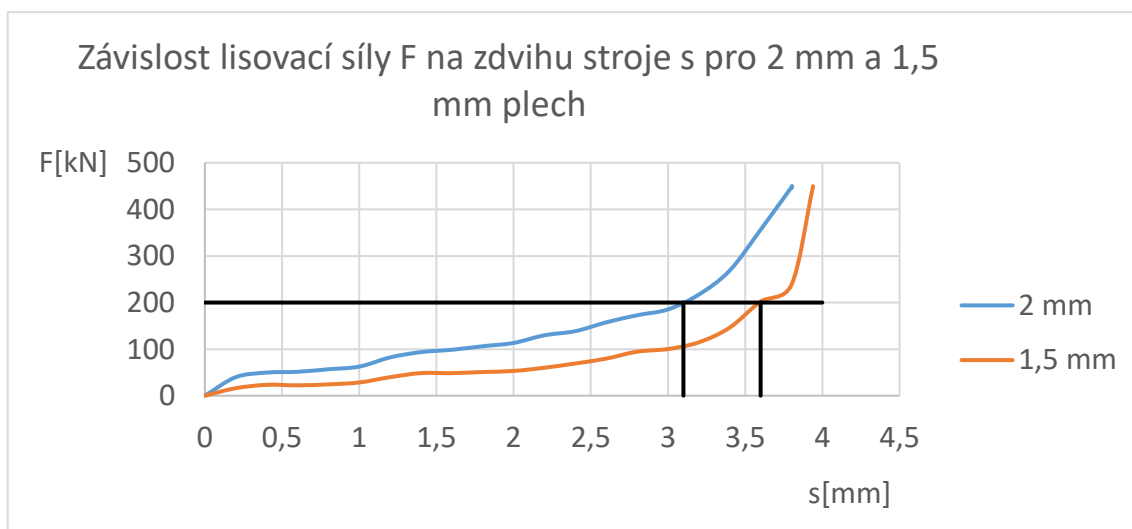
Výsledky simulací

Při simulacích nedošlo k žádnému problému znemožňujícím jejich dokončení. Avšak pro vylisování dílu bylo zapotřebí velmi vysoké lisovací síly, přesahující možnosti lisu, na kterém bude lisování realizováno, takto vysoké zatížení by samozřejmě ani plastové nástroje nevydržely. Na obr. 39 je znázorněna závislost lisovací síly na zdvihu stroje.



Obr. 39 Závislost F na s první sim. díl 1

Pro další simulaci jsem nastavil kritérium pro ukončení simulace při dosažení lisovací síly 450 kN. Touto lisovací silou disponuje lis, který bude pro lisování použit. Tato síla je také příliš vysoká pro plastové nástroje. Bylo rozhodnuto, že místo z 2 mm přístřihu bude použit přístřih o tloušťce 1,5 mm. Provedl jsem simulaci pro upravený přístřih, srovnání závislostí síly na zdvihu pro jednotlivé varianty je zobrazeno na obr. 40. Při reálném lisování jsme nakonec vyhodnotili z chování nástrojů při působení lisovací síly, že maximální hodnota této síly pro vytištěnou sadu nástrojů je 200 kN.



Obr. 40 Závislost F na s při lisování pro různé tloušťky plechu

Tato hodnota je vyznačena v grafu na obr. 40 černou vodorovnou čarou, svislé vodorovné čáry ukazují, jaký zdvih má stroj při síle 200 kN.

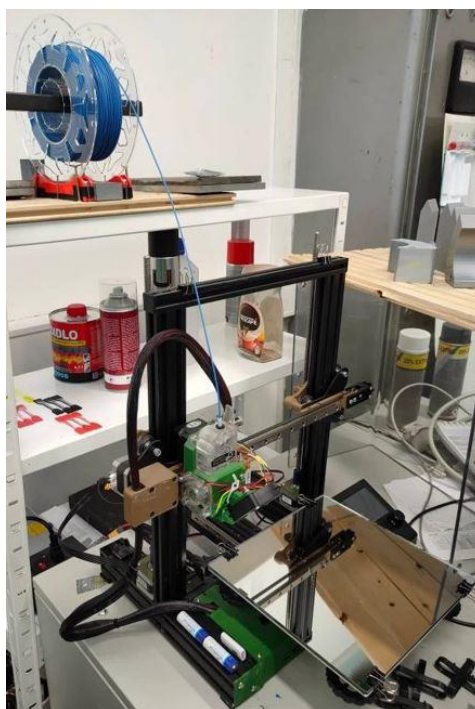
Na obr. 41 je možné vidět výsledné modely výrobků s tloušťkou plechu 1,5 mm ze simulací srovnané mezi sebou. Černý model je kompletně dolisovaná součást a modrý model je součást vylisovaná s maximální silou 200 kN. Nejvíce se nedolisování na součásti projeví ve výsledné geometrii výstupků. Konkrétně pak na rádiích R1 a R3 z obr. 32, jejichž tvar má na nedolisované součásti postupný nástup.



Obr. 41 Srovnání geometrií dolisovaného a nedolisovaného 1,5 mm plechu při simulaci

6.1.4 Tisk

Pro oba zadané díly byla k tisku použita kartézská FFF 3D tiskárna Creality Ender 3 PRO. Tato tiskárna patří mezi nejrozšířenější 3D tiskárny v kategorii hobby na světě. Dosud bylo firmou Creality vyexpedováno přes 800 000 těchto 3D tiskáren. Technické parametry základní verze Ender 3 PRO se nacházejí v tab. 2. Oproti základní verzi měla tiskárna použitá v experimentu, viz obr. 42, navíc přímý extruder. Dále místo standardní tiskové podložky bylo použito zrcadlo, které má výhody například v přesnosti tisku. K přesnosti tisku také přispívá lineární vedení tiskové hlavy i tiskové platformy.



Obr. 42 Ender 3 použitý k tisku nástrojů

Tab. 2 Parametry 3D tiskárny Ender 3 [17]

Technologie	FFF
Velikost stroje [mm]	440x440x465
Velikost tiskového prostoru [mm]	220x220x250
Přesnost tisku [mm]	± 0,1
Teplota trysky [°C]	≤ 255
Teplota podložky [°C]	≤ 100
Příkon stroje [W] ¹	≤ 270
Hmotnost stroje [kg]	6,62
Cena [\$]	189

Tisk byl nastaven v programu Prusa slicer. Základní parametry tisku nastavené ve sliceru jsou sepsány v tab. 3.

Tab. 3 Parametry tisku pro díl č.1

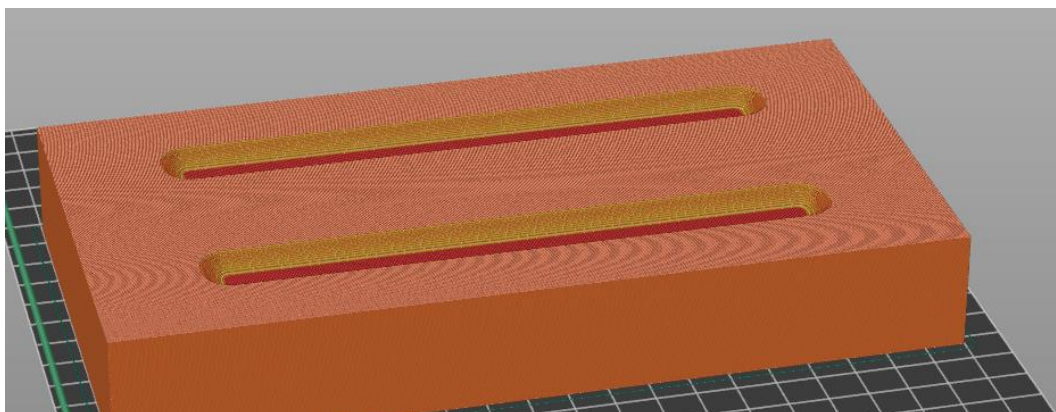
Výška vrstvy [mm]	0,3
Množství výplně [%]	100
Počet perimetrů	3
Průměr trysky [mm]	0,4
Rychlost tisku perimetrů [mm/s]	50
Rychlost tisku výplně [mm/s]	85
Rychloposun [mm/s]	180
Teplota podložky [°C]	60
Teplota trysky [°C]	210

Pro tisk bylo zvoleno nastavení se 100 % výplní, protože ze simulací je patrné, že k lisování budou zapotřebí vysoké lisovací síly, které musí nástroje vydržet. Z důvodu co nejlepších mechanických vlastností byla navržena výška jedné vrstvy 0,3 mm. Díky tomu také bylo možné zkrátit čas tisku. Při použití standartní výšky vrstvy 0,2 mm by celkový čas tisku spodního nástroje trval 1 d a 8 h, zatímco s použitím výšky vrstvy 0,3 mm by měl čas tisku z dat ze sliceru trvat 23 h. Rozdíl v době tisku dolního nástroje mezi těmito dvěma nastaveními je přibližně 9 h. Data sliceru vždy neodpovídají realitě, proto nelze přesný čas určit. V případě horního nástroje rozdíl činí necelých 9 hodin. Nastavení teploty trysky zvoleno (podle řešerše v kapitole 4.3.4) 210 °C pro co nejlepší mechanické vlastnosti. Teplota podložky 60 °C má za cíl optimální přilnutí první vrstvy tisku a pevné držení výtisku po celou dobu stavby.

¹ Nejvyšší odběr má tiskárna při nahřívání. Během tisku z materiálu PLA se odběr pohybuje okolo 30W.

Z pokročilého nastavení zmíním především tzv. ironing, neboli vyžehlení nejvyšší vrstvy na modelu. Toto vyžehlení spočívá v tom, že po dokončení poslední vrstvy tryska do této vrstvy udělá ještě další speciální výplň. Tím, jak nahřátá tryska přejíždí po už naneseném materiálu, vyhlazuje nerovnosti vzniklé předchozím tiskem a zároveň je extruderem vytlačováno malé množství materiálu, které zacelí případné mezery. Výsledkem tohoto procesu je velmi hladký, pro 3D tisk netypický, povrch nejvyšší vrstvy. Nevýhodou ironingu je nezanedbatelné prodloužení doby tisku. [18] V případě dolního nástroje to je prodloužení tisku přibližně o 3 hodiny.

Na obr. 43 je zobrazen naslicovaný dolní nástroj.



Obr. 43 Dolní nástroj dílu 1 ve sliceru

6.1.5 Lisování

Lisování dílu č. 1 bylo provedeno na ručním hydraulickém lisu, viz obr. 44, s maximální lisovací silou přibližně 450 kN. Na obr. 45 je zobrazen štítek použitého stroje. Tento lis byl vybrán z důvodu možnosti aplikovat vysoké lisovací síly a také proto, že dostupné trhací zařízení dokáže zaznamenávat průběh síly pouze do 100 kN. Z dat získaných ze simulací je patrné, že nutné síly pro vylisování dílu č. 1 budou tuto hodnotu výrazně převyšovat.



Obr. 44 Hydraulický lis použitý pro lisování prvního dílu



Obr. 45 štítek lisu

Materiál použitého plechu pro lisování byl DC 01. Jeho mechanické vlastnosti jsou v tab. 4 a chemické složení v tab. 5.

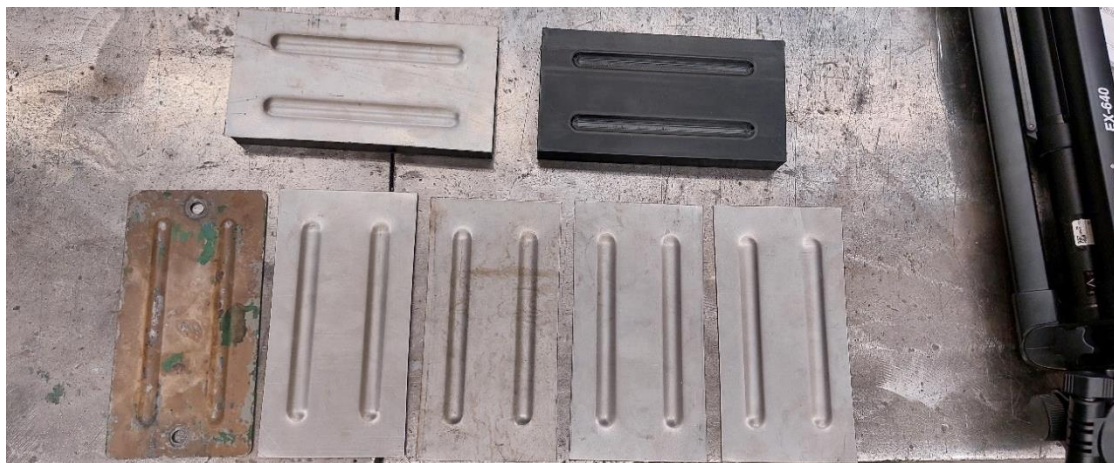
Tab. 4 Mechanické vlastnosti DC 01 dle ČSN EN 10152 [19]

Značení materiálu	Mez kluzu	Mez pevnosti	Tažnost
	$R_{p0,2}$	R_m	$A_{80\text{ mm}}$
	MPa	MPa	%
DC01	140-300	270- 410	≥ 28

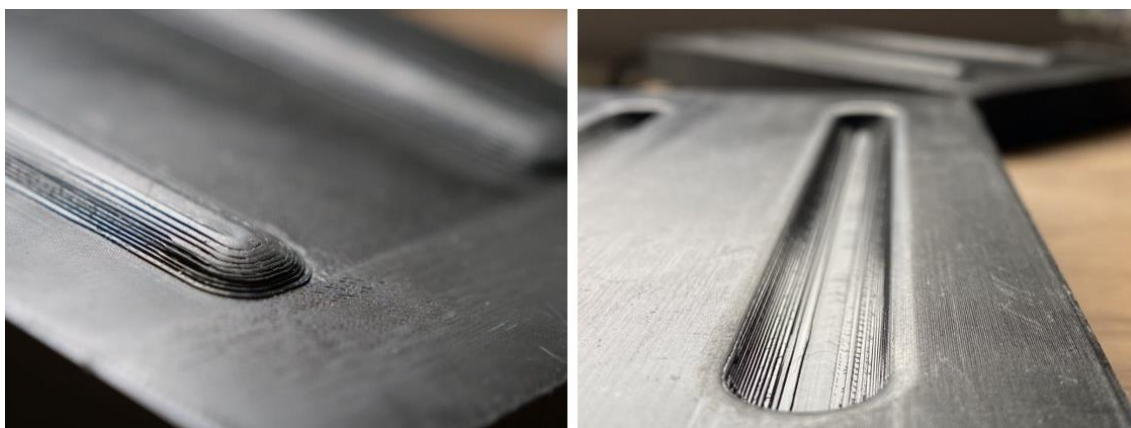
Tab. 5 Chemické složení DC 01 dle ČSN EN 10152 [19]

Značení materiálu	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]
DC01	$\leq 0,12$	$\leq 0,50$	$\leq 0,6$	$\leq 0,065$	$\leq 0,045$	$\geq 0,010$

Při lisování jsme vyhodnotili, že maximální lisovací síla pro tuto sadu nástrojů bude 200 kN. Celkem bylo odlisováno 5 kusů, viz obr. 46, a po těchto pěti cyklech je na nástrojích zřejmé mírné opotřebení. Na dolním nástroji se vytvořil v oblasti výstupku odsazený obrys. Na horním nástroji se mírně zploštily výstupky. Opotřebení je zobrazeno na obr. 47.



Obr. 46 Vylisované plechy dilu č.1



Obr. 47 Detaily deformace nástrojů po lisování u dílu 1

6.1.6 Shrnutí

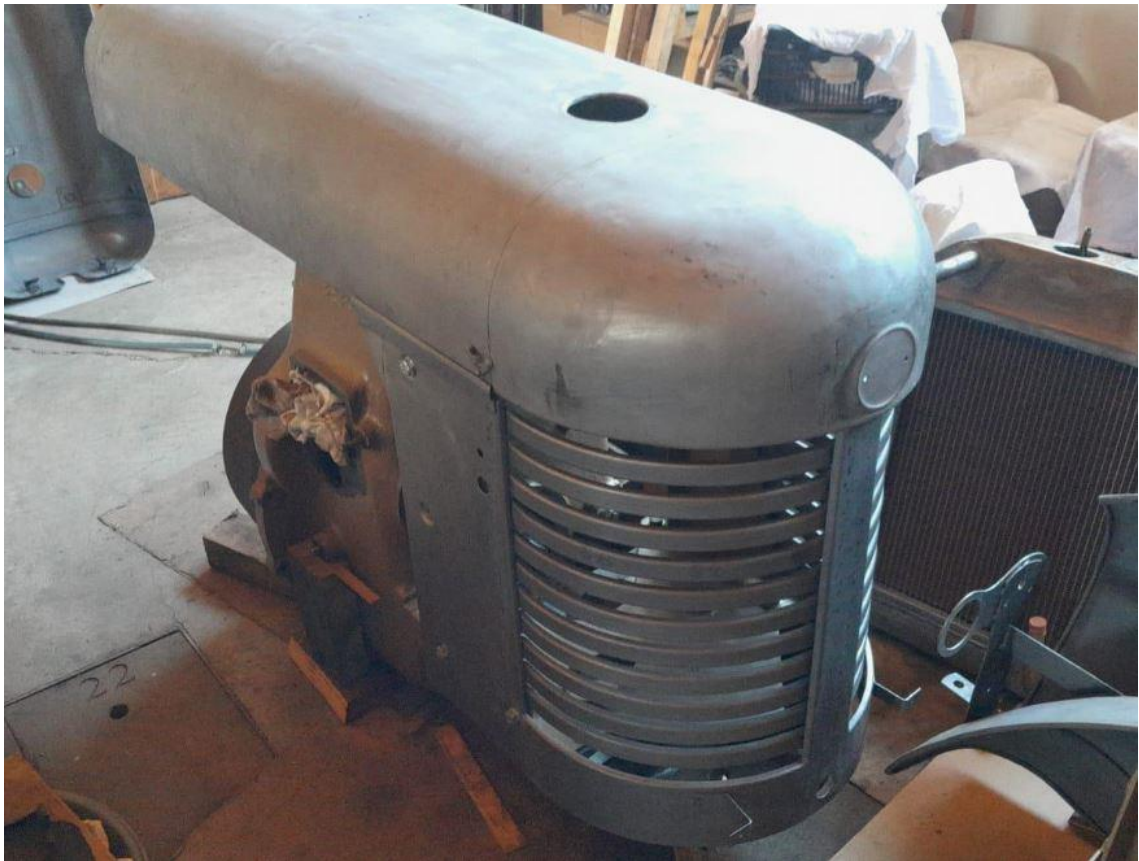
Zadaný díl č. 1 Kryt se s mírnou odchylkou tvaru, nemajíc na funkčnost dílu žádný vliv, podařilo vylisovat za použití 3D tištěných lisovacích nástrojů z PLA a ručního hydraulického lisu. Kvůli vysokým lisovacím silám zjištěným z numerické simulace byla nakonec součást lisována z 1,5 mm tlustého plechu místo 2 mm, ze kterého je originální díl.

Originál tohoto krytu ze servisní skříňky Zetoru 15 je dnes v dobrém stavu prakticky nesehnatelný. Traktor Zetor 15 je zobrazen na obr. 48. Na internetu je možné vyhledat druhovýrobní kusy, které se vyráběly z hliníkových plechů. 3D tištěné plastové nástroje se ukázaly jako velmi levná a relativně rychlá možnost, jak vcelku přesně vyrobit požadovaný díl v malém množství kusů. V porovnání s dostupným dílem z druhovýroby, který se nechá koupit za 453 CZK [20], se výroba popisována v této kapitole vyplatí, po zahrnutí ceny za materiál pro výrobu dílu včetně naformátování na požadované přístřihy, za materiál na výrobu nástrojů, energie apod., při výrobě čtyř a více kusů. V případě, že by se do nákladů na výrobu počítal i jednorázový výdaj v podobě zakoupení tiskárny Ender 3 použité v experimentu, se vlastní výroba začne vyplácet po přibližně třinácti vyrobených kusech.

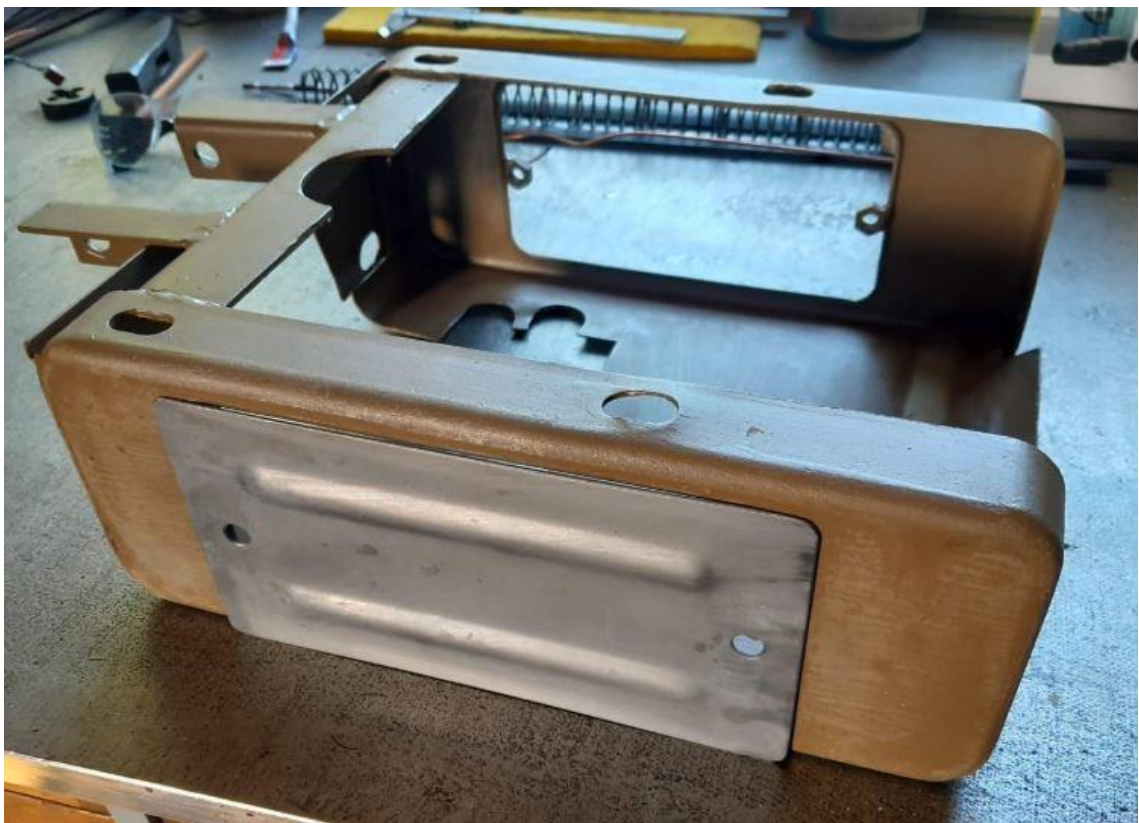
Výroba zadaného dílu č. 1 je velmi dobrou ukázkou využitelnosti 3D tištěných nástrojů pro lisování plechu. Na obr. 49 je ukázán traktor Zetor 15 v procesu renovace, k jehož servisní skřínce na obr. 50 byl kryt vyráběn.



Obr. 48 Traktor Zetor 15 [26]



Obr. 49 Zetor 15 v procesu renovace

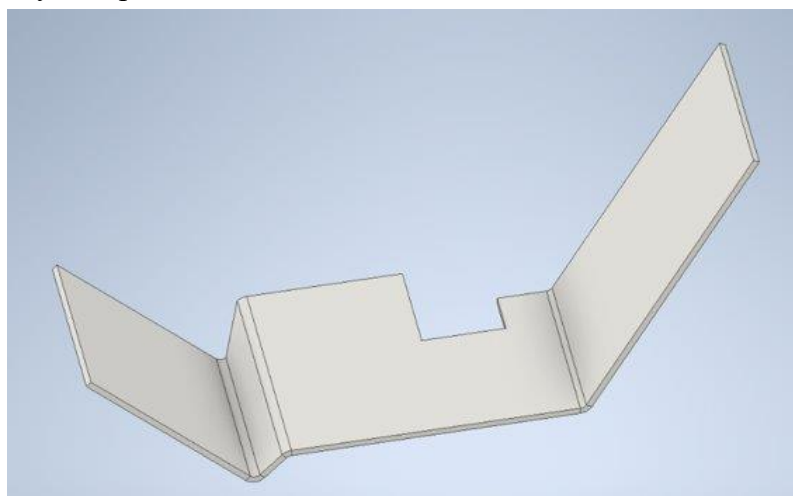


Obr. 50 Servisní skříňka Zetoru 15 s vyráběným krytem

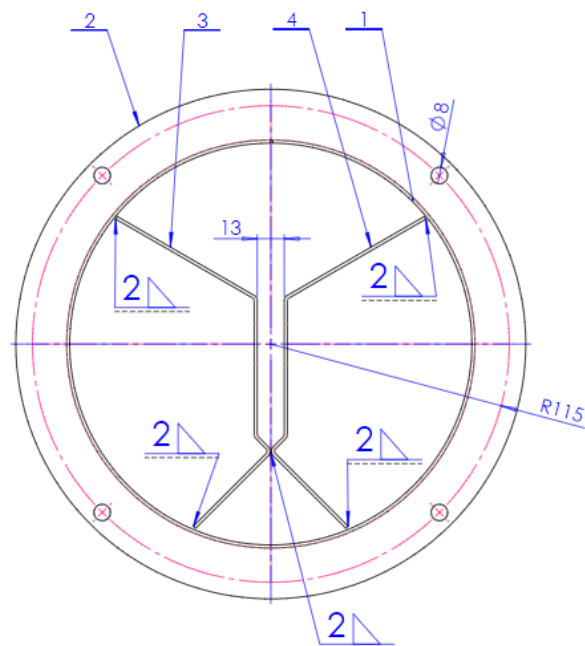
6.2 Díl č.2 Plech příruby

6.2.1 Analýza dílu

Zadaný díl č. 2, jehož 3D model je zobrazen na obr. 51, je vyztužovací součást ze sestavy příruby. Schéma příruby je na obr. 52. Na schématu pod označením č. 1 je tělo plechové příruby, č. 2 čelo příruby a č. 3 i č. 4 jsou plechy příruby. Jedna strana plechu příruby je symetricky převrácena od druhé strany plechu příruby. Nejedná se tedy o totožný díl, nicméně výroba se liší pouze ve vložení přístříhu do nástroje o 180° otočeného podle podélné osy. Díl se do současnosti vyráběl na ohraňovacím lise, to mělo tu nevýhodu, že díl je vyráběn na tři operace a může zde vznikat nepřesnost. Jednalo se o malosériovou výrobu přibližně 300 kusů ročně.

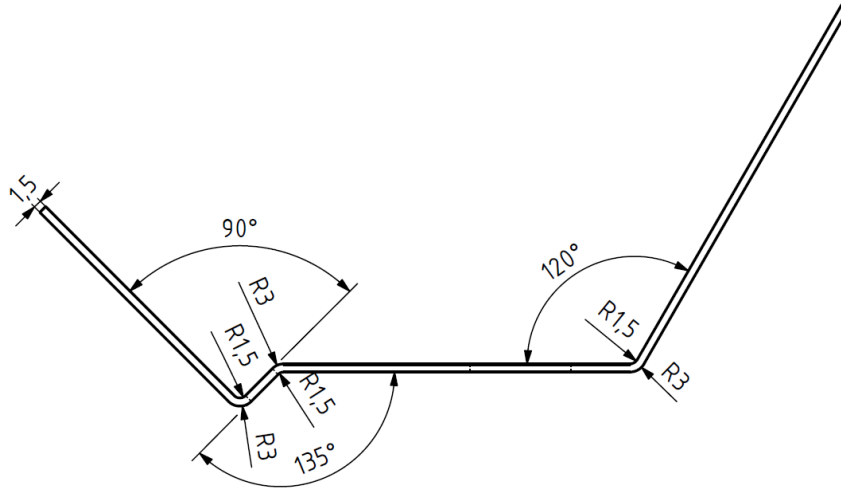


Obr. 51 Model zadaného dílu č.2 plechu příruby

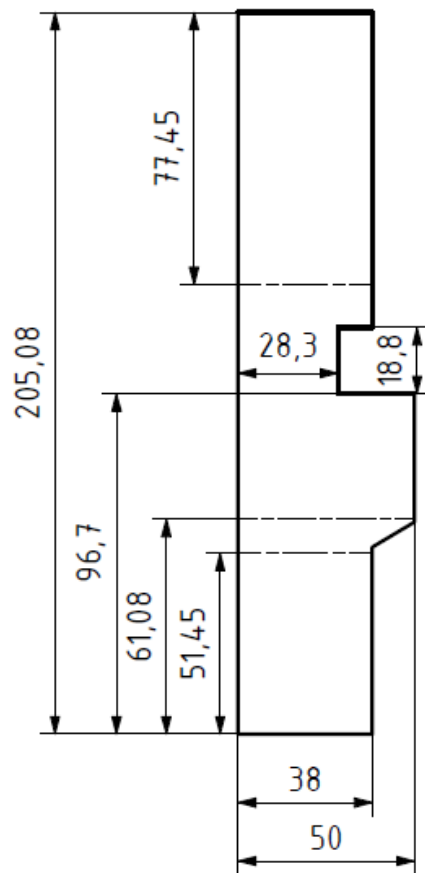


Obr. 52 Schéma plechu příruby

Přístřih je relativně složitě tvarovaný, nicméně z hlediska lisování se jedná pouze o prosté ohýbání ve třech místech na plechu. Na obr. 53 je zobrazen pohled na zadanou součást s označenými úhly a rádií ohybu. Na obr. 54 je možné vidět výkres přístřihu pro plech příruby.



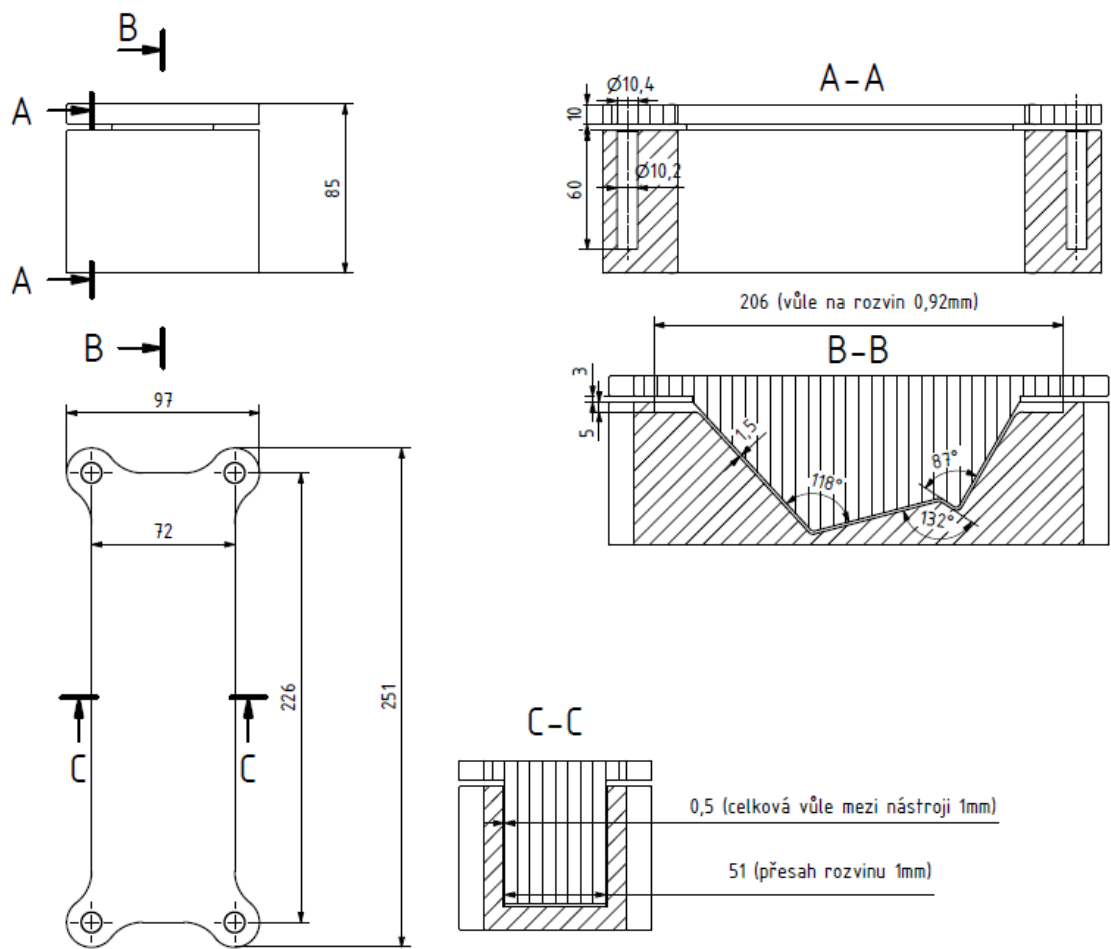
Obr. 53 Výkres dílu 2



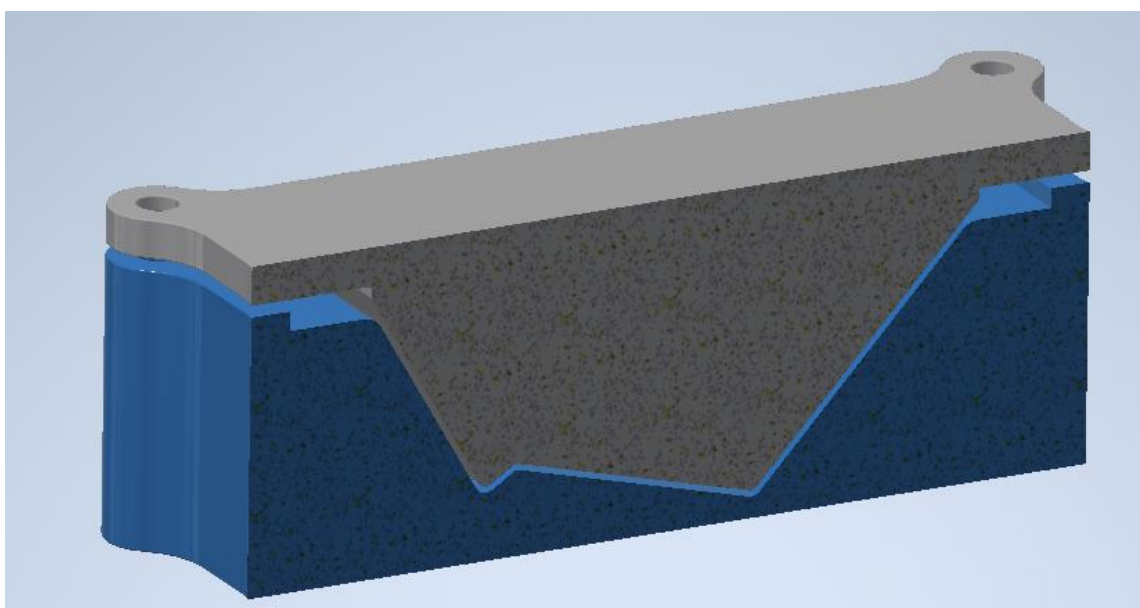
Obr. 54 Výkres přístřihu plechu příruby

6.2.2 Nástroje

Původní geometrie nástrojů byla vytvořena podobně jako v případě prvního dílu: jako negativ modelu vyráběné součásti s tím rozdílem, že jednotlivé úhly ohybu byly v nástrojích upraveny s přihlédnutím k odpružení dílu po vyjmutí z nástroje. Více o nastavení úhlů ohybu v kapitole 6.2.3. Pro zvýšení tuhosti a zlepšení vedení přístřihu při lisování byly na podélné straně dolního nástroje přidány boky. Kvůli ustavení plechu před lisováním bylo na dolním nástroji vytvořeno osazení a jako poslední úprava před tiskem byly do horního nástroje přidány průchozí a do dolního nástroje neprůchozí otvory sloužící k vedení nástrojů proti sobě přes spojovací člen v podobě tyčovin nebo šroubů. Výkres sestavy nástrojů je zobrazen na obr. 55 a vizualizace modelu sestavy je na obr. 56.

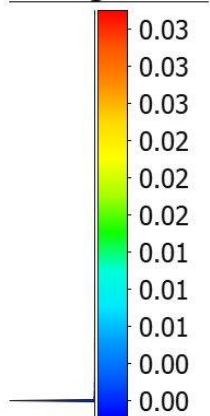


Obr. 55 Výkres sestavy nástrojů pro díl č. 2

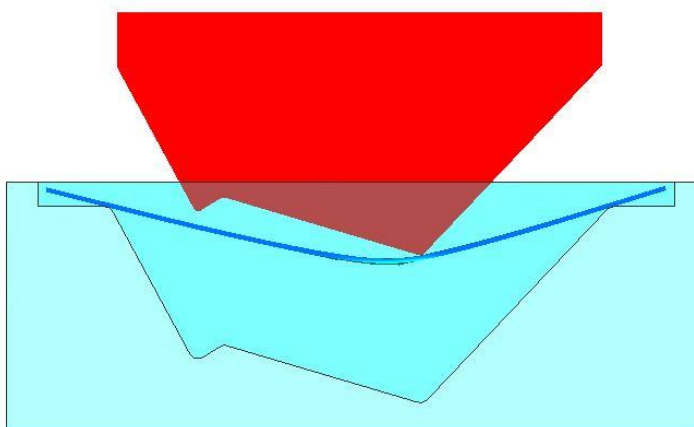


Obr. 56 Vizualizace nástrojů v řezu

Damage

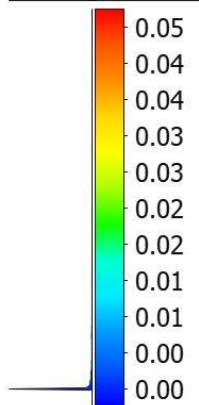


max: 0.39
min: 0.00

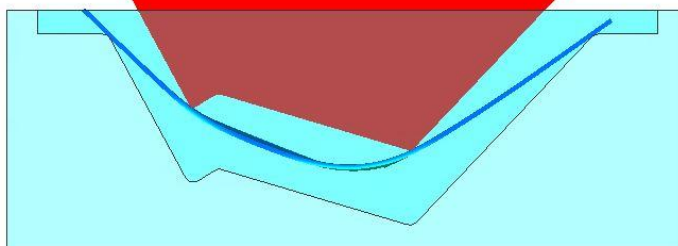


Obr. 59 33 % průběh simulace dílu č. 2

Damage

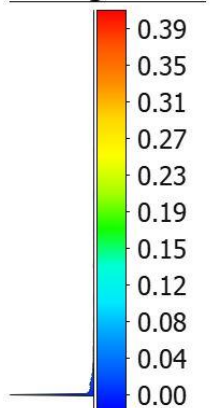


max: 0.39
min: 0.00

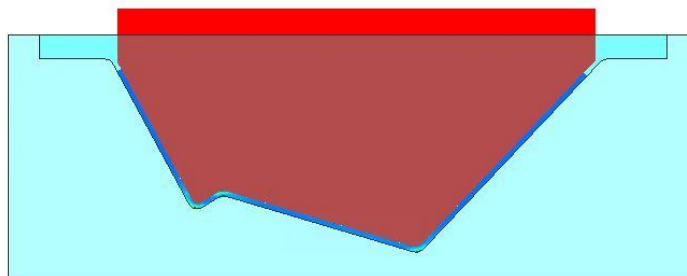


Obr. 60 67 % průběh simulace dílu č. 2

Damage



max: 0.39
min: 0.00



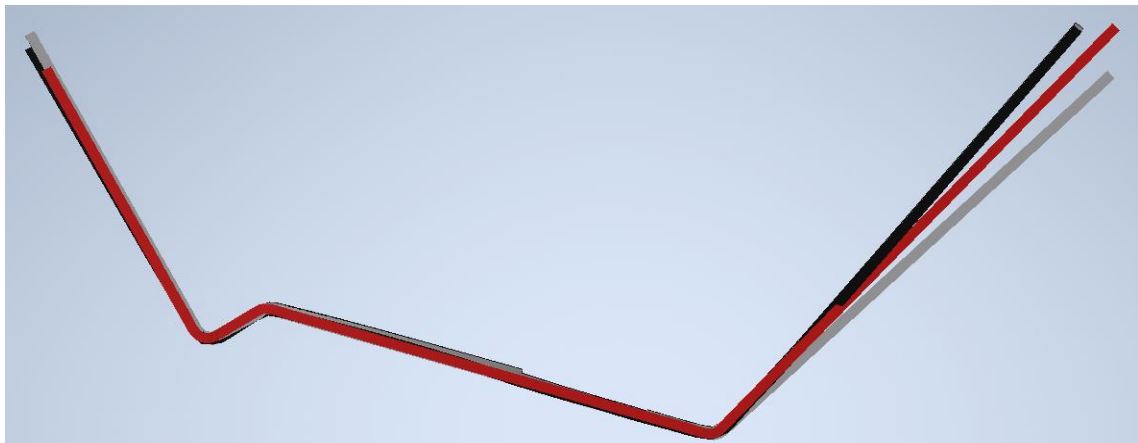
Obr. 58 100 % průběh simulace dílu č. 2



Obr. 61 Výsledná geometrie výlisku z první simulace ze Simufact formingu

Na obr. 61 je zobrazen výlisek z první simulace s vyznačenými úhly po odpružení. Pro další simulace jsem tedy iteračně měnil geometrii nástrojů, abych se simulovaným výliskem dostal co možná nejbližší požadovanému tvaru.

Souběžně s první simulací probíhalo porovnání výsledků mezi výpočetními programy Simufact forming a Autoform. Bohužel dostupná knihovna Autoformu neobsahovala materiál S235, takže simulace proběhla s materiálem S355, jenž byl dostupný v obou programech. Na obr. 62 je zobrazeno srovnání geometrií simulovaných výlisků s modelem součásti. Černý model je výlisek ze Simufact formingu, červený z Autoformu a šedý je požadovaný model součásti.



Obr. 62 Srovnání výsledků z Autoformu a Simufact formingu

Z porovnání geometrií je patrné, že i při použití stejné geometrie nástrojů, stejného materiálu a stejných podmínek lisování, nejsou výsledky z obou softwarů stejné. Může to být způsobeno rozdílnou filozofií řešičů nebo např. netotožnou materiálovou kartou použitého materiálu.

Z důvodu nejednotných výsledků ze simulačních softwarů bylo rozhodnuto, že se přejde k reálnému experimentálnímu lisování.

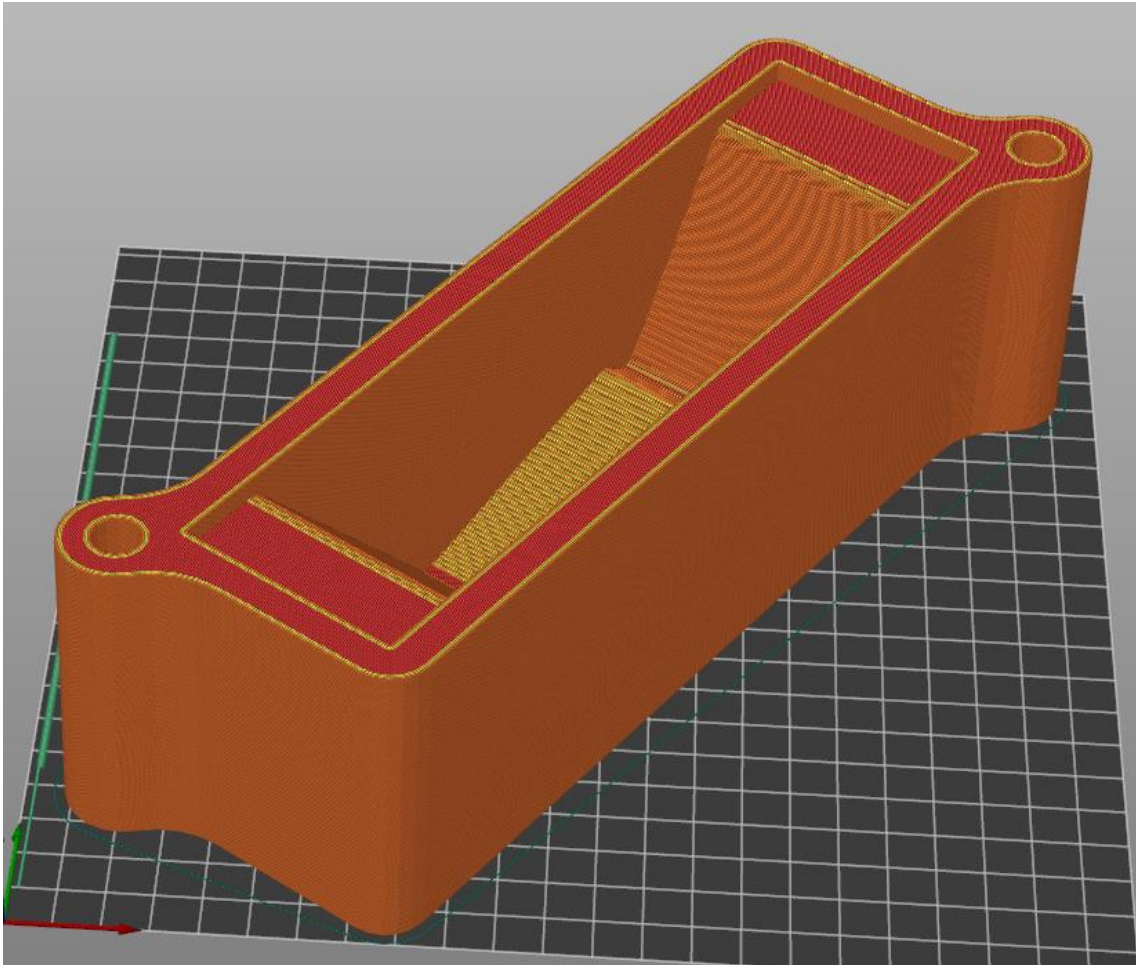
Na obr. 63 je pro zajímavost závislost lisovací síly na času lisování pro tři různé geometrie nástrojů, při rychlosti zdvihu stroje pro všechny varianty stejných 2 mm/s. Varianta S235_1 a S355 mají totožnou geometrii nástrojů, totožné podmínky. Jediné, co se v procesu simulace změnilo, je materiál plechu. V případě varianty S355 software vypočítal více kroků, proto je křivka především na konci lisovacího času více vyhlazená. Množství kroků, které program vypočítá, je voleno automaticky. Zajímavé je, že pro pevnější materiál S355 vychází nižší maximální lisovací síla než v případě varianty méně pevného S235_1.



Obr. 63 Závislost lisovací síly F na času lisování t pro různé varianty

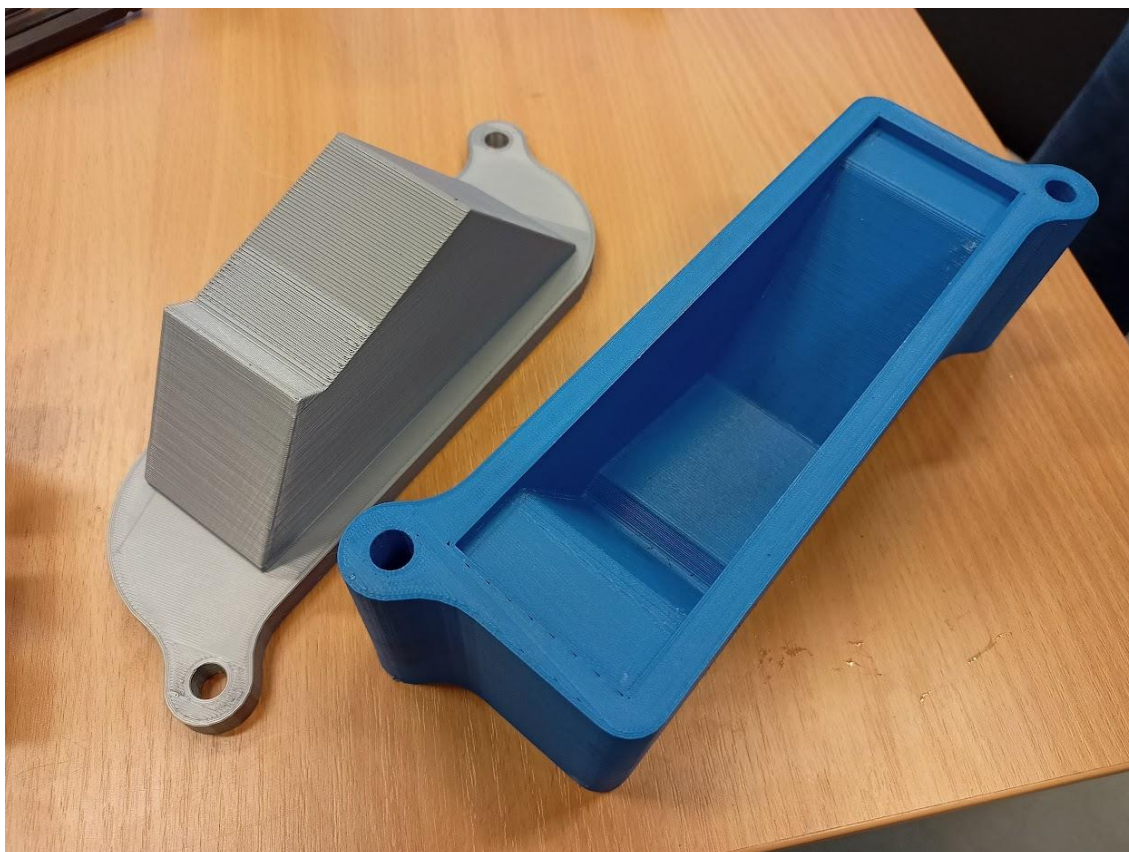
6.2.4 Tisk

Tisk nástrojů byl realizován stejně jako v případě prvního dílu na tiskárně Ender 3 PRO, viz kapitola 6.1.4. Ohybník byl tisknut se stejnými parametry jako nástroje v případě prvního dílu, viz tab. 3. U ohybnice došlo ke změně obsahu vnitřní výplně, a to na 50 %. Dále bylo kvůli velikosti tiskové podložky potřeba upravit modely nástrojů, viz obr. 64. Díry pro vedení přes spojovací prvek byly tištěny pouze dvě v jedné diagonále nástroje.



Obr. 64 Naslicovaná ohybnice pro díl č. 2

Tisk ohybnice s 50 % výplní trval přibližně 19 h. V případě tisku se 100 % výplní by tisk trval 29 h. Snížením vnitřní výplně o polovinu při tisku ohybnice lze ušetřit přibližně 10 hodin tisku. Ohybník se 100 % výplní se tiskl přibližně 17 h. Oba vytištěné nástroje jsou na obr. 65.



Obr. 65 Vytisknuté nástroje pro díl č. 2

6.2.5 Lisování

Pro první zkušební lisování byl zvolen netvarovaný přístřih délky 205 mm, šířky 50 mm a tloušťky 0,6 mm z materiálu HX180. Mechanické vlastnosti materiálu HX180 jsou v

tab. 6 a chemické složení v tab. 7. Lisovací síla pro tento přístřih byla pouhých 10

značení materiálu	mez kluzu	mez pevnosti	tažnost
	$r_{p0,2}$	r_m	$a_{80 \text{ mm}}$
	mpa	mpa	%
hx180	180-230	330- 400	≥ 35

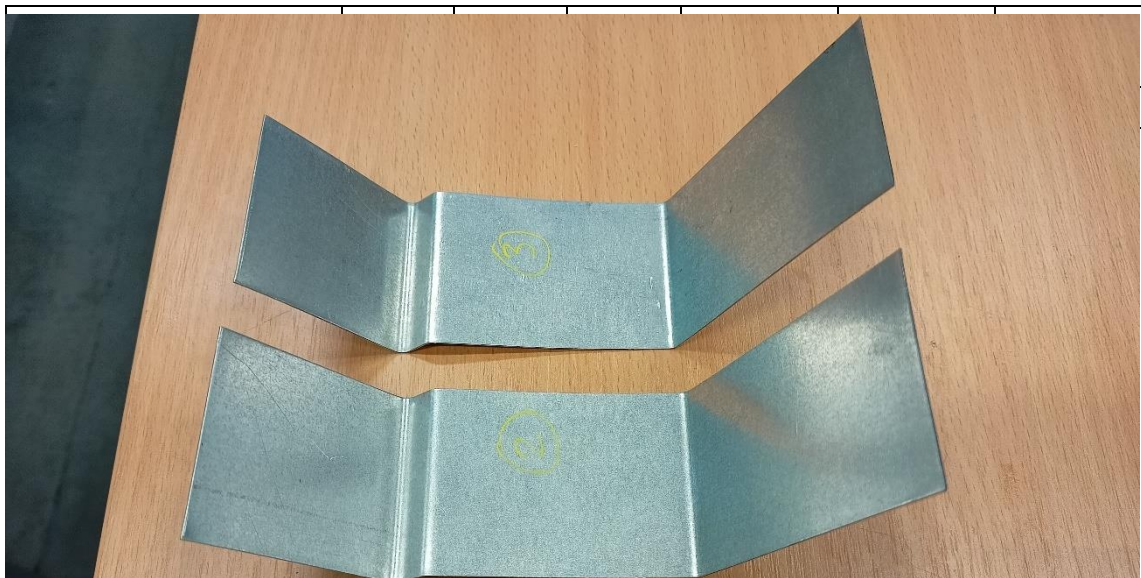
kN a na nástrojích toto lisování nezpůsobilo téměř žádné opotřebení. Celkem byly na hydraulickém lise, viz obr. 44, vylisovány tři kusy, z nichž dva jsou zachyceny na obr. 67.

Značení materiálu	Mez kluzu	Mez pevnosti	Tažnost
	$R_{p0,2}$	R_m	$A_{80 \text{ mm}}$
	MPa	MPa	%

HX180	180-230	330- 400	≥ 35
-------	---------	----------	-----------

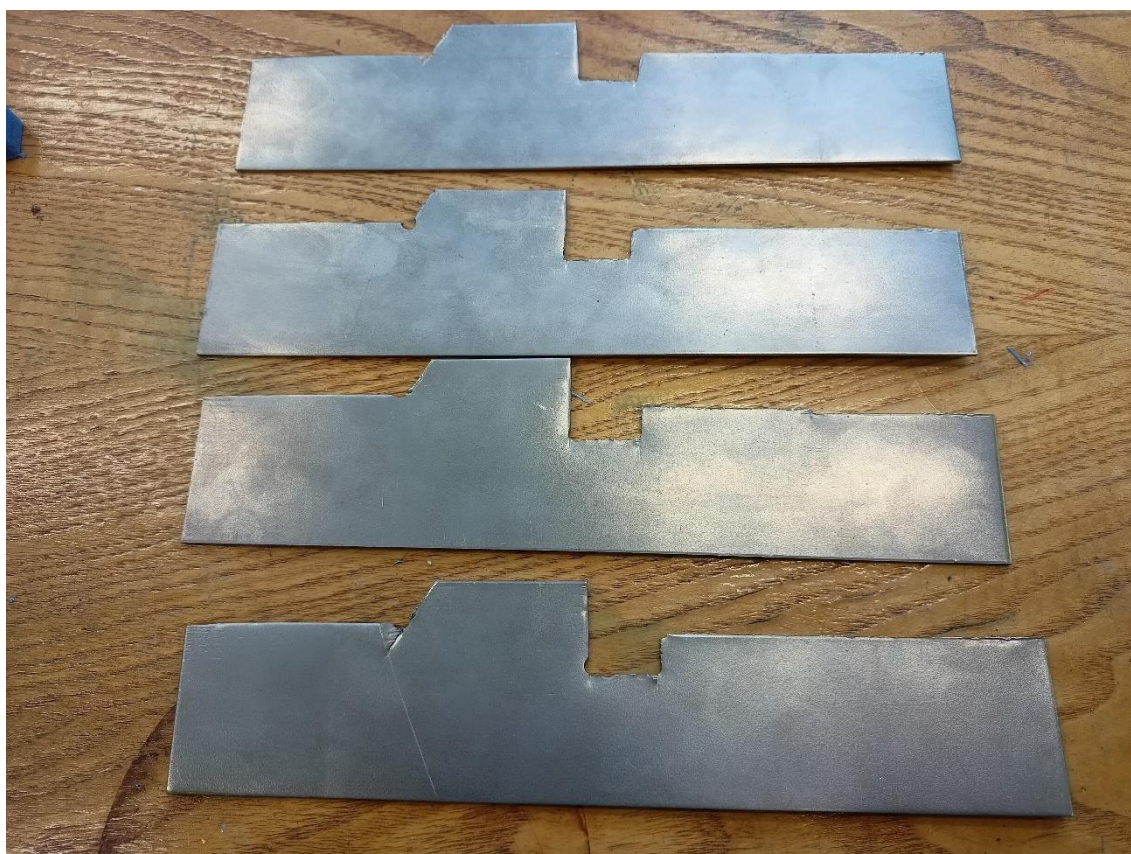
Tab. 6 Mechanické vlastnosti HX180 dle ČSN EN 10 346 [21]

Tab. 7 Chemické složení HX180 dle ČSN EN 10 346 [21]



Obr. 67 Vylisky ze zkušebního lisování plechu příruby

Po úspěšném zkušebním lisování bylo potřeba připravit tvarované přístřihy požadované tloušťky. Bohužel nebyly k dispozici nekonvenční technologie, jako např. laser, který by byl pro přípravu přístřihu ideální. Požadovaného tvaru bylo dosaženo pomocí pákových nůžek a ruční prostřihovačky. Připravené přístřihy jsou zobrazeny na



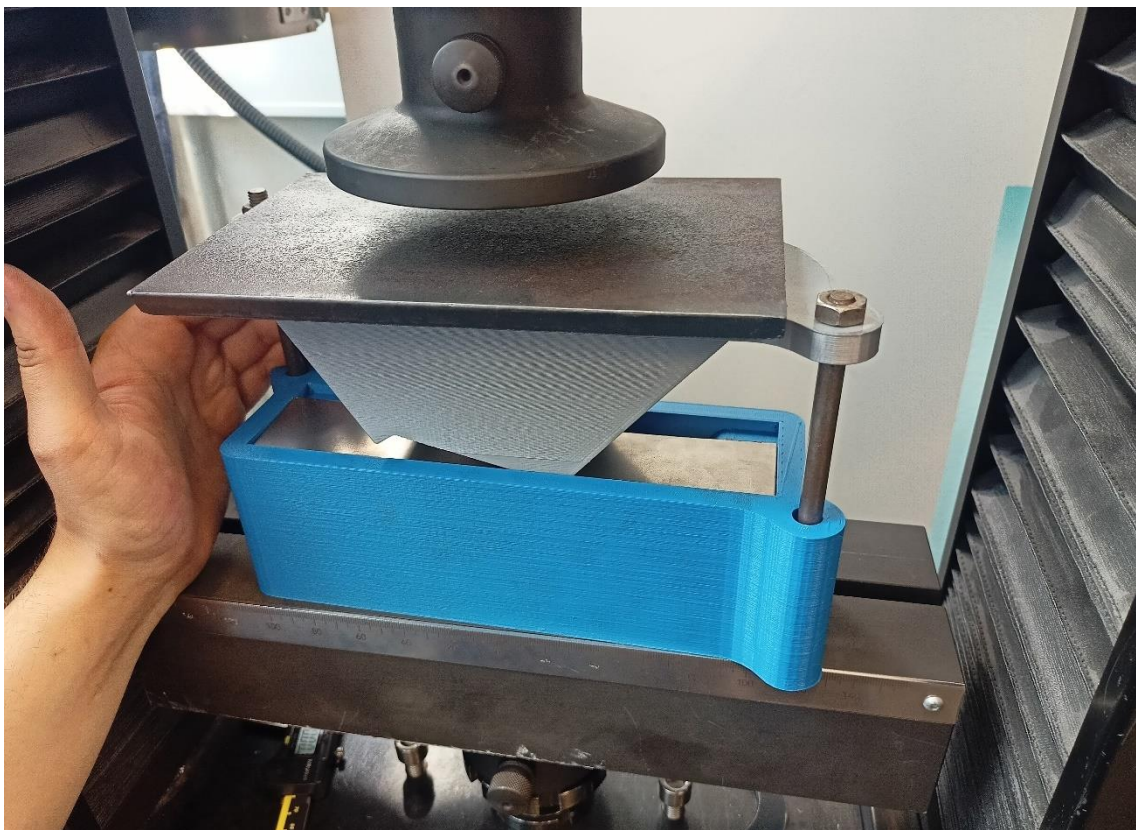
obr. 66. Jako materiál byla zvolena aktuálně dostupná hlubokotažná ocel DC01. Mechanické vlastnosti a chemické složení materiálu DC01 jsou v tab. 4 a tab. 5.

Lisování s takto připravenými přístřihy probíhalo na trhacím stroji LabTest Model 5.100SP1, aby bylo možné změřit průběh lisovací síly. Štítek stroje viz obr. 68.



Obr. 68 Štítek trhacího stroje

Na obr. 69 je zobrazeno uložení nástrojů ve stroji.



Obr. 69 Uložení nástrojů ve stroji

První lisování probíhalo pomocí ručního ovládání stroje, aby bylo možné zjistit maximální lisovací sílu pro nastavení automatického lisování. Síla zjištěná při prvním lisování pro celkové vylisování součásti byla 28 kN.

Lisování druhého přístřihu probíhalo v automatickém režimu. Na obr. 70 je zobrazen průběh lisovací síly na zdvihu stroje při lisování druhého přístřihu. K této závislosti je přidána závislost síly na zdvihu získaných ze simulace. V simulaci byla použita stejná geometrie nástrojů a stejný materiál jako při reálném lisování. Závislosti si vzájemně vcelku odpovídají.



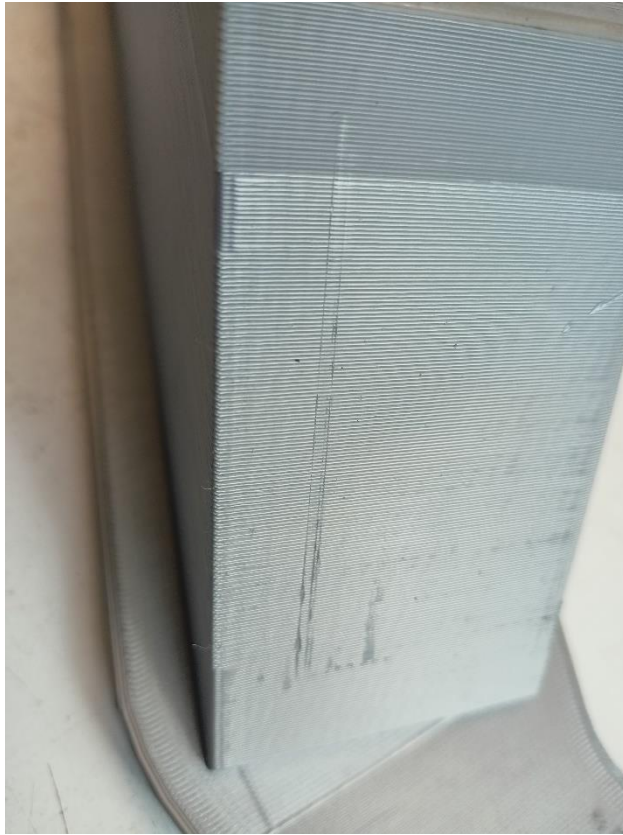
Obr. 70 Porovnání závislosti lisovací síly na zdvihu stroje mezi simulací a reálným lisováním

Poslední, třetí, lisování proběhlo opět s ručním ovládáním. Tentokrát bylo cílem použít velmi vysokou lisovací sílu a otestovat odolnost nástrojů. Maximální hodnota lisovací síly byla 65 kN. Toto vysoké zatížení způsobilo na ohybnici, která měla pouze 50 % výplň, plošné poškození zapříčiněné vtlačením plechu do nástroje, viz obr. 71. Oproti tomu na ohybníku, který měl výplň 100 %, byly jediným viditelným poškozením



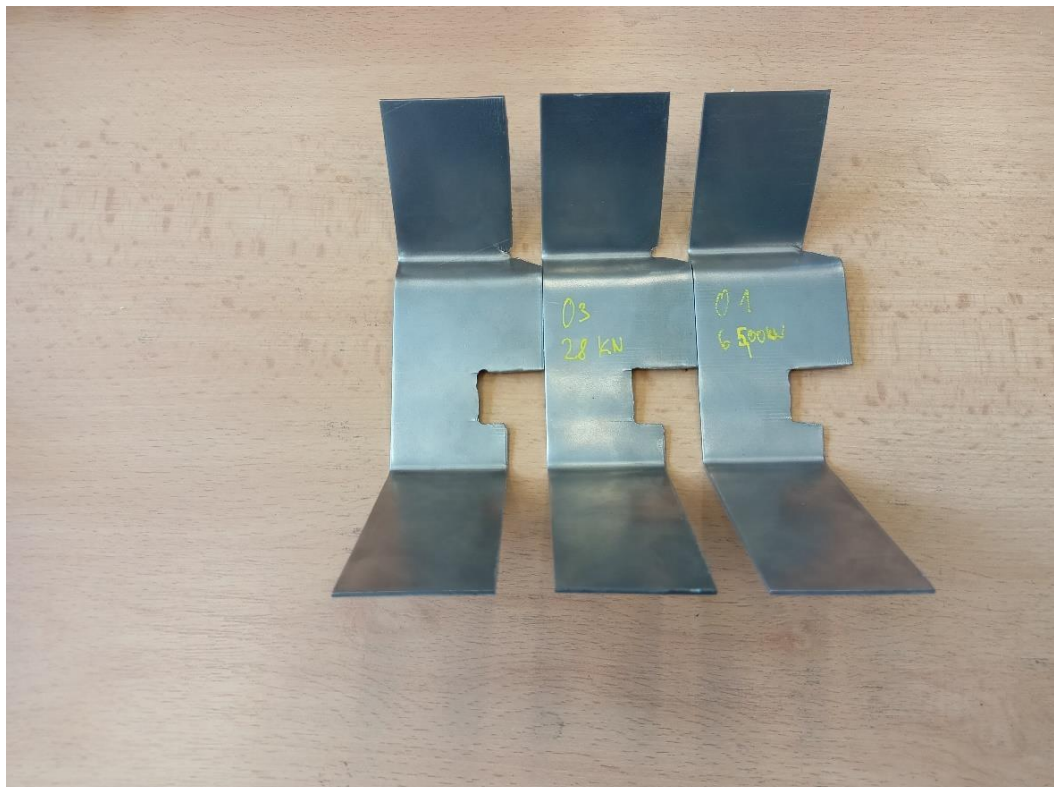
Obr. 71 Ohybnice po lisování

rýhy, viz obr. 73. Tyto rýhy způsobené ostrou hranou na přístřihu, která vznikla při přípravě přístřihu.



Obr. 73 Ohybník po lisování

Všechny tři výlisky jsou zobrazeny na obr. 72.

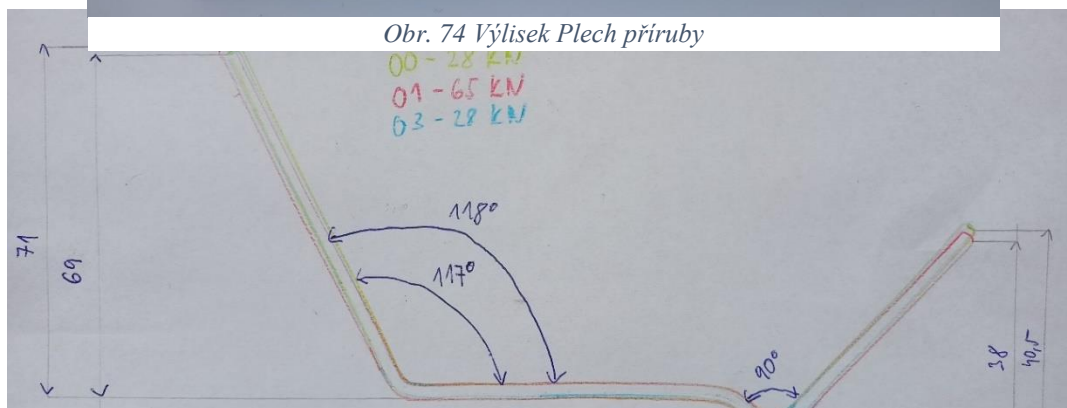


6.2.6 Shrnutí

Zadaný díl č. 2 Plech příruby se podařilo vylisovat, viz obr. 74. Pomocí numerických simulací se nepodařilo přesně určit úhly odpružení materiálu, a proto vylisované kusy nemají přesně požadovanou geometrii. Nicméně lisovatelnost dílu byla ověřena a pro přesnější výlisky by bylo možné vytisknout další sadu nástrojů, která by byla geometricky zkorigována. Na obr. 75 je zobrazeno jednoduché srovnání vylisovaných kusů. Výlisky byly společně s papírem postupně přichyceny svěrkou ke stolu a byl obkreslen jejich tvar. Následně bylo možné pomocí pravítka a úhloměru naměřit hodnoty úhlů a vzdáleností. Výlisek lisovaný silou 65 kN má téměř totožnou geometrii jako nástroje. Do úhlu odpružení nejspíše promlouvá i pružná deformace nástrojů v průběhu lisování. Cena za 1 kg materiálu PLA se pohybuje v závislosti na výrobci a dalších okolnostech okolo 500 CZK. [22] Jedna sada nástrojů pro výrobu dílu č. 2 na materiálu stojí 500 CZK. Při použití 100 % výplně u ohybnice by cena za materiál pro jednu sadu nástrojů byla 680 CZK.



Obr. 74 Výlisek Plech příruby



Obr. 75 Srovnání výlisků dílu 2

7 Závěr

Ve své diplomové práci jsem zpracoval téma návrhu jednoduchých 3D tištěných lisovacích nástrojů. V teoretické části se věnuji základům plošného tváření a především procesu ohýbání. Dále popisuji technologii plastového 3D tisku a jeho možné uplatnění při výrobě ohýbacích nástrojů. V praktické části navrhuji plastové aditivně vyrobené nástroje pro lisování dvou zadaných součástí. Následně provádím numerické simulace tvářecího procesu a nakonec i samotné lisování. Oba díly se podařilo s uspokojivou měrou vylisovat.

Výlisek dílu č. 1 Kryt neodpovídá přesně svou geometrií požadovanému tvaru. Toho by pravděpodobně bylo dosaženo s použitím vyšší lisovací síly, kterou by ale plastové nástroje nevydržely. Místa, ve kterých geometrie na dílu neodpovídá, nemají na funkčnost dílu vliv, a jelikož šlo o výrobu několika jednotek kusů, ukázalo se použití plastového 3D tisku k výrobě lisovacích nástrojů jako velmi vhodná volba. Díl č.1 Kryt je téměř ideálním použitím 3D tištěných nástrojů na lisování plechu, protože se jedná o díl z veteránského stroje, který je v dnešní době téměř nesehnatelný a levnější, rychlejší a přesnější alternativa výroby jednotek kusů takovýchto dílů neexistuje.

U zadaného dílu č. 2 Plechu příruby se také podařilo díl vylisovat. Při práci na numerických simulacích bylo zjištěno, že pro velmi přesné výsledky z těchto simulací odpovídající reálnému lisování by bylo potřeba věnovat se každému detailu v nastavení simulace a nejlépe použít materiálový model souhlasný materiálu při lisování. To by znamenalo provést měření na stejném plechu, ze kterého se následně bude lisovat. V případě výroby ocelových nástrojů konvenčním způsobem by se tato časová a zdrojová investice určitě vyplatila, ale při použití plastových nástrojů 3D tisk umožňuje rychle a velmi levně vyrobení další sady nástrojů v případě nějaké chyby na sadě první, a proto se investice do přesnosti numerických simulací nevyplatí.

Na práci by bylo možné navázat např. s větším zaměřením na numerické simulace. Software Simufact forming umožňuje výpočet deformovatelných nástrojů. Pokud by se naměřila data pro vytvoření materiálové karty materiálu PLA a vložil by se přesně vygenerovaný model nástrojů ze sliceru, včetně tvaru a orientace použité výplně, bylo by možné se simulací více přiblížit reálnému lisování.

Dalším možným pokračováním této diplomové práce by mohlo být prozkoumání vlivu tiskových parametrů přímo pro určitý vyráběný nástroj a nalezení kombinace tiskových parametrů pro nejlepší mechanické vlastnosti daného nástroje. Ověření mechanických vlastností nástrojů by mohlo být realizováno lisováním série kusů. Dalším výstupem tohoto měření by mohlo být zjištění, kolik dílů je na sadě nástrojů možné odlisovat, než se na nástrojích projeví únavové vady vedoucí k nekonzistentním výsledkům.

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma neutrální osy	11
Obr. 2 Odpružení materiálu u V a U ohybu.....	11
Obr. 3 Volba orientace směru vláken materiálu	12
Obr. 4 Různé způsoby ohybu.....	13
Obr. 5 Možnosti ohraňování	14
Obr. 6 Postupná výroba součásti ohraňováním	14
Obr. 7 Lemování	15
Obr. 8 Příklady lemů.....	15
Obr. 9 Zvlnění a praskání materiálu u lemování	15
Obr. 10 Díly vyráběné zakružováním.....	16
Obr. 11 Schéma zakružování	16
Obr. 12 Schéma rovnání	16
Obr. 13 Použití nástroje vyrobeného FFF k tváření plechu	17
Obr. 14 Použití nástroje vyrobeného FFF k tváření plechu	18
Obr. 15 Použití plastové vložky vyrobené FFF	18
Obr. 16 Nástroj k tváření plechu vyrobený FFF z PLA.....	19
Obr. 17 Schéma vytlačování materiálu ve vrstvách	20
Obr. 18 Kartézská 3D tiskárna Original Prusa XL	21
Obr. 19 Profil filamentu PLA	22
Obr. 20 Ukázka možné orientace tisku.....	23
Obr. 21 Závislost tahového napětí na deformaci pro různou orientaci tisku.....	24
Obr. 22 Závislost tahového napětí na deformaci pro různou výplň	25
Obr. 23 Příklady vzorů výplně.....	25
Obr. 24 Závislost tahového napětí na deformaci pro různé vzory výplně.....	26
Obr. 25 Vliv rychlosti a teploty tisku na různé vlastnosti	26
Obr. 26 Plastová vložka v lise	28
Obr. 27 Plastové ohraňovací nástroje	29
Obr. 28 Lisování PLA nástroji.....	29
Obr. 29 Vylisované plechy	29
Obr. 30 Zadaný díl č.1 Kryt.....	30
Obr. 31 3D vizualizace 1. dílu	30
Obr. 32 Výkres 1. vyráběného dílu.....	31

Obr. 33 Modelová sestava nástrojů a přístříhu pro díl 1	31
Obr. 34 Zapolohování pro díl č.1	33
Obr. 35 Síť pro simulaci Krytu	33
Obr. 36 Průběh simulovaného lisování 33%	34
Obr. 37 Průběh simulovaného lisování 66%	34
Obr. 38 Průběh simulovaného lisování 100%	34
Obr. 39 Závislost F na s první sim. díl 1	35
Obr. 40 Závislost F na s při lisování pro různé tloušťky plechu.....	35
Obr. 41 Srovnání geometrií dolisovaného a nedolisovaného 1,5 mm plechu při simulac	36
Obr. 42 Ender 3 použitý k tisku nástrojů	36
Obr. 43 Dolní nástroj dílu 1 ve sliceru.....	38
Obr. 44 Hydraulický lis použitý pro lisování prvního dílu.....	38
Obr. 45 štítek lisu.....	39
Obr. 46 Vylisované plechy dílu č.1	39
Obr. 47 Detaily deformace nástrojů po lisování u dílu 1	40
Obr. 48 Traktor Zetor 15.....	41
Obr. 49 Zetor 15 v procesu renovace.....	42
Obr. 50 Servisní skříňka Zetoru 15 s vyráběným krytem.....	42
Obr. 51 Model zadaného dílu č.2 plechu příruby	43
Obr. 52 Schéma plechu příruby	43
Obr. 53 Výkres dílu 2	44
Obr. 54 Výkres přístříhu plechu příruby.....	44
Obr. 55 Výkres sestavy nástrojů pro díl č. 2.....	46
Obr. 56 Vizualizace nástrojů v řezu.....	46
Obr. 57 0 % průběh simulace dílu č. 2.....	47
Obr. 59 67 % průběh simulace dílu č. 2.....	48
Obr. 58 33 % průběh simulace dílu č. 2.....	48
Obr. 60 100 % průběh simulace dílu č. 2.....	48
Obr. 61 Výsledná geometrie výlisku z první simulace ze Simufact formingu	49
Obr. 62 Srovnání výsledků z Autoformu a Simufact formingu.....	49
Obr. 63 Závislost lisovací síly F na času lisování t pro různé varianty	50
Obr. 64 Naslicovaná ohybnice pro díl č. 2	51
Obr. 65 Vytisknuté nástroje pro díl č. 2.....	52

Obr. 66 Výlisky ze zkušební lisování plechu příruby.....	53
Obr. 67 Tvarované přístřihy pro díl č. 2	53
Obr. 68 Štítek trhacího stroje	54
Obr. 69 Uložení nástrojů ve stroji.....	54
Obr. 70 Porovnání závislosti lisovací síly na zdvihu stroje mezi simulací a reálným lisováním.....	55
Obr. 71 Ohybnice po lisování	55
Obr. 72 Ohybník po lisování.....	56
Obr. 73 Výlisky plechu příruby	56
Obr. 74 Výlisek Plech příruby	57
Obr. 75 Srovnání výlisků dílu 2.....	57

Seznam tabulek

Tab. 1 Mech vlastnosti PLA	22
Tab. 2 Parametry 3D tiskárny Ender 3	37
Tab. 3 Parametry tisku pro díl č.1	37
Tab. 4 Mechanické vlastnosti DC 01 dle ČSN EN 10152.....	39
Tab. 5 Chemické složení DC 01 dle ČSN EN 10152	39
Tab. 6 Mechanické vlastnosti HX180 dle ČSN EN 10 346.....	52
Tab. 7 Chemické složení HX180 dle ČSN EN 10 346.....	53

Bibliografie

- [1] ZARAGOZA, Veronica, Kedarnath RANE, Matteo STRANO a Michele MONNO. Manufacturing and performance of 3D printed plastic tools for air bending applications. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2021, **66**, 460-469 [cit. 2022-02-10]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2021.04.045
- [2] DVOŘÁK, Milan a Michaela MAREČKOVÁ. *TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ* [online]. Brno, 2006 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/technologie_tvareni/index.htm
- [3] LENFELD, Petr. Technologie tváření kovů. In: *Ksp.tul.cz* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm
- [4] HESTON, Tim. Need a custom press brake tool? Try printing it. In: *The FABRICATOR* [online]. 2018 [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/additivereport/article/additive/need-a-custom-press-brake-tool-try-printing-it>
- [5] HESTON, Tim. Additive manufacturing's potential in low-tonnage bending. In: *The FABRICATOR* [online]. 2020 [cit. 2022-02-13]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/bending/additive-manufacturings-potential-in-low-tonnage-bending>
- [6] HESTON, Tim. Does your shop need a custom press brake tool?. In: *The FABRICATOR* [online]. 2021 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/bending/does-your-shop-need-a-custom-press-brake-tool>
- [7] STRÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research a.s., 2019 [cit. 2022-07-14]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/zaklady-3d-tisku-s-josefem-prusou_490/

- [8] Ultimate Materials Guide - Tips for 3D Printing with PLA. In: *Simplify3D Software* [online]. [cit. 2022-07-14]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pla/>
- [9] RAJ, S., E. MUTHUKUMARAN a K. JAYAKRISHNA. A Case Study of 3D Printed PLA and Its Mechanical Properties. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2018, **5**(5), 11219-11226 [cit. 2022-02-20]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2018.01.146
- [10] DEY, Arup a Nita YODO. A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* [online]. 2019, **3**(3) [cit. 2022-02-20]. ISSN 2504-4494. Dostupné z: doi:10.3390/jmmp3030064
- [11] DOSHI, Manav, Ameya MAHALE, Suraj KUMAR SINGH a Samadhan DESHMUKH. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, **50**, 2269-2275 [cit. 2022-02-21]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.10.003
- [12] GONABADI, H., A. YADAV a S. BULL. The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, **111**(3-4), 695-709 [cit. 2022-02-25]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-06138-4
- [13] ANSARI, Anis a M. KAMIL. Effect of print speed and extrusion temperature on properties of 3D printed PLA using fused deposition modeling process. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, **45**, 5462-5468 [cit. 2022-07-06]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.02.137
- [14] HIKMAT, Mohammed, Sarkawt ROSTAM a Yassin AHMED. Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology. *Results in Engineering* [online]. 2021, **11** [cit. 2022-02-26]. ISSN 25901230. Dostupné z: doi:10.1016/j.rineng.2021.100264

- [15] NAKAMURA, Naotaka, Ken-ichiro MORI, Fumie ABE a Yohei ABE. Bending of sheet metals using plastic tools made with 3D printer. *Procedia Manufacturing* [online]. 2018, **15**, 737-742 [cit. 2022-02-10]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2018.07.312
- [16] TONDINI, Fabio, Ulfar ARINBJARNAR, Alberto BASSO a Chris NIELSEN. 3D printing to facilitate flexible sheet metal forming production. *Procedia CIRP* [online]. 2021, **103**, 91-96 [cit. 2022-07-10]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2021.10.014
- [17] Ender-3. In: *CREALITY* [online]. [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: https://www.creality.com/products/ender-3-3d-printer?spm=..page_1967279.products_display_1.1&spm_prev=..index.header_1.1
- [18] ZUZA, Mikoláš. Guide to Ironing: How to make top surfaces super smooth with PrusaSlicer 2.3 (RC). In: *Prusa3d.com* [online]. [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/make-top-surfaces-super-smooth-ironing-prusaslicer-2-3-beta_41506/
- [19] ČSN EN 10152. *Ocelové ploché výrobky válcované za studena elektrolyticky pozinkované pro tváření za studena - Technické dodací podmínky*. 2017.
- [20] Boční dekl schránky na nářadí - Zetor 15. In: *Benozastavka.cz* [online]. [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.benozastavka.cz/ceskenaradi/eshop/25-1-ZETOR-15/0/5/10871-Bocni-dekl-schranky-na-naradi-Zetor-15>
- [21] ČSN EN 10346. *Kontinuálně žárově ponorem povlakované ocelové ploché výrobky pro tváření za studena - Technické dodací podmínky*. 2016.
- [22] PLA Filamenty. In: *Alza.cz* [online]. [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/pla-filament/18872449.htm>
- [23] NĚMEČEK, Petr a Karel KOČMAN. *Aktuální příručka pro technický úsek: Část 8- Tváření*. Praha: Verlag Dashöfer, 1998. ISBN 80-902-2472-5.
- [24] Original Prusa XL. In: *Prusa3d.com* [online]. [cit. 2022-07-14]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/original-prusa-xl-2/>

- [25] FDM 3D printing materials compared. In: *3d Matter* [online]. [cit. 2022-07-14].
Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>
- [26] Zetor 15. In: *Staretraktory.wbs.cz* [online]. [cit. 2022-07-12]. Dostupné z:
<http://www.staretraktory.wbs.cz/Zetor-15.html>