

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2023**



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

**Návrh lisovacího nástroje vyráběného 3D  
tiskem**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Josef Zuklín

**VEDOUcí PRÁCE:** Ing. Vít Novák

**STUDIJNÍ PROGRAM:** B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

**STUDIJNÍ OBOR:** 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

**Praha 2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zuklín** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **501472**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh lisovacího nástroje vyráběného 3D tiskem**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design of a pressing tool produced by 3D printing**

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, s metodami 3D tisku
- 2) Charakteristika vytípaného dílu, návrh konstrukčního řešení nástroje
- 3) Výroba nástroje, ověření jeho funkčnosti při reálném lisování
- 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) 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: **26.04.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **11.08.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

Ing. Vít Novák  
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

## Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Víta Nováka, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu práce Ing. Vít Nováka vedení bakalářské práce a poskytnutou pomoc. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při studiu a motivaci.

## Anotace

<b>Název diplomové práce:</b>	Návrh lisovacího nástroje vyráběného 3D tiskem
<b>Autor práce:</b>	Josef Zuklín
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Vít Novák
<b>Konzultant:</b>	Ing. František Tatíček, Ph.D.
<b>Akademický rok:</b>	2022/23
<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>	69 stránek, 5 tabulek, 84 obrázků
<b>Klíčová slova:</b>	tváření, 3D tisk, lisování

### Abstrakt:

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh lisovacího nástroje pro výrobu 3D tiskem a jeho následné ověření lisováním. Práce je rozdělena do dvou částí: teoretické a experimentální. V teoretické části je rozebrána tematika 3D tisku, lisování a lisovacích nástrojů. V experimentální části je provedeno oskenování dílu, pro který budou navrhovány lisovací nástroje a následně bude vytvořen 3D model. Poté je řešený samotný návrh lisovacích nástrojů podpořený počítačovými simulacemi tváření. Nástroje jsou poté tištěny a následně je provedeno samotné lisování.

## Annotation

<b>Title of the final thesis:</b>	Design of press dies for 3D printing manufacturing
<b>Author:</b>	Josef Zuklín
<b>Supervisor:</b>	Ing. Vít Novák
<b>Consultant:</b>	Ing. František Tatíček, Ph.D.
<b>Academic year:</b>	2022/23
<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>	69 pages, 5 tables, 84 pictures
<b>Keywords:</b>	forming, pressing, 3D printing
<b>Abstract:</b>	

This bachelor thesis is focused on the design of pressing dies for 3D printing manufacturing. The thesis is divided between two parts: theoretical and experimental. In the theoretical part 3D printing, pressing and pressing dies are discussed. The experimental part is focused on designing pressing dies based on a 3D part scan. Then 3D printing these dies and testing their real life performance with pressing.

# Obsah

1. ÚVOD.....	12
2. 3D tisk.....	13
2.2 Metody 3D tisku.....	13
2.2.1 SLA.....	13
2.3 FDM 3D tisk.....	15
2.4 Materiály vhodné pro 3D tisk .....	19
2.4.1 Materiály pro FDM 3D tisk .....	19
2.4.2 Materiály pro SLA 3D tisk .....	21
2.5 Srovnání materiálů pro 3D tisk .....	21
2.5.1 Materiály pro FDM 3D tisk .....	22
2.5.2 Materiály pro SLA 3D tisk .....	26
2.6 Parametry ovlivňující 3D tisk a tolerance 3D tisku .....	26
2.6.1 FDM 3D tisk .....	26
2.6.2 SLA 3D tisk .....	30
3. Tváření.....	32
3.2 Lisování plechů za studena .....	32
3.2.1 Stříhání.....	32
3.2.2 Ohýbání.....	34
3.2.3 Tažení.....	36
3.3 Lisovací nástroje a jejich konstrukce .....	38
3.4 Využití 3D tištěných tvářecích nástrojů v praxi.....	41
4. Experimentální část.....	43
4.2 Naskenování dílu a tvorba CAD modelu .....	44
4.3 Návrh lisovacích nástrojů.....	45



4.3.1	První verze sady nástrojů.....	45
4.3.2	Druhá verze sady nástrojů.....	46
4.3.3	Třetí verze sady nástrojů.....	50
4.4	Tištění nástrojů.....	53
4.5	Lisování.....	54
4.5.1	První tah.....	55
4.5.2	Druhý tah.....	57
4.6	Zhodnocení.....	60
5.	Závěr.....	61
	Bibliografie.....	62
	Seznam tabulek.....	66
	Seznam obrázků.....	67

## Seznam zkratk

3D	Trojrozměrný
UV	Ultra violet (ultrafialový)
CAD	Computer Aided Design (počítačem podporované projektování)
CNC	Computer Numerical Control (počítačově řízený stroj)
LCD	Liquid Crystal Display (displej z tekutých krystalů)
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolitografie
DLP	Digital Light Projection
MSLA	Masked Stereolithography
PLA	Polyactic Acid
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitril-styren-akrylát
PETG	Polyetyléntereftalát – glykol
PC	Polykarbonát
PE	Polyethylen
PEI	Polyetherimid
PTFE	polytetrafluoretylen (teflon)

## Seznam použité symboliky

$n$	[-]	Koeficient otupení nástroje
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	Střižná plocha
$\tau_s$	[MPa]	Pevnost ve stříhu
$m_n$	[-]	Koeficient tažení n-té operace
$d_n$	[mm]	Průměr tažení n-té operace
$d_{n-1}$	[mm]	Průměr tažení operace n-1
$R_m$	[MPa]	mez pevnosti

# 1. ÚVOD

Práce je zaměřena na návrh lisovacího nástroje pro výrobu 3D tiskem z plastu a následné ověření funkčnosti nástroje lisováním plechu. Tradiční ocelové a litinové lisovací nástroje jsou velmi drahé a náročné na výrobu, dovedou však poskytnout velmi dobrou životnost pro výrobu velkých sérií dílů. V případě potřeby výroby plechových dílů pro malosériovou a kusovou výrobu by se vysoká cena nástroje rozpočítávala do malého množství kusů. Zajímavou alternativou jsou 3D tištěné nástroje z plastu. 3D tisk se stal v současnosti velmi dostupnou a nenáročnou výrobní technologií. Mechanické vlastnosti 3D tištěného plastového nástroje jsou však výrazně horší než mechanické vlastnosti tradičních kovových nástrojů. Dá se očekávat, že životnost nástroje bude výrazně nižší a nástroj bude rychle degradovat. Zároveň nebude možné provádět 3D tištěnými lisovacími nástroji všechny operace, které jsou proveditelné běžnými kovovými nástroji. Stále však existuje široká škála dílů, pro které by mohlo být lisování plastovými 3D tištěnými nástroji výhodná výrobní technologie. Své uplatnění může najít tato technologie kromě obecné malosériové a kusové výroby také v opravárenství pro výrobu špatně dostupných náhradních dílů (například na veterány, automobily a motocykly). Proto jsem se rozhodl zpracovat nástroj pro výrobu dvířek schránky baterie na motocykl Jawa 250 „kývačka“.

## 2. 3D tisk

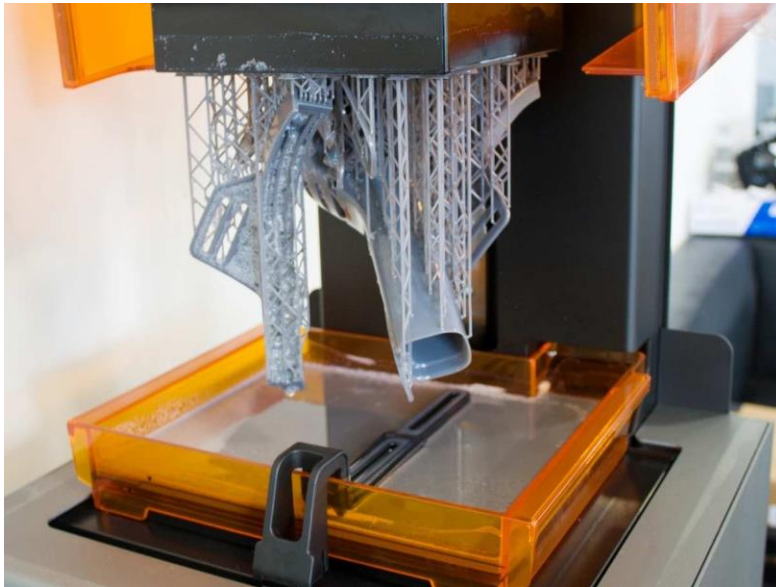
3D tisk je čím dál tím dostupnější. 3D tiskárny mohou mít dnes velmi nízkou pořizovací hodnotu a jsou uživatelsky jednoduché, což podpořilo rapidní rozšíření 3D tisku, který se tak dostal jak do průmyslových podniků, tak do rukou širší veřejnosti. 3D tisk se velmi ujal na výrobu prototypů, malých sérií a kusové výroby dílů. Velkou výhodou pro takové použití je, že pro výrobu není potřeba žádná forma, přípravek, ani speciální nástroj. Jedná se o aditivní technologii, kde se materiál nanáší vrstvu po vrstvě na sebe a postupně tak vytváří tvar finálního produktu. Jsme tímto způsobem schopni vytvořit téměř libovolný tvar. Nejčastěji se tiskne z různých druhů plastů, dá se však tisknout široké množství materiálů, jako například beton a vhodné kovové materiály. Ačkoli v současnosti existuje celá řada metod 3D tisku, v této kapitole se zaměříme na nejčastější a nejdostupnější metody FDM a SLA. [1]

### 2.2 Metody 3D tisku

#### 2.2.1 SLA

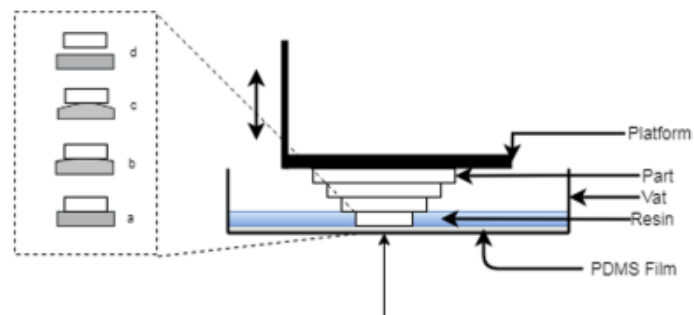
Stereolitografie (SLA) využívá UV laseru, který po vrstvách vytvrzuje pryskyřici. Tisková podložka se oddálí vždy o vzdálenost výšky jedné vrstvy. Výtisk nemá po konci tisku vhodné vlastnosti, není zcela vytvrzen, nedosahuje dostatečné pevnosti a je vhodný post procesing, kde se působením UV světla nebo tepla výtisk dále vytvrdí. Před postprocesingem je třeba mít výtisk řádně umytý od nevytvrzené pryskyřice. Používané pryskyřice bývají zdravotně závadné. Práce s nimi by měla probíhat v dobře větraných prostorách a obsluha by se měla chránit zamezením kontaktu s kůží.

SLA tisk je velice přesný a v kombinaci s možností velmi malých vrstev dosahujících běžně mezi 0,01 až 0,2mm dosahuje velmi dobré kvality povrchu. Zároveň jsme takto schopni tisknout velmi složité tvary s velkou přesností. Na rozdíl od FDM tiskáren zde není taková nutnost tisknout podpěry. Ani metoda SLA ale neumí tisknout do volného prostoru, a proto je pro určité tvary nutnost vytisknout podpěry a tím podepřít část dílů v průběhu tisku. Podpěry se také používají na oddělení dílu od tiskové podložky, což usnadňuje odstranění dílu od podložky bez poškození. Vrstvy tištěné metodou SLA bývají velmi dobře spojené a výtisky proto netrpí na delaminaci vrstev a bývají ve svém objemu izotropní. [1] [2] [3] [4]



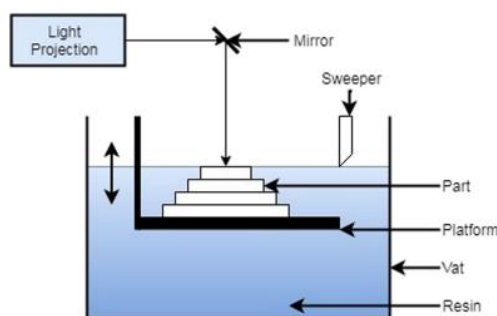
Obrázek 2 Ukázka SLA 3D tisku [40]

Laser může na výtisk svítit jak zdola, tak shora a tím vznikají dvě rozdílné konstrukce SLA tiskáren. V případě osvětlování zdola se tisková podložka zanoří ke dnu nádoby s pryskyřicí, kde laser svítící skrz skleněnou desku vytvrdí první vrstvu. Tisková podložka se poté zvedne o výšku tištěné vrstvy a laser osvítí další vrstvu. Takto proces pokračuje dál a výtisk postupně roste nahoru z nádoby pryskyřice. Problémem při této metodě je tendence vytvrzeného plastu přichycovat se ke spodní skleněné desce. Proto se používají speciální povlaky, aby se vytvrzený plast nepřichycoval. Tomu však nelze zcela zamezit a při posuvu nahoru se výtisk od desky odtrhuje a vznikají síly, které mohou výtisk zdeformovat. Výhodou je možnost tisknout v nižší hladině pryskyřice a také stékání nevytvrzené pryskyřice zpět do nádržky. Vlivem postupného vynořování výtisku z hladiny a finálního vynoření výtisku zcela nad hladinu po dokončení tisku, je dokončený výtisk výrazně sušší a dojde k usnadnění manipulace a zmenšení ztrát pryskyřice při výsledném omytí. V dnešní době je naprostá většina komerčních tiskáren konstruována tímto způsobem. [4]



Obrázek 1 SLA tisk zdola [3]

V případě osvětlování shora se tištěná vrstva vytváří na hladině a tisková podložka se pohybuje o vzdálenost výšky jedné vrstvy směrem dolů. Je zde také možnost po vytištění vrstvy a klesnutí podložky o tloušťku vrstvy hladinu srovnat přejetím desky kolmé na hladinu, aby další tištěná vrstva byla všude stejně tlustá. Tento postup, však výrazně prodlužuje dobu tisku. V případě osvětlování shora padají volně vytvrzené částice materiálu dolů na dno. V případě klasického SLA tisku je laserový paprsek odrážen zrcadly na požadované místo. Existují i příbuzné metody tisku DLP (Direct Light Deposition), kde je zdrojem UV záření projektor, který je schopen osvětlit celou vrstvu najednou. Dále existuje metoda MSLA (Masked Stereolithography), která využívá LCD na blokování zdroje UV záření, který skrz LCD prosvěcuje a vytvrzuje tím výtisk. Tyto technologie mají výrazně vyšší rychlost tisku, kvůli jejich možnosti osvětlovat celý tiskový prostor najednou. Jejich přesnost je omezena jejich rozlišením, jelikož tiskovou plochu osvěcují po pixelech. [1] [2] [3] [4]



Obrázek 3 SLA 3D tisk shora [3]

## 2.3 FDM 3D tisk

Jedná se nejrozšířenější metodu 3D tisku. Polotovarem je termoplastická struna navinutá na cívce, která je tavena v hotendu a protlačovaná tryskou (běžný průměr trysky je 0,4mm). Materiál je takto vrstvu po vrstvě nanášen na tiskovou podložku, kde plast tuhne. Pro FDM 3D tisk je velmi důležitý tisk podpor, které nám umožňují lépe tisknout přesahy a tvary, které by se sami při tisku neudržely. Nanášený materiál se někdy nestihne dostatečně rychle zchladit a ztuhnout a tím se může prověšovat. Obecně se jedná o velmi rychlou metodu tisku. Z důvodu nanášení po vrstvách roztaveného materiálu, které se při průměru trysky 0,4mm běžně pohybují od 0,1 do 0,3mm, nelze u výtisku dosáhnout přesných detailů a na výtiscích jsou vidět jednotlivé vrstvy. Špatně tisknutelné plochy, obzvláště ty, které potřebují podpěry, často mívají špatný povrch a nízkou přesnost. Jednotlivé vrstvy a jednotlivá vlákna se mezi sebou v celém objemu zcela nespojí. Dochází tedy ke zhoršení mechanických vlastností, které jsou navíc také závislé na orientaci výtisku při tištění. Jedná se tedy o levnou, rychlou a

jednoduchou metodu 3D tisku, která má ale horší kvalitu povrchu, jednotlivé vrstvy výtisku jsou velmi zřetelné a dochází ke zhoršení mechanických vlastností oproti vlastnostem materiálu filamentu. [1]



Obrázek 4 Ukázka FDM 3D tisku [5]

## Konstrukce FDM 3D tiskáren

### Tisková hlava

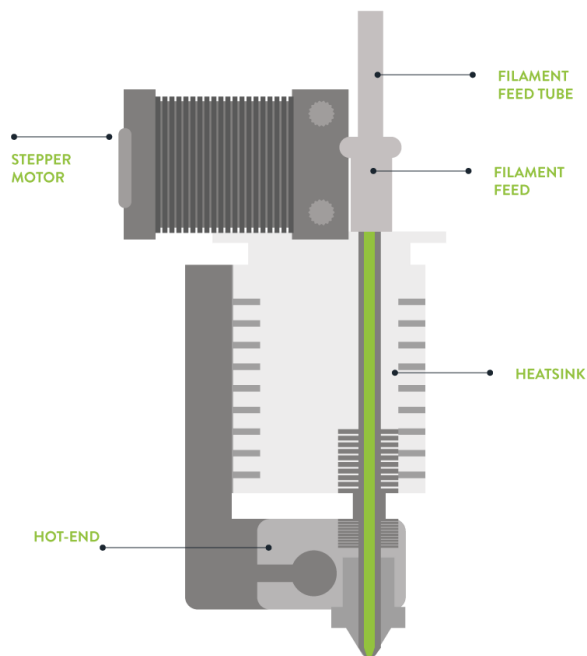


Obrázek 5 Tisková hlava [42]



- **Extruder**

Slouží k podávání plastové struny do hotendu, kde je struna roztavena. Existuje více možných konstrukcí extruderu. Častou konstrukcí bývá jeden krokový motor, na kterém je nasazena podávací kladka s drážkami kolmo na směr podávání drátu, ke které může být přes ozubení spřažena druhá drážkovaná kladka. Další možností je na kladku připevněnou k motoru z druhé strany tlačít ložiskem. Filamentová struna může být do extruderu zaváděna skrz PTFE trubičku, což nám umožňuje umístit cívku filamentu i mimo samotnou tiskárnu. Tato konstrukce se často používá v případě pohybu hlavy po dvou osách (X,Y). Další možností je strunu odvíjet přímo z cívky do extruderu. [6] [7]



Obrázek 6 Schéma tiskové hlavy [7]

- **Hotend**

Extruder tlačí strunu filamentu do hotendu, kde se struna taví a je vytlačována z trysky. Součástí hotendu je topné těleso, čidlo teploty (termistoru) a tryska. Různé plasty se tisknou při různých teplotách a teplota tisku je velmi důležitý tiskový parametr. [6] [7]

- **Heatsink (chladič)**

Mezi extruderem a hotendem bývá chladič jehož účelem je, aby se plast tavil až v hotendu a zároveň aby nedocházelo k poškození extruderu vysokou teplotou. Kolem chladiče proudí vzduch díky větráku, který je součástí tiskové hlavy. [6] [7]

### **Tisková podložka**

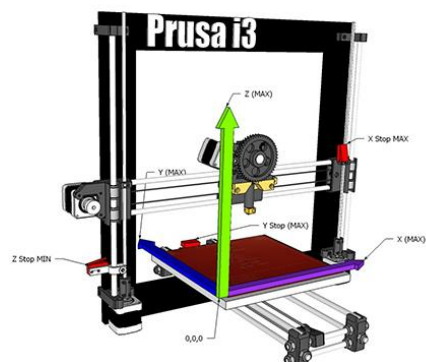
Pro kvalitu tisku je naprosto zásadní, aby první vrstva měla dostatečnou adhezi k tiskové podložce a ani později při tisku se od ní neoddělila. Zároveň je důležité, aby bylo možno vytištěný díl po skončení tisku od podložky oddělit bez poškození podložky i dílu. Z počátku se používaly hlavně skleněné podložky. Pro zvýšení adheze bylo možno použít lepidlo nebo sprej na vlasy. Další možností, jak zvýšit adhezi je vyhřívání podložky. Modernějším řešením jsou tiskové podložky s PEI povrchem, který běžně není potřeba nijak upravovat lepidlem pro zvýšení adheze. Nejběžnějším provedením je plechová magnetická podložka s PEI povrchem, se kterou původně přišla společnost Prusa Research. Po vytištění se

podložka i s vytištěným dílem z tiskárny vyjme a následně pouhým prohnutím podložky dojde k oddělení dílu od podložky. Poté se podložka zpátky magneticky připevní na tiskárnu. Pro dobrou adhezi se podložky běžně čistí izopropylalkoholem. [6] [7]

### Konstrukce rámu

- **Kartézská**

Jedná se o nejběžnější a levnou konstrukci FDM 3D tiskáren, často používanou na dostupných tiskárnách určených hlavně pro domácí použití. Mezi tiskárny s touto konstrukcí rámu patří modely z řady Prusa i3. Tato konstrukce se vyznačuje tím, že podložka se pohybuje v ose Y, zatímco tisková hlava se pohybuje v osách Z a X. To způsobuje, že při pohybu na ose Y musí motor pohybovat s celou



Obrázek 7 Kartézská FDM 3D tiskárna [6]

tiskovou podložkou a výtiskem na ní tištěným. Tato skutečnost v kombinaci s tím, že na levnějších tiskárnách je pohyb podložkou uskutečněn přes ozubený řemen, může způsobovat problémy se setrvačností celé sestavy a přesností tisku. [6]

- **Core XY**

Jedná se o variaci kartézského systému, kde rám má tvar obdélníku nebo čtverce s nosníky po všech hranách. Podložka se pohybuje v ose Z a tisková hlava se pohybuje v osách X a Y. Tento rám bývá pevnější než rám klasické kartézské konstrukce a často se používá na tiskárny s velkou tiskovou plochou. Kombinace tuhého rámu a tiskové hlavy, která se pohybuje v ose X i Y umožňuje vyšší rychlost tisku. Představitelem této konstrukce jsou například tiskárny Creality Ender 5 a Prusa XL. [6] [8]



Obrázek 8 Core XY FDM 3D tiskárna [8]

- **Delta**

Tiskárny s delta konstrukcí rámu jsou výrazně vzácnější než kartézské. Vyznačují se tiskovou hlavou zavěšenou na trojici pohyblivých ramen a pevnou tiskovou podložkou. Tisková plocha bývá u těchto tiskáren v poměru k velikosti rámu velmi malá, avšak maximální výška výtisku (osa Z) bývá velmi vysoká. Tyto tiskárny se vyznačují vysokou rychlostí tisku a přesuvů. Velmi vysoká rychlost tisku, může však být za cenu snížení úrovně detailů a kvality tisku. Řízení delta tiskáren je výrazně náročnější než u kartézských a obecně se jedná o výrazně dražší a vzácnější konstrukci FDM 3D tiskáren. [6]



Obrázek 9 Delta FDM 3D tiskárna [41]

## 2.4 Materiály vhodné pro 3D tisk

Vlastnosti jednotlivých materiálů od různých výrobců se od sebe mohou výrazně lišit. Tato kapitola slouží pouze k rámcovému srovnání materiálů mezi sebou.

### 2.4.1 Materiály pro FDM 3D tisk

Polotovarem pro FDM 3D tisk jsou struny navinuté na cívku, také nazývané filamenty. Běžný průměr této struny bývá 1,75mm. Pro dobrou kvalitu tisku je důležité, aby struna měla konzistentní průměr v celé své délce z důvodu změny objemového toku plastu při změně průměru struny za stálé rychlosti podávání drátu, což ovlivňuje přesnost výtisku. Tolerance filamentů od výrobce Prusa Research o průměru 1,75mm je udávána jako  $\pm 0,02\text{mm}$ . Existuje celá řada materiálů vhodných pro FDM 3D tisk. V této kapitole jsou popsány pouze běžně používané materiály a materiály vhodné pro použití na výrobu tvářecího nástroje.

#### **PLA (polyactic acid, kyselina polylaktónová)**

Jedná se o jeden z nejběžnějších materiálů používaný pro 3D tisk, vyznačuje se nízkou cenou, dobrými tiskovými vlastnostmi a vysokou pevností a tvrdostí. Mezi jeho nevýhody patří nízká houževnatost, nízká teplota skelného přechodu a špatná odolnost proti UV záření. [9]

#### **ABS (Akrylonitrilbutadienstyren)**

Jedná se o materiál odolávající UV záření a s vyšší teplotou skelného přechodu než PLA. Z těchto důvodů se hodí pro venkovní použití. ABS se vyznačuje špatnými tiskovými

vlastnostmi, což je způsobeno hlavně jeho velkou tepelnou roztažností. Pro dosažení dobrých výtisků je třeba použít vyhřívanou tiskovou podložku a velmi vhodné je i použití uzavřené 3D tiskárny nebo překrytí tiskárny boxem, který bude udržovat teplo v tiskovém prostoru. Vysoká tepelná roztažnost způsobuje odtrhávání výtisku od položky a deformaci jeho tvaru. ABS je rozpustné v acetonu. Této vlastnosti se dá využít a provést vyhlazení povrchu výtisku acetonovými parami. Tisk z ABS je vhodné provádět ve větraných prostorách z důvodu nepříjemného zápachu, který při tisku vzniká. [9]

### **ASA (Akrylonitril-styren-akrylát)**

ASA je materiál velmi podobný ABS, má však o něco lepší tiskové vlastnosti a je u něj menší riziko deformací výtisku. Zápach při tisku je o něco slabší než u ABS. Jedná se o UV stabilní materiál, tudíž se hodí k venkovnímu použití. Stejně jako ABS je rozpustný v acetonu a dá se vyhladit acetonovými parami. [9]

### **PETG**

Jedná se o velmi houževnatý materiál poskytující dobré tiskové vlastnosti, dobře drží na podložce a nedochází u něj k přílišným deformacím tvaru při tisku. Má vyšší teplotu skelného přechodu než PLA a horší mechanické vlastnosti než ABS. Kvůli svým dobrým tiskovým vlastnostem se často používá, a to i pro venkovní použití, jelikož dobře odolává UV záření. Při tisku malých a detailních dílů není PETG vhodný materiál kvůli své vlastnosti tahání tenkých nitek při pohybu mezi jednotlivými objekty na tiskové položce. [9]

### **Nylon (Polyamid)**

Jedná se o málo používaný a velmi drahý materiál pro filamenty. Nabízí však vysokou pevnost a tvrdost, vysokou teplotní a chemickou odolnost a současně nízkou teplotní roztažnost. V důsledku toho jsou menší deformace při tisku. Zároveň se jedná o materiál s dobrou otěruvzdorností, což je vlastnost velmi důležitá pro životnost tvářecího nástroje. [9]

### **Polykarbonát (PC)**

Jedná se o velmi pevný plast s velmi vysokou houževnatostí. Kvůli svým mechanickým vlastnostem a možnosti průhledného provedení se jedná o jeden z materiálů používaných na výrobu neprůstřelných skel, skel ochranných brýlí a na kryty automobilových světlometů. Polykarbonát je odolný proti vysokým teplotám. Bohužel se jedná o velmi špatně tisknutelný materiál s velkou tepelnou roztažností. Při tisku je tedy vhodné použít zakrytovanou tiskárnu. Polykarbonát je velmi hyroskopický a je doporučeno ho uchovávat v suchém prostředí

(například využit silica gel), případně před tiskem vysušit. Z těchto důvodů výrobci často přidávají řadu přísad, aby zlepšili tiskové vlastnosti polykarbonátu. [9]

## 2.4.2 Materiály pro SLA 3D tisk

Pro SLA 3D tisk se používají UV vytvrditelné pryskyřice. Nejčastěji se jedná o pryskyřice na bázi epoxidu, akrylátu nebo směs akrylátu a epoxidu. Způsob vytvrzování se dá rozdělit na dvě hlavní skupiny- kationtovou polymerizaci a radikálovou polymerizace. Pro spuštění obou těchto mechanismů je nutné do pryskyřice přimíchat fotoiniciátory. Ty většinou tvoří od 0,5 % do 12 % hmotnosti. Radikálové fotoiniciátory absorbují energii fotonů a vytvářejí volné radikály. Aktivní centra polymerizace vznikají reakcí volného radikálu s molekulou monomeru. Fotoiniciátor dosahuje nejlepší funkce při absorpci světla z laseru. Může docházet i k jiným chemickým reakcím způsobujícím nedokonalé vytvrzení pryskyřice. Z tohoto důvodu musí mít radikály krátkou dobu existence. Kationtové fotoiniciátory za přítomnosti UV záření a atomy vodíku vytváří silné kyseliny. Radikál je schopen přitáhnout si atom vodíku z jakékoli vhodné molekuly, z monomeru, z alkoholu nebo z vody. Katodická polymerizace funguje na principu přenesení náboje z kationtového iniciátoru na monomer. Tento monomer se poté stává reaktivní a reaguje s ostatními monomery a tím vytváří výsledný polymer. Z počátku byly pryskyřice pro SLA 3D tisk relativně pevné, ale velmi křehké. V současné době existuje celá řada pryskyřic s různými vlastnostmi a použitím. Epoxidové pryskyřice (kationtová polymerizace) bývají dražší, ale dosahují lepších mechanických vlastností a méně degradují než pryskyřice akrylátové (radikálová polymerizace). Existují pryskyřice, které po vytvrnutí připomínají gumu. Zároveň existují materiály, které svými vlastnosti napodobují klasické technické termoplasty. Ceny některých těchto pryskyřic však jsou velmi vysoké. [4] [2] [1]

## 2.5 Srovnání materiálů pro 3D tisk

V této kapitole jsou v tabulkách srovnány vlastnosti jednotlivých materiálů jak pro FDM, tak pro SLA 3D tisk. Jednotliví výrobci často měří vlastnosti svých materiálů jiným způsobem a podle jiných norem. Pro detailnější seznámí s metodikou měření je nutné nahlédnout do technických listů materiálů, popřípadě do souvisejících norem. Na konci této kapitoly budou pouze uvedeny 3D tištěné vzorky pro testování mechanických vlastností jednotlivých výrobců.

## 2.5.1 Materiály pro FDM 3D tisk

Tabulka 1 Vlastnosti filamentů pro FDM 3D tisk [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19]

Materiál	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Teplota skelného přechodu [°C]	Teplota tepelné deformace (0,45 Mpa)	Teplota tepelné deformace (1,8 Mpa)	Tvrdost [shore D]	přilnavost mezi vrstvami [Mpa]	Teplota trysky [°C]	Teplota vyhřívání podložky [°C]	Cena [Kč] (hmotnost)
Prusa Prusament PLA	1,24		55	55	81	17±3	210±10	40 - 60	699 (1kg)
Filament PM PLA	1,24						200-220	20-60	544 (1kg)
Raise 3D Premium PLA	1,17 - 1,24	50 - 60					180		991(1kg)
Raise 3D Premium ABS	1,1 - 1,15	98,1		55			260±10	110±5	991 (1kg)
Filament PM ABS	1,04			89			220-250	100-110	544 (1kg)
Prusa Prusament ASA	1,0,7		93	86	78	11±1	260±10	110±5	699 (850g)
Prusa Prusament PETG	1,27		68	68	74	18±4	280±10	80±10	699 (1kg)
Filament PM PETG	1,27			70			220-250	80-90	544 (1kg)
Prusa Prusament PC Blend	1,22		113	93	79	21±2	275±10	110±10	1399 (970g)
Fiberthree F3 PA Pure Pro	1,2	72		90	74		260-290	max 80	2149 (500g)

## Mechanické vlastnosti testované na 3D tiskových vzorcích

Tabulka 2 Mechanické vlastnosti na 3D tiskových vzorcích [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19]

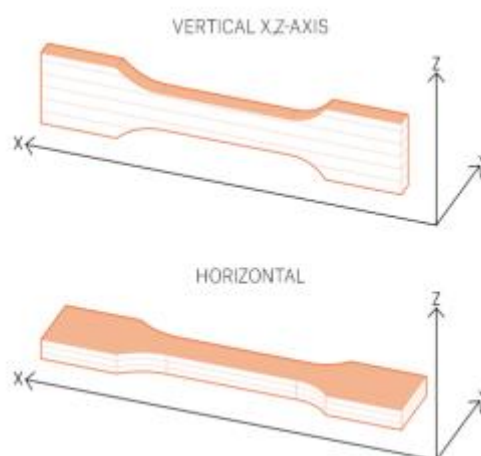
Materiál	Pevnost v tahu Horizontální X-Y-0° [Mpa]	Pevnost v tahu vertikální xz [Mpa]	Pevnost v tahu X-Y-45° [Mpa]	Pevnost v tahu X-Y-90° [Mpa]	Pevnost v ohybu Horizontální [Mpa]	Pevnost v ohybu Vertikální xz [Mpa]	Modul pružnosti v tahu horizontální [GPa]	Modul pružnosti v tahu vertikální xz [GPa]	Modul pružnosti v ohybu horizontální [Gpa]	Modul pružnosti v ohybu vertikální [Gpa]
Prusa Prusament PLA	51±3	59±2			83±6	99±1	2,3±0,1	2,4±0,1		
Filament PM PLA										
Raise 3D Premium PLA	46,6±0,9				85,1±2,9		2,6±0,3		3,2±0,1	
Raise 3D ABS	33,3±0,8				59±1,3		2,17±0,29			
Filament PM ABS										
Prusa Prusament ASA	42±1	45±2			64±1	69±1	1,6±0,1	1,7±0,1		
Prusa Prusament PETG	47±2	60±2			83±6	99±1	1,5±0,1	1,6±0,1	3,1±0,1	3,2±0,1
Filament PM PETG										
Prusa Prusament PC Blend	63±1	63±1			88±1	94±2	1,9±0,1	2±0,1	2,1±0,1	2,2±0,1
Fiberthree F3 PA Pure Pro	80		35	80			3,4			

Tabulka 3 Rázové pevnosti testované na 3D tištěných vzorcích [10] [11] [12] [13] [15] [16] [17] [18] [19] [20]

Materiál	Rázová pevnost horizontální (bez vrubu) [kJ/m <sup>2</sup> ]	Rázová pevnost vertikální (bez vrubu) [kJ/m <sup>2</sup> ]	Rázová pevnost horizontální (s vrubem) [kJ/m <sup>2</sup> ]	Rázová pevnost vertikální (s vrubem) [kJ/m <sup>2</sup> ]
Prusa Prusament PLA	13±1	14±1		
Filament PM PLA				
Raise 3D Premium PLA			2,68±0,16	
Raise 3D ABS			12,6±1,1	
Filament PM ABS				
Prusa Prusament ASA	25±3	38±11	12±1	15±3
Prusa Prusament PETG				
Filament PM PETG			6±1	3±1
Prusa Prusament PC Blend			12±1	12±1
Fiberthree F3 PA Pure Pro			2,26	

### 3D tištěné vzorky pro testování mechanických vlastností:

#### Filamenty od Prusa Research

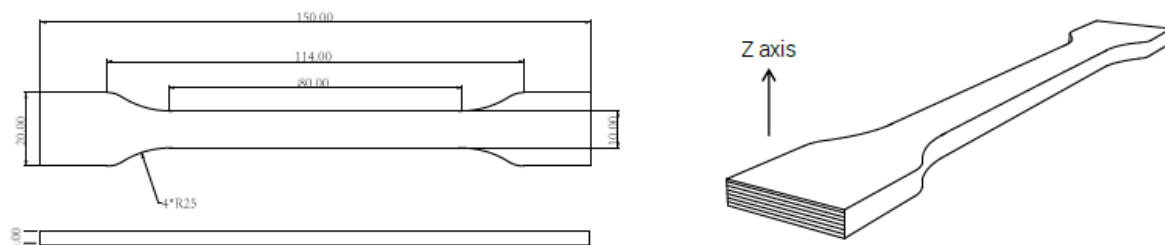


Obrázek 10 Testovací vzorky Prusa Research [16]



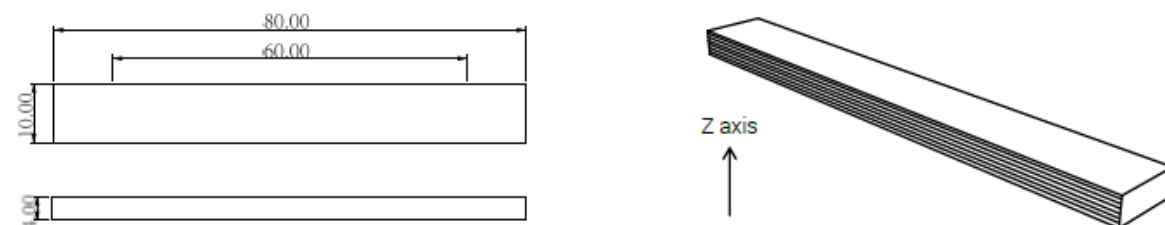
## Filamenty od Raise 3D

Vzorek pro tahovou zkoušku:



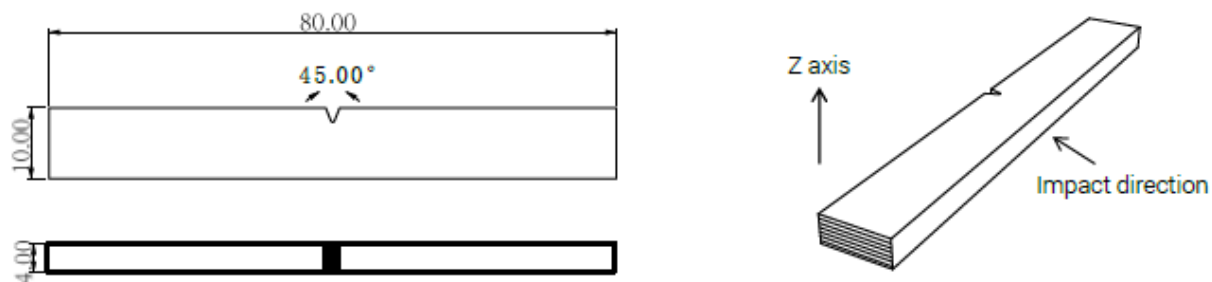
Obrázek 11 Testovací vzorek pro tahovou zkoušku Raise 3D [15]

Vzorek pro zkoušku ohybem:



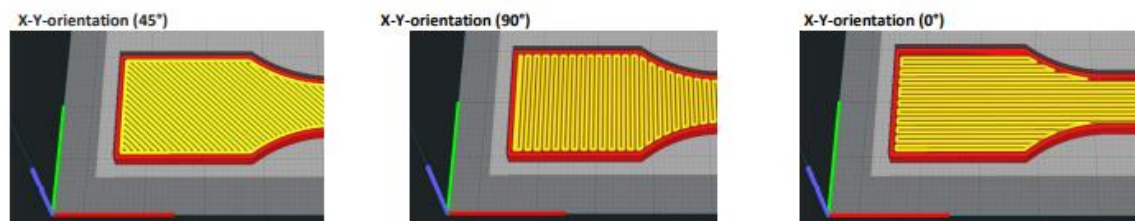
Obrázek 12 Testovací vzorek pro zkoušku ohybem Raise 3D [15]

Vzorek pro zkoušku vrubové houževnatosti Charpyho kladivem



Obrázek 13 Testovací vzorek pro zkoušku vrubové houževnatosti Raise 3D

Filamenty od Fiberthree



Obrázek 14 Vzorky pro mechanické zkoušky Fiberthree [20]

## 2.5.2 Materiály pro SLA 3D tisk

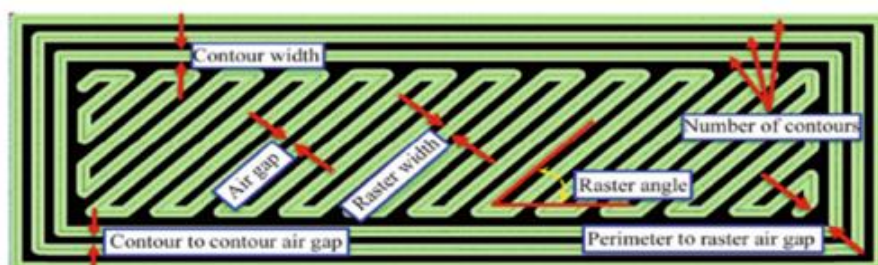
Tabulka 4 Vlastnosti SLA pryskyřic [21] [22] [20] [23]

Materiál	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Teplota tepelné deformace [°C]	Pevnost v tahu (xy) [MPa]	Pevnost v ohybu (xy) [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Modul pružnosti v ohybu [GPa]	Tvrdość [Shore D]	Rázová pevnost Charpy [MPa]	Vrubová houževnatost Charpy (s vrubem) [kJ/m <sup>2</sup> ]	Cena [Kč]
3D Jake ecoResin	1,21	63,3	50		6,4	3,1		17		739 (1kg)
Liqcreate Stone Coal Black	1,12		62	75	2,2	1,9	80		15	2 679 (1Kg)
Liqcreate Strong X	1,12		91	135	2,5	3,2	87		20	4 741,99 (1kg)
Prusa Research Prusement Tough Resin			41,6±3,7	33,5±2,3	1,6±0,1	1,1±0,1	75,7±1,2	23,7±4,9	1,97±0,26	1749 (1kg)

## 2.6 Parametry ovlivňující 3D tisk a tolerance 3D tisku

### 2.6.1 FDM 3D tisk

Počátkem každého vytištěného dílu je 3D model vytvořený v CAD softwaru, který je následně zpracován ve sliceru. Slicer je program, který podle zadaných tiskových parametrů vytvoří GCODE. GCODE je program, který obsahuje pokyny pro tiskárnu potřebné pro vytištění dílu. Mimo konstrukci samotné tiskárny také tvar dílu a tiskové parametry rozhodují o výsledné kvalitě tisku, o mechanických vlastnostech i o přesnosti rozměrů a kvalitě povrchu. Běžně dosažitelná přesnost FDM 3D tisku je kolem 0,2mm. Přesnost je závislá na nastavení tisku, použité tiskárně, materiálu, orientaci výtisku na podložce a tvaru výtisku. Dopad jednotlivých proměnných ve 3D tisku na přesnost, mechanické vlastnosti a kvalitu povrchu je blíže rozvedena níže. [24] [25]



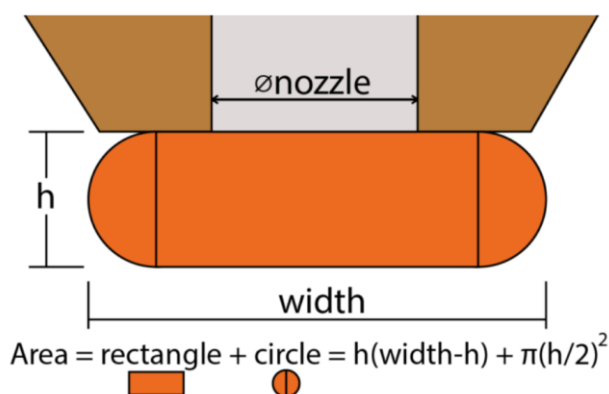
Obrázek 15 Detail vodorovné stěny při FDM 3D tisku [9]

#### Průměr trysky, výška vrstvy, tloušťka stěny

Nejběžnějším průměrem trysky FDM 3D tiskáren bývá 0,4mm. Se změnou průměru trysky se mění možné tisknutelné výšky vrstvy a tloušťky stěn. Výška vrstvy by měla být pod

80% průměru trysky. Pro průměr trysky 0,4mm je tato hodnota 0,32mm. Výška vrstvy mění pouze vertikální rozlišení tisku. Čím je nižší výška vrstvy, tím je lepší kvalita povrchu, ale delší doba tisku. Další otázkou je dopad množství vrstev na mechanické vlastnosti dílu. Čím nižší vrstva tím více spojů mezi vrstvami a tím nižší množství objemu plastu extrudováno najednou, což může vést ke snížení pevnosti. Se změnou průměru trysky se také mění použitelná šířka tisknuté stěny (jednovrstvé). Při použití širšího perimetru vůči průměru trysky dochází k lepší adhezi mezi vrstvami a tím ke zlepšení mechanických vlastností.

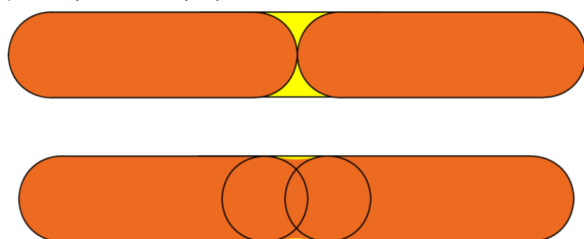
Bezpečné hodnoty šířky perimetru se běžně pohybují mezi koef. 1.05 – 1,7 x Ø trysky. [26] [25]



Obrázek 16 Šířka perimetru [26]

Při tisknutí dvou perimetrů vedle sebe výsledná tloušťka stěny nebývá dvojnásobkem tloušťky jednotlivých perimetrů. Z důvodu vyplnění prostoru, který by vznikl mezi rádiusy na stranách perimetru, bývá mezi dvěma perimetry přesah sloužící k vyplnění tohoto prostoru.

[24] [25]

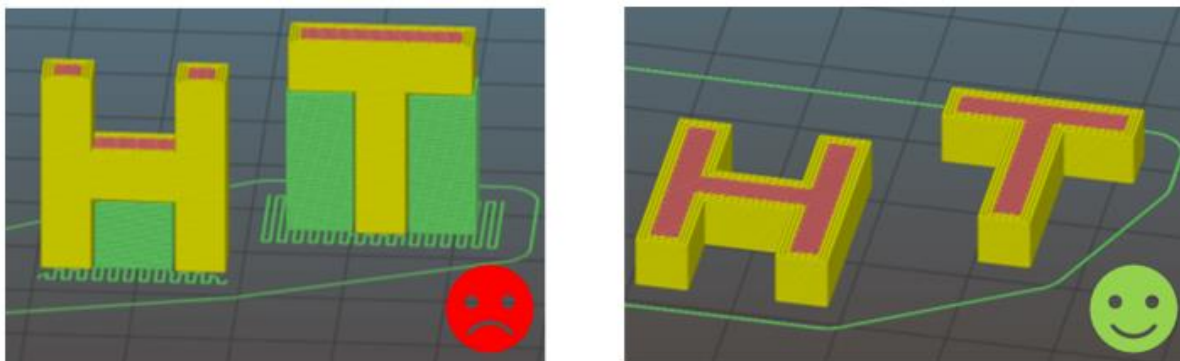


Obrázek 17 Přesah dvou perimetrů [26]

### Tvar a orientace výtisku, technologičnost konstrukce pro FDM 3D tisk

Bohužel ne každý tvar je možné metodou FDM 3D tisku vyrobit, a to ani při použití podpor. Čím obtížnější je tvar výtisku, tím vyšší je zmetkovitost a horší rozměrová a povrchová kvalita tisku. Obtížnost tisku a jeho výsledné mechanické vlastnosti závisí kromě jiného na orientaci dílu vůči podložce. Vytištěný materiál se z důvodu nanášení po vrstvách chová anizotropně a lépe snáší zatížení ve směru vrstev, nikoli kolmo na ně. Zde může docházet

k delaminaci. Správným zvolením orientace dílu můžeme tištěné plochy vhodně opřít o podložku místo tisku na podporách. Tím se zkrátí tisk, zlepší kvalita a sníží spotřeba materiálu.

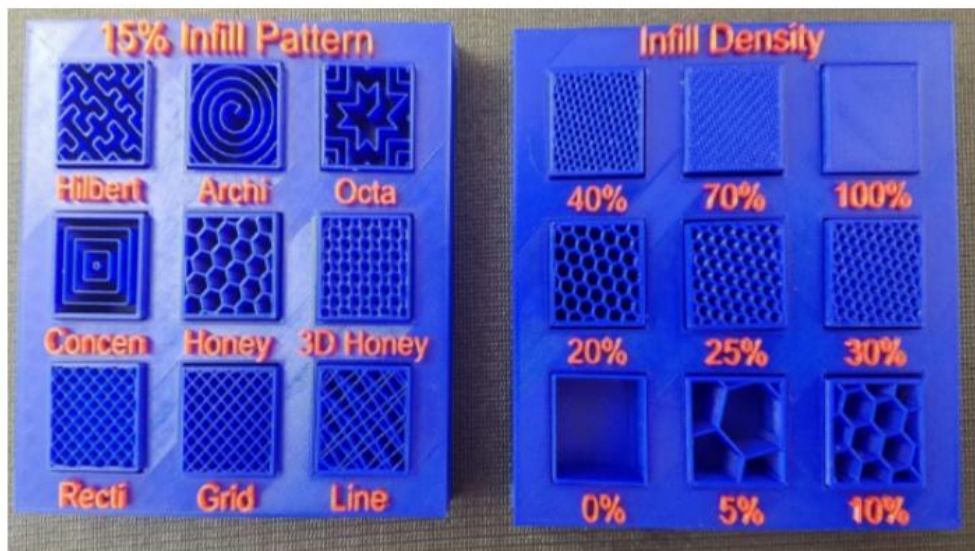


Obrázek 18 Vhodná orientace dílu pro FDM 3D tisk [27]

Skloněné plochy je možné tisknout v závislosti na tiskových parametrech bez podpor. Při tisku stěny do  $30^\circ$  od podložky lze tisknout bez podpor, při překročení  $30^\circ$  nastávají problémy s kvalitou povrchu a posléze i zborcením stěny. Tisk převisů (ploch uložených volně ve vzduchu) je bez podpor prakticky nemožný. Přemostění (plocha mezi dvěma objekty, která není nijak podepřená) lze tisknout bez podpěr. V závislosti na délce přemostění však degraduje kvalita povrchu zdola a vzniká prověšení. Tento problém se objevuje i při tisku děr kruhového průřezu, kdy na horním vrcholu díry vzniká prověšení. S rostoucím průměrem díry je tento problém výraznější. Bez podpor je doporučené tisknout díry do průměru 10mm. [24] [27]

### Výplň a vzor výplně

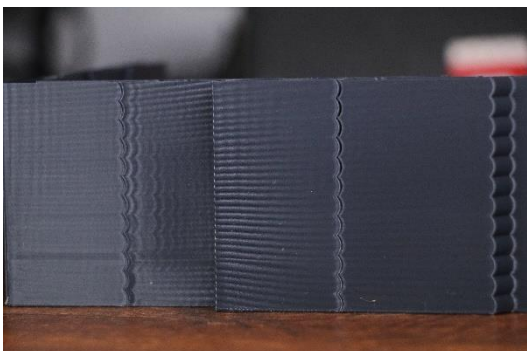
Výplň slouží k podepření vrchních vrstev výtisku a k vyztužení dílu. Některé tvary je možné vytisknout duté, avšak často je třeba horní část dílu podepřít, aby se nepropadala. Většinu dílů udrží výplň 10 % až 15 %. Z důvodu tuhosti dílu je ale vhodné mít díl plnější. Běžně se používá 20-40 %. Pro pevnost dílu je však důležitější počet perimetrů. Je možné tisknout různé vzory výplně. Výběr vzoru významně ovlivňuje rychlost tisku a mechanické vlastnosti dílu. Čím je vzor tvarově složitější, tím déle většinou trvá jeho vytištění. [24] [27]



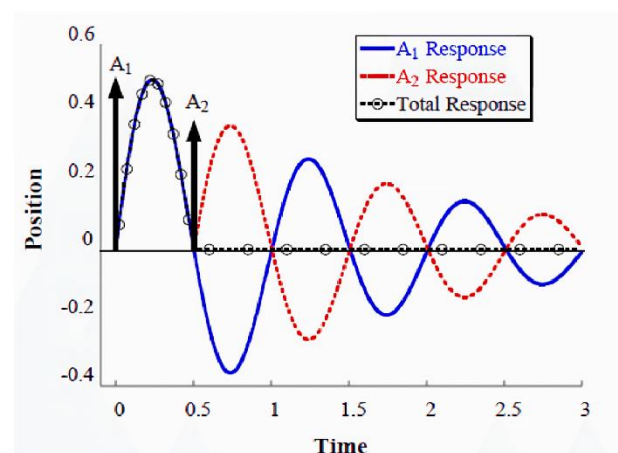
Obrázek 19 Vzory výplně a hustota výplně [27]

### Objemový tok, rychlost tisku, chlazení

Objemový tok = výška vrstvy × šířka extruze × rychlost tisku. Objemový tok určuje množství extrudovaného plastu z trysky. Maximální dosažitelný objemový tok je dán materiálem a tiskovou hlavou. Může se tedy stát, že i při zvýšení průměru trysky a výšky vrstvy nebude možné zvednout rychlost tisku, jelikož tisková hlava nezvládne větší objemový tok. Plast se nestihne dostatečně rychle tavit a protlačovat tryskou. Průměr trysky má také vliv na dosažitelný objemový tok. Plast se lépe protlačuje větším průměrem trysky. Obecně se zvyšováním rychlosti se zvyšují vibrace a v závislosti na tuhosti rámu, hmotnosti tiskové hlavy (popřípadě podložky) a řízení motorů může zvyšování rychlosti zhoršovat kvalitu tisku. 3D tiskárny a obecně CNC stroje mohou být vybaveny input shapingem, jehož účel je omezení vibrací vznikajících při tisku. Funguje na principu řízení motorů takovým způsobem, aby vibrace vzniklé předchozími pohyby byly vyrušeny vibracemi vznikajícími dalšími pohyby. [24] [28]



Obrázek 20 Vliv vibrací na výtisk [28]



Obrázek 21 Input shaping [28]

Chlazení výtisku je úzce spjaté s rychlostí tisku. Teplota plastu je důležitým faktorem pro kvalitu tisku. Při příliš vysoké teplotě dochází k deformaci výtisku. Je-li teplota příliš nízká, může docházet k problému s adhezí mezi vrstvami. Chlazení slouží k tomu, aby čerstvě vytištěný materiál stihl ztuhnout a stal se dostatečně pevnou základnou pro další vrstvu. Toho se dosahuje větrákem na tiskové hlavě, který fouká vzduch na čerstvě vytištěný materiál. Je-li potřeba, je možné také snižovat rychlost tisku. Je běžné, že různé části výtisku se tisknou rozdílnými rychlostmi. Například u tisku převisů a přemostění se obzvláště snižuje rychlost tisku, aby za působení větráku plast dostatečně tuhl a neprověšoval se. Tisk vnějších perimetrů bývá běžně pomalejší než tisk výplně. Se zvyšováním objemového toku a rychlosti tisku se zvedají nároky na chlazení. Větší objem najednou extrudovaného plastu potřebuje delší čas nebo vyšší chlazení pro správné zchladnutí. Z toho důvodu je také nutné zohledňovat velikost a tvar výtisku. Pokud je díl malých rozměrů, je nutné tomu přizpůsobit chlazení a rychlost tisku, aby při tištění další vrstvy byl plast dostatečně pevný. [24]

### **Tolerance FDM 3D tisku**

Dosažitelné tolerance dílu vytištěného na 3D tiskárně je závislá na mnoha faktorech. Mezi hlavní faktory patří přesnost motorů, konstrukce 3D tiskárny, tvar a orientace výtisku, materiál a rychlost tisku. Prusa Research udává na svých stránkách přesnost svých tiskáren na 0,1 mm v ose Z a 0,3 mm v osách X a Y. Dále udává, že při provedení kalibrací je možné snížit toleranci na 0,05mm na všech osách. [29]

## **2.6.2 SLA 3D tisk**

Stejně jako je tomu u FDM 3D tisku, celý proces tisku u SLA začíná 3D modelem a následným zpracováním ve sliceru.

### **Tloušťka vrstvy**

Běžně používané tloušťky vrstev se pohybují od 0,025mm do 0,1mm. Tloušťka vrstvy nemá výrazný dopad na rozměrovou přesnost výtisků. S rostoucí vrstvou tloušťky však roste schodovitost šikmých povrchů.

### **Rychlost tisku**

Pro kvalitní díl vytištěný metodou SLA je nutné, aby došlo ke správné polymerizaci pryskyřice. Při příliš vysoké rychlosti tisku a nedostatečné intenzitě osvětlení dochází ke snížení kvality povrchu a rozměrové přesnosti z důvodu nedokonalé polymerizace. Zajímavostí metod DLP a MSLA, které osvěcují celou tištěnou vrstvu najednou je, že čas tisku závisí pouze na výšce výtisku. U tiskárny Prusa SL1S SPEED (MSLA) je uvedena 1,3 až 2,4s na vrstvu, u

tiskárny Creality HARLOT SKY (MSLA) je uveden čas na jednu vrstvu 1-4s. V obou případech se jedná o dostupnější tiskárny s menší tiskovou plochou. [30] [31]

### **Optické vlastnosti pryskyřice**

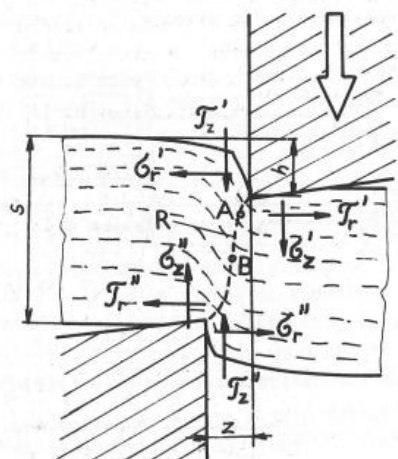
Aby byl SLA 3D tisk proveditelný, musí pryskyřice vykazovat určité optické vlastnosti. Vlastnosti, jako absorpce světla, šíření světla, odrazivost a rozptyl určují výšku vrstvy. Absorpce světla je také určovaná množstvím fotoiniciátoru v pryskyřici.

### **Dodatečné vytvrzování**

Při samotném tisku nedojde k plné polymerizaci výtisku a pro maximální dosažitelné vlastnosti je nutné výtisk dodatečně vytvrdit ve vytvrzovací stanici. Nejprve je nutné výtisk umýt od přebytečné pryskyřice. Bez umytí by přebytečná pryskyřice vlivem UV záření ve vytvrzovací komoře vytvrdla a zdeformovala by tvar výtisku. Běžně se výtisk umývá v isopropyl alkoholu, poté se musí vysušit a teprve potom může být vytvrzen. V současnosti mnoho vytvrzovacích stanic umí výtisk zároveň samo vyčistit a vysušit. Doba vytvrzování závisí na výkonu stanice a materiálu. Obecně se vytvrzovací časy pohybují v řádech minut. Reakce různých materiálů na vytvrzování se velmi liší. U některých materiálů dojde k razantní změně mechanických vlastností, u některých ke změně menší. Doporučené časy dodatečného vytvrzení bývají uvedeny v materiálových listech.

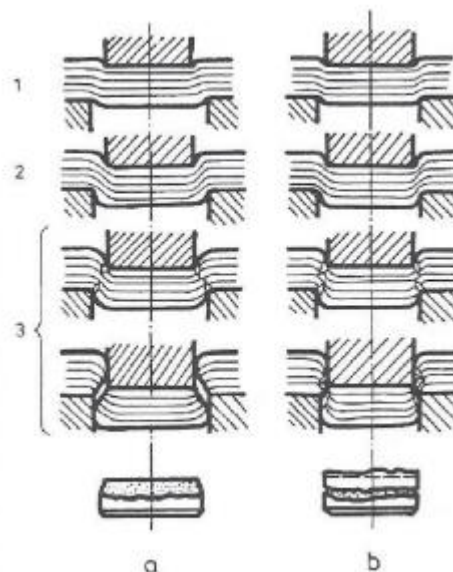
### **Tolerance a přesnost**

SLA technologie a jí příbuzné technologie (DLP, MSLA) dovedou dosahovat velmi vysokých rozlišení. Například tiskárna Prusa SL1S SPEED (MSLA) disponuje 5,96" LCD s rozlišením 2560×1620p. SLA tiskárny se pohybují od levnějších, určených pro méně náročné a hobby použití k velmi drahým tiskárnám pro průmyslové použití s výrazně lepšími vlastnostmi a funkcemi. Vysoké rozlišení SLA tiskáren jim umožňuje tisknout velmi malé detaily a dosahovat kvalit povrchu, které u FDM tisku nejsou možné. Samotná přesnost tiskárny však není jediný určující faktor pro přesnost výtisku. Při vytvrzování se pryskyřice smršťují a velikost smrštění se mezi jednotlivými pryskyřicemi liší. Obecně platí, že akrylátové pryskyřice mívají větší roztažnost než pryskyřice epoxidové. Na průmyslových SLA tiskárnách lze dosáhnout tolerance  $\pm 0,01$  mm. Běžné hobby tiskárny však takto vysoké tolerance nemají. Obecně lze říci, že SLA 3D tisk má menší tolerance a vyšší detaily než FDM 3D tisk. [31]



obr. 2.21

Obrázek 23 Schéma stříhu [39]



Obrázek 22 Vliv střížné vůle na povrch stříhané stěny a) správná střížná vůle, b) příliš velká střížná vůle [33]

### 3. Tváření

Základem tváření je plastická deformace (trvalá změna tvaru a rozměrů) vyvolaná působením vnějších sil tvářecího nástroje na tvařenec, při kterých dochází ke strukturálním změnám. Při tváření na rozdíl od obrábění nedochází ke ztrátě materiálu. Tvářet je možné za studena (pod teplotou rekrytalizace) nebo za tepla (nad teplotou rekrytalizace). Z důvodu nízké teplotní odolnosti plastů není možné použít 3D tištěný plastový nástroj pro tváření běžně používaných kovových materiálů za tepla. Dalším dělením je plošné a objemové tváření. [32] [33]

#### 3.2 Lisování plechů za studena

##### 3.2.1 Stříhání

Při stříhání plechu lisovacími nástroji (lisovadly) začíná lisování dosednutím střížníku na stříhaný plech. Se zvyšujícím se napětím v materiálu na ploše mezi střížníkem a střížnicí nejdříve dochází k elastické a poté i plastické deformaci. Překročením meze pevnosti ve stříhu vznikají u hran střížníku a střížnice trhliny. Běžně se mez pevnosti ve stříhu počítá jako  $0,8 \cdot R_m$ . Prodlužováním trhlinek dojde ke spojení trhlinek a následnému oddělení výstřížku od základního materiálu. Pro nejmenší střížnou sílu a nejlepší kvalitu povrchu je nutné dodržet vhodné střížné vůle, aby se vznikající trhliny spojily. [32] [33] [34]

**Výpočet střížné síly:**



$$F = n \cdot S \cdot \tau_s$$

$n$  ... koeficient zahrnující otupení nástroje a střížnou vůli ( $n = 1,25$  až  $1,5$ )

$S$  ... stříhaná plocha ( $S = \text{obvod výstřižku, stříhaná délka} \cdot \text{tloušťka materiálu}$ )

$\tau_s$  ... pevnost ve stříhu ( $\tau_s = 0,8 \cdot R_m$ )

[32]

#### Stříhací operace:

- **Prosté stříhání**
- **Děrování** – oddělování materiálu po uzavřeném obrysu. Vystřižená část je odpadem.
- **Vystřihování** – oddělování materiálu po uzavřeném obrysu. Vystřižená část je výstřižkem
- **Ostřihování** – oddělování přebytečného materiálu
- **Přistřihování** – dosažení přesných tvarů, hladkých ploch
- **Nastřihování** – částečné nastřížení materiálu na okraji
- **Prostřihování** – částečné nastříhnutí materiálu v libovolné tvaru uvnitř dílu

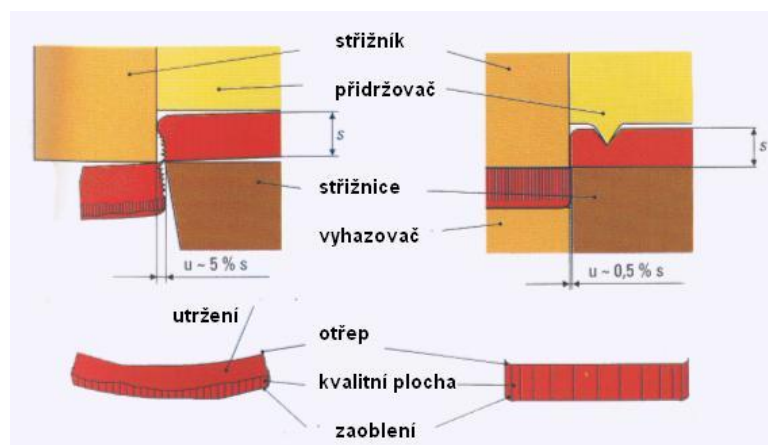
[33]

#### Stříhání s přidržovačem

Aby se zamezilo ohýbání výstřižku, používá se přidržovač, který přitlačí stříhaný plech ke střížnici. [33] [34]

#### Stříhání s nátláčnou hranou

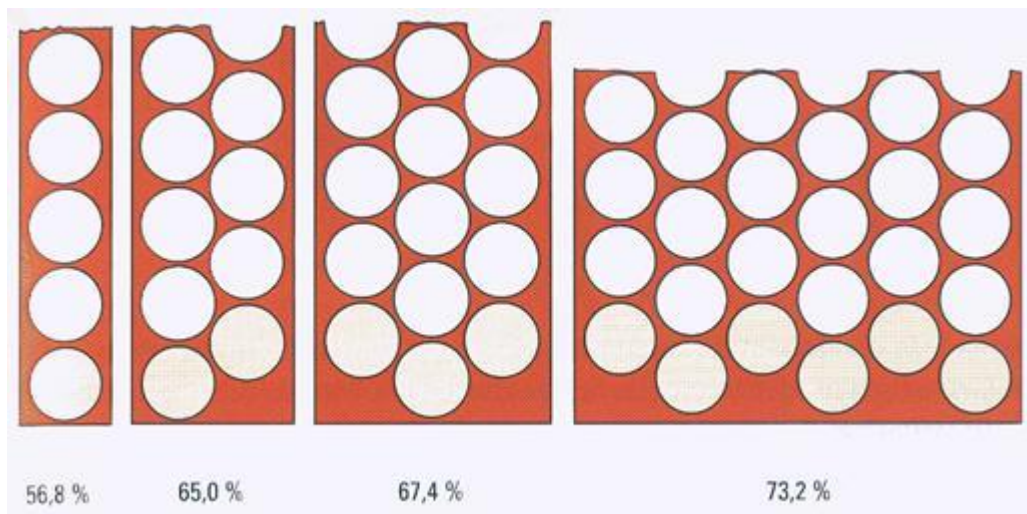
Na přidržovači je nátláčná hrana, která se prolisuje do plechu. Nátláčná hrana vyvozuje tlakovou napjatost, která způsobuje, že dojde k oddělení smykem v celé tloušťce. [33] [34]



Obrázek 24 Stříhání s přidržovačem a stříhání s nátláčnou hranou [34]

### Nástřihový plán, můstky

Při děrování a vystřihování musí být mezi stříhanými obvody dostatečná mezera, aby se výstřižek na okrajích nedeformoval a došlo ke kvalitnímu vystřihu. [35] [33] [34]



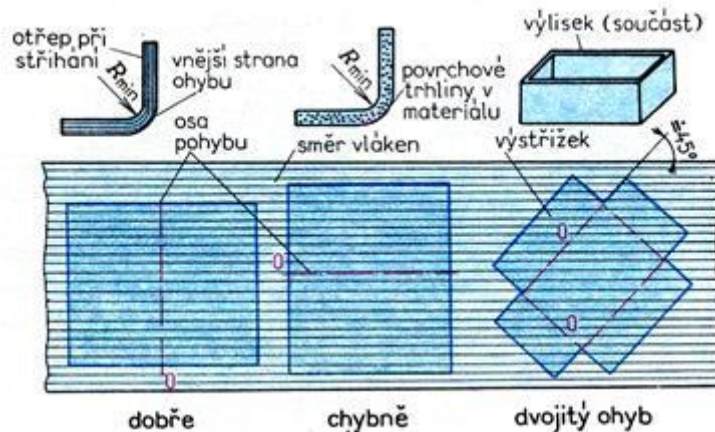
Obrázek 25 Střížné plány a využití materiálu [34]

### 3.2.2 Ohýbání

Při ohýbání dosahujeme požadované změny tvaru, s minimální změnou průřezu. Vrstvy kovu se na vnitřní straně stlačují a na vnější prodlužují. V ohýbaném dílu se nachází neutrální vrstva, která není ani stlačována ani natahována. Existuje minimální poloměr zaoblení ohybu, tak aby nedošlo k porušení materiálu, který je závislý na druhu materiálu, směru vláken a stupni deformace. Malé průměry ohybu způsobují velké namáhání materiálu a větší deformaci průřezu v místě ohybu, zároveň však způsobují menší odpružení dílu. Plastickou deformací dochází ke zpevnování materiálu a ke zvýšení meze kluzu.

Minimální poloměr ohybu je dán podmínkou, že v krajních vláknech ohýbaného dílu nesmí dojít k překročení tažnosti materiálu, která je dána tahovou zkouškou materiálu.

Maximální poloměr ohybu je dán podmínkou, že v krajních vláknech ohýbaného dílu musí dojít k trvalé deformaci. [35]

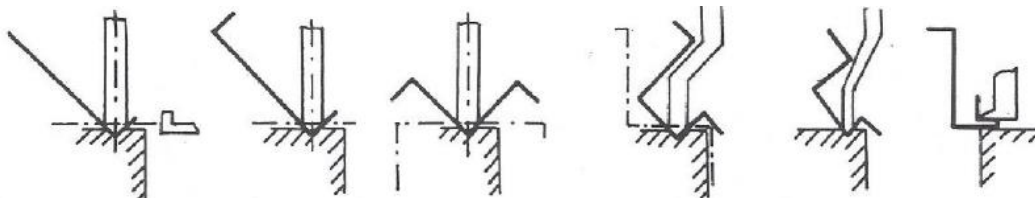


Obrázek 26 Orientace plechu pro ohýbání

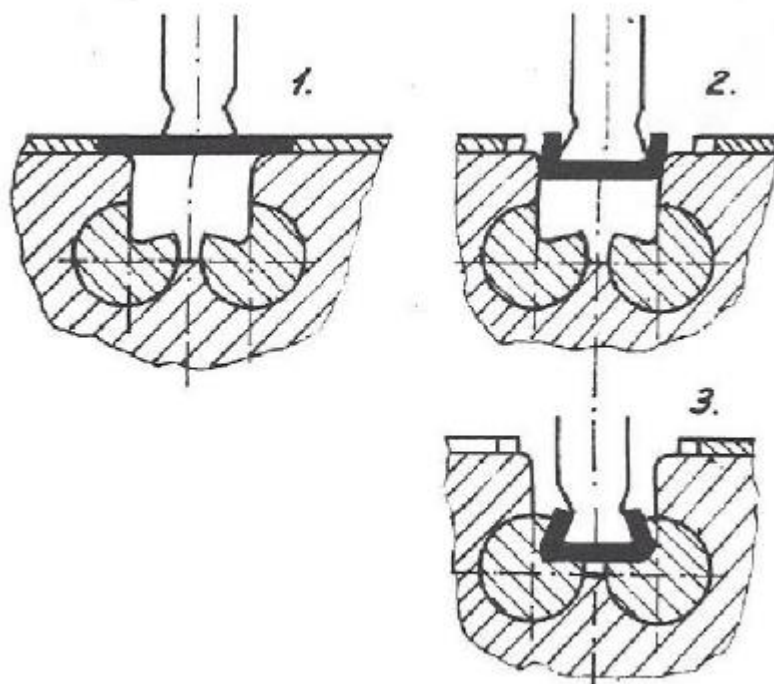
### Ohýbací operace

- **Prosté ohýbání** – tváření rovinné plochy na plochy různé, vůči sobě orientované
- **Ohraňování** – ohýbání plechu (na ohraňovacích lisech)
- **lemování** – ohýbání kraje plechu, zejména za účelem odstranění ostrých hran
- **Obrubování** – vyztužování okraje plochy promáčknutím
- **Osazování** – ohnutí, promáčknutí v okraji, nebo uvnitř rovinné plochy

[33]



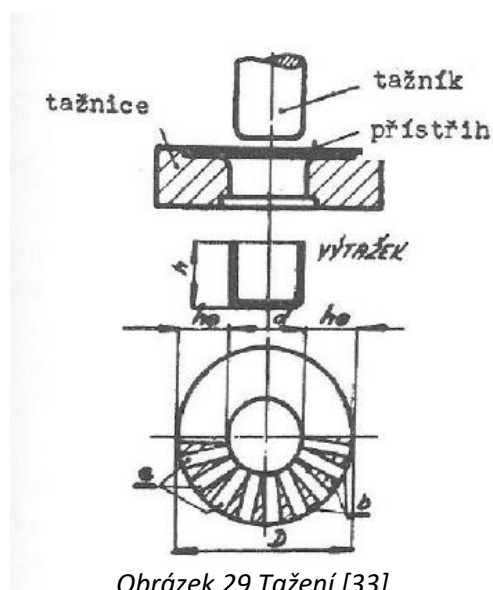
Obrázek 27 Ohraňování [33]



Obrázek 28 Ohýbání s pohyblivými částmi nástroje [33]

### 3.2.3 Tažení

Tažení je přetvoření roviny v dutou prostorovou plochu. Nedochozí přitom k významné změně tloušťky materiálu, tudíž se jedná o plošné tváření. Při tažení může docházet ke značným deformacím. Materiál šrafovaných trojúhelníků je třeba přemístit (Obrázek 29). Tento přemístěný objem materiálu zvyšuje výšku vzniklého výtažku. Je-li stupeň deformace veliký, může dojít ke zvlnění plechu. [35] [33]

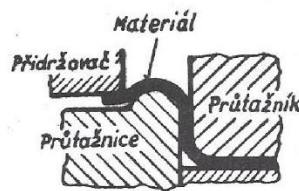


Obrázek 29 Tažení [33]

Zvlnění plechu se obvykle předchází použitím přidržovače, který vyvolává osový tlak v přírubě. Ne všechny výtažky je možné vyrobít jednou operací. Pro určení maximální deformace na jeden tah a počtu tahů se používá součinitel tažení

$$m_n = d_n/d_{n-1}$$

Velikost součinitele tažení je jiná pro první tah a jiná pro následující tahy. Obecně je určena druhem materiálu, deformačním zpevněním z předchozích tahů, tvarem výtažku, tloušťkou materiálu, rychlostí tahu, použitím přidržovače a mazáním při tažení. Kromě výtažků válcového tvaru, je možné také například táhnout drážky, různé nádoby nebo táhnout tvarově velmi složité díly, jako například blatníky automobilů nebo celé bočnice. Dvířka bateriové schránky na motocyklu Jawa, které jsou předmětem této bakalářské práce jsou také výtažkem. Kromě použití přidržovače je možné použít brzdící drážku, která podobně jako přidržovač působí axiální tah na plech. Brzdící drážku je možné použít jak v kombinaci s přidržovačem, tak bez něj. [35] [33]



Obrázek 30 Nástroj s brzdící drážkou [33]

### Operace Tažení

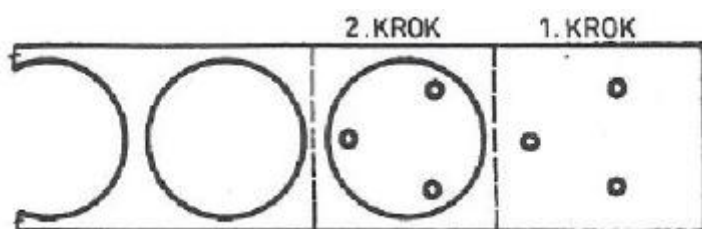
- **Prosté tažení** – tváření plechu na duté těleso bez výrazné změny tloušťky materiálu
- **Tažení se ztenčením stěny** – při tažení dochází k podstatné změně tloušťky materiálu
- **Zpětné tažení** – další tažná operace prováděná ve směru proti původní tažné operaci
- **Žlábkování** – vytlačování mělkých drážek
- **Rozšiřování**
- **Zužování**

[33]

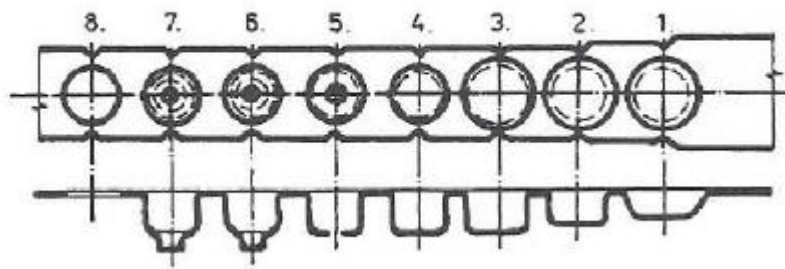
### 3.3 Lisovací nástroje a jejich konstrukce

Lisovací nástroje mohou být určeny pouze pro jednu operaci na jednom konkrétním díle, nebo se můžeme setkat s nástroji univerzálními a skupinovými. Univerzální nástroj je možné použít pro širokou škálu výrobků, je možné ho seřídit a připravit na výrobu jiného dílu. Existují například normalizované střižné a upínací hlavice a nástroje s vyměnitelnými funkčními částmi (například střižník, střižnice). Skupinové nástroje řeší lisovací operaci pro vybranou skupinu vylisků natolik podobnou, aby se dal použít stejný nástroj.

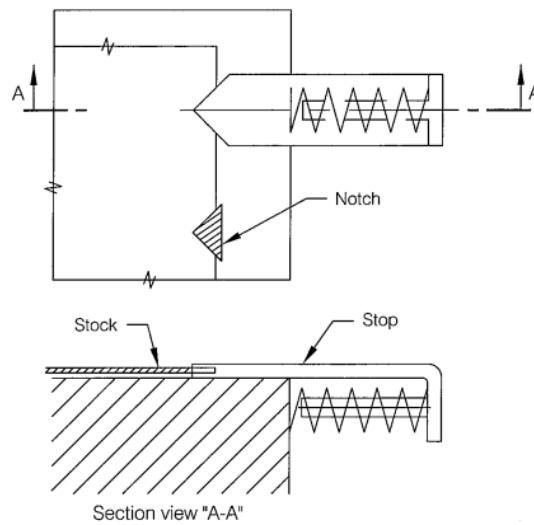
Dále lze nástroje dělit na jednořadé a víceřadé. V případě, kdy díl vyžaduje více lisovacích operací, je možné použít postupový nástroj, kde je více operací seřazeno za sebou a plech se mezi nimi posouvá o danou vzdálenost (krok). Pakliže je třeba využít více lisovacích technologií, je možné je v postupovém nástroji kombinovat a použít sdružený nástroj. [35] [33]



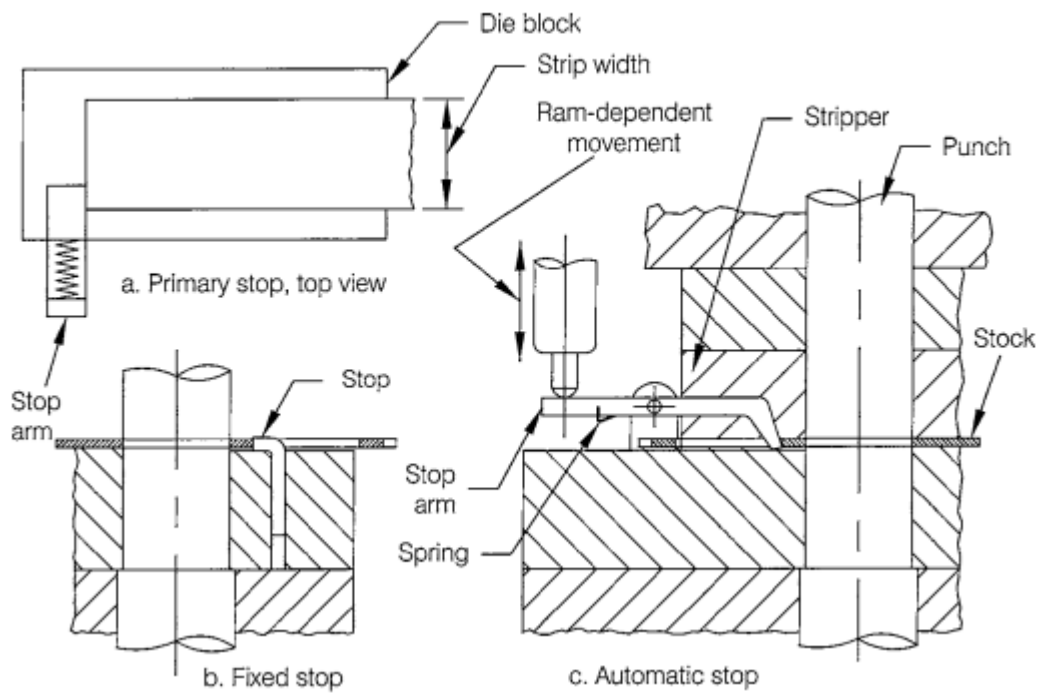
Obrázek 31 Postupové stříhání [33]



Obrázek 34 kombinované postupové tažení a stříhání [33]



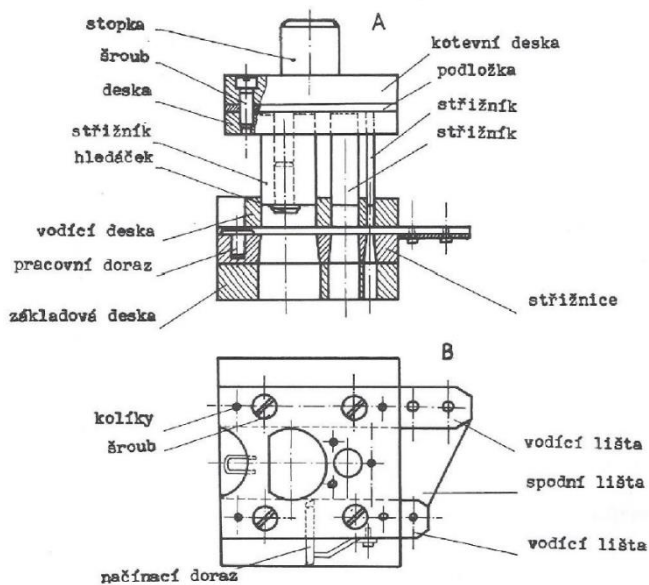
Obrázek 33 Postupový nůž [35]



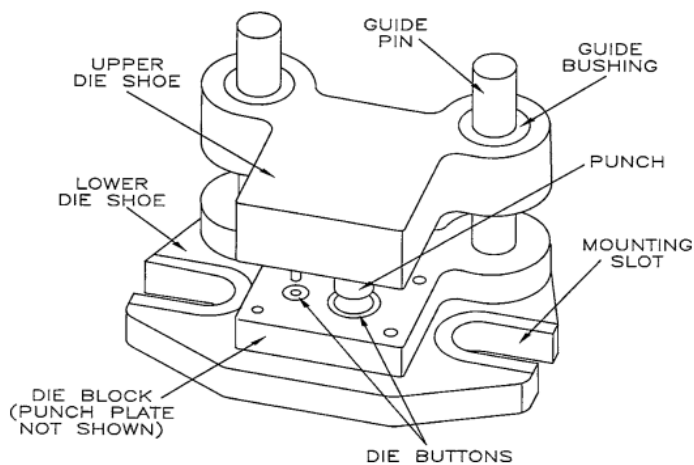
Obrázek 32 Dorazy a)pevný doraz, b) automatický doraz [35]

Posuv plechu v postupovém nástroji může být uskutečněn například válečkovým podavačem. Pro další zajištění délky kroku je možno použít dorazy, zarážky a postupové nože. Pro upřesnění pozice plechu je možné použít hledáček nebo středící kolík, které plech vycentrují podle díry vystřižené v předchozí operaci.

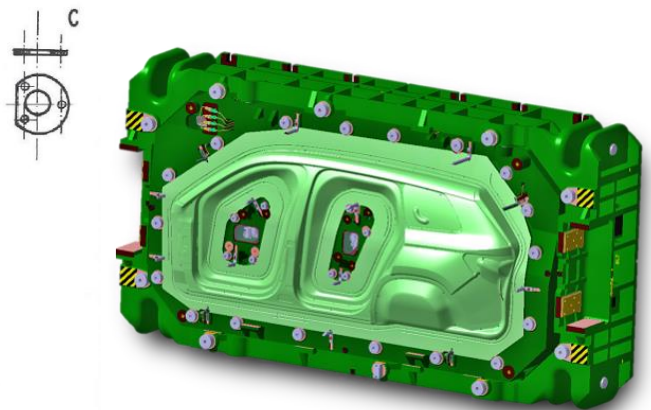
Pro dosažení přesné pozice lisovacích nástrojů se často používají vodící tyče a vodící desky, které vůči sobě vymezují pozici pevné a pohyblivé části nástroje. Je možno také spoléhat čistě na přesnost lisu bez vzájemného spojení nástrojů a nástroje mít pouze připevněné k lisu, například upínkami. Tím zároveň zjednodušíme přístup do samotného lisu a usnadníme vkládání a vyjímání plechu z nástroje. [35]



Obrázek 37 Postupový nástroj s vodící deskou [33]



Obrázek 35 Nástroj s vodícími tyčemi [35]

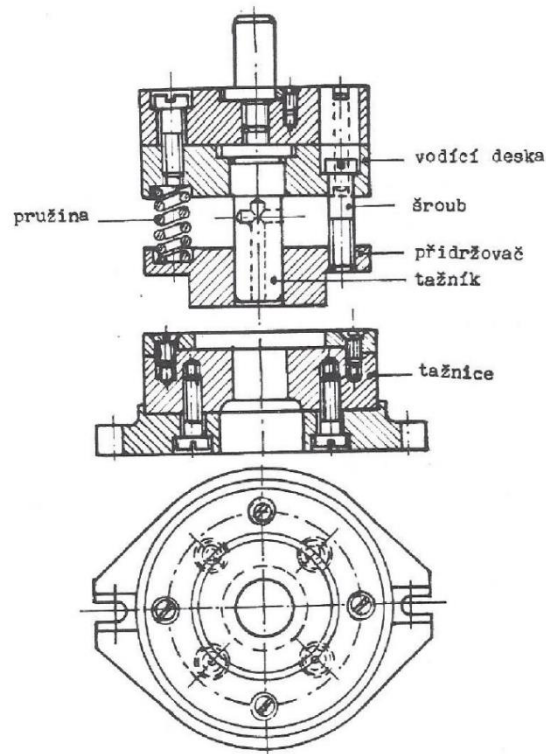


Obrázek 36 Raznice na bočnici Škoda Auto [44]



### Konstrukce nástrojů s přidržovačem a vyhazovači

Síla působící přidržovačem na plech je vyvolaná pružinou. Na obrázku 38 je znázorněna klasická ocelová vinutá pružina. Dnes se spíše používají plynové pružiny, které se dají natlakovat dle potřeby, aby působily požadovanou silou. Další pohyblivé části nástroje mohou být také vyhazovače, sloužící k vyjmutí plechu z nástroje. [35] [33]



Obrázek 38 Nástroj s přidržovačem [33]

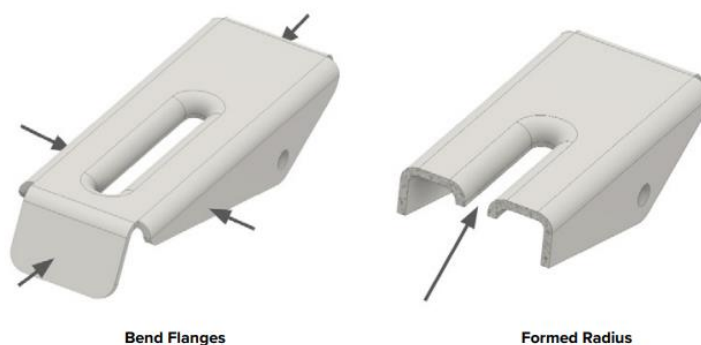
### 3.4 Využití 3D tištěných tvářecích nástrojů v praxi

Cena za ocelové a litinové nástroje je velmi vysoká a méně nákladná alternativa by zcela jistě zaujala mnoho podniků. 3D tištěné díly z plastu jsou velmi levné a pro jejich výrobu nejsou potřeba drahá zařízení. Současně jsou nenáročné na kvalifikaci obsluhy. Je však otázkou, jak praktické jejich použití ve tváření je. Plastový nástroj nikdy nebude dosahovat životnosti a mechanických vlastností tepelně zpracovaného ocelového nebo litinového nástroje. Při použití plastových tvářecích nástrojů vyrobených 3D tiskem jsme velmi omezeni možnými tvářecími silami a tvarem vyráběného dílu. Plastové nástroje jsou o poznání měkčí a snesou menší tlaky. Ostré hrany, tenké výstupky a jiné tvary způsobují vysoký tlak na nástroj a velmi zrychlí degradaci nástroje nebo dojde k významnému poškození až destrukci nástroje. Plastový nástroj se také bude více elasticky deformovat, což může snížit přesnost výroby, popřípadě jí zcela znemožnit. Nízká otěruvzdornost plastů také zrychlí degradaci nástroje.

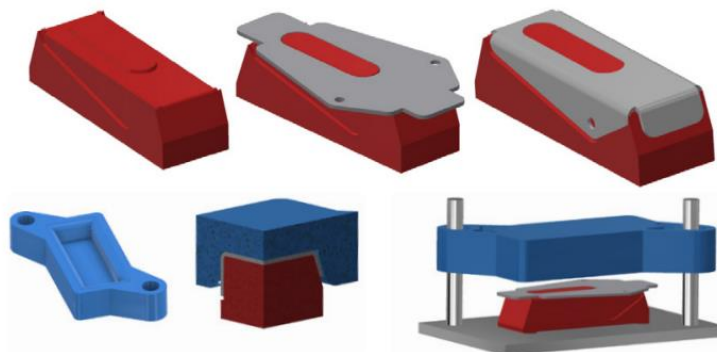
Nejvhodnější použití 3D tištěných tvářecích nástrojů je tedy při výrobě prototypů nástrojů nebo malosériové nástroje.

Konkrétním případem může být tento výlisek (obr.39-41) viz níže, který uvádí ve svém článku Formlabs. Přístřih byl realizován na plazmové řezačce. Lisovací nástroje byly tištěné na SLA 3D tiskárně z Formlabs rigid resin s pevností v tahu 75 MPa. Polotovarem je plech o tloušťce 1mm (18 -22 gauge).

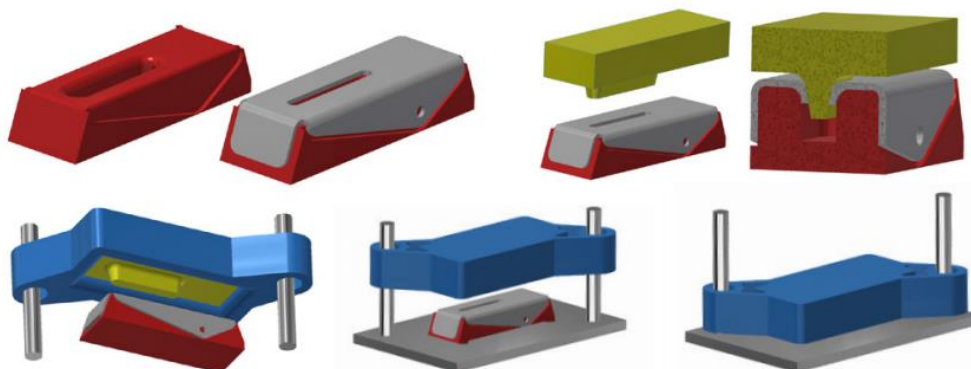
Výlisek je vyráběn ve dvou operacích. V první dojde k ohnutí vnějších ploch, v druhé dojde k vytvoření vnitřního radiusu. [36]



Obrázek 41 Ohýbaný díl Formlabs [36]



Obrázek 40 První operace Formlabs [36]



Obrázek 39 Druhá operace Formlabs [36]



Obrázek 42 Přehled nástrojů a tvařenců Formlabs [36]

## 4. Experimentální část

Experimentální část této bakalářské práce je zaměřena na návrh a následné lisování 3D tištěným plastovým lisovacím nástrojem. Rozhodl jsem se zpracovat nástroj pro výrobu dvířek bateriové schránky motocyklu Jawa 250 „Kývačka“ .



Obrázek 43 Dvířka bateriové schránky Jawa

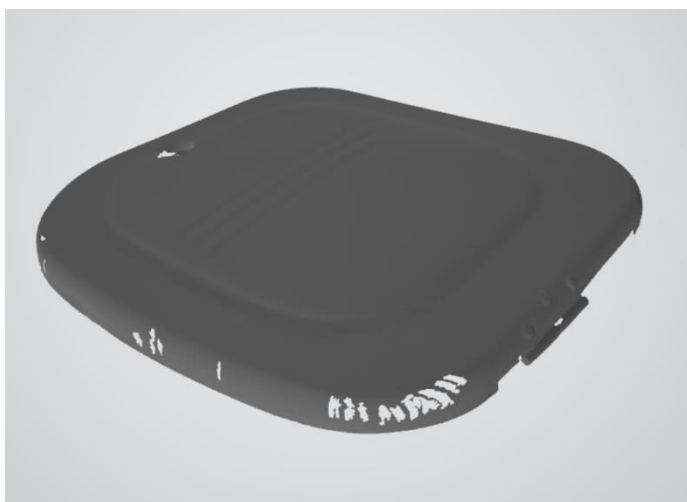


Obrázek 44 Jawa 250 „Kývačka“ [43]

## 4.2 Naskenování dílu a tvorba CAD modelu

Aby bylo možno navrhnout technologický postup lisování a samotné lisovací nástroje, je nejdříve nutné znát rozměry a vytvořit CAD model dvířek. Z toho důvodu byly dvířka oskenovány 3D skenerem Shining EinScan-SE. Model byl skenován v režimu fixního skenování. Mezi každým snímkem byly dvířka ručně pototočeny, aby došlo k oskenování celého dílu. Jednorázová přesnost skeneru je udávána, jako  $\leq 0,1\text{mm}$ . Kvůli lesklosti povrchu nebylo možné naskenovat všechny části dílu. Byl tedy použit sprej na zmatňování, avšak i tak nebylo možné dostat celistvý model a bylo nutné díry vyplnit softwarově. [37]

Bohužel se jedná o díl, který byl léta v provozu, je viditelně otlučený, místy ohnutý a zkorodovaný. Z tohoto důvodu model vzniklý skenováním obsahoval vady. Podle oskenované předlohy jsme tedy vytvořili nový model bez těchto nedostatků. Skenování bylo provedeno v učebně virtuální reality Fakulty strojní ČVUT na Karlově náměstí v Praze.



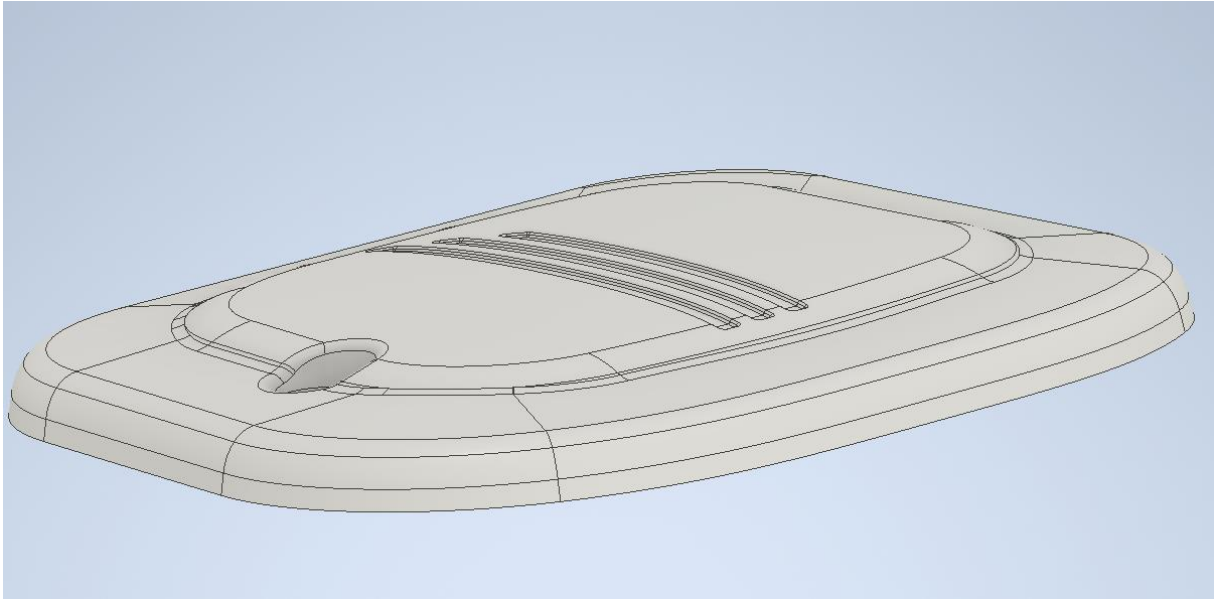
Obrázek 46 Sken dvířek



Obrázek 45 3D skener Shining EinScan-SE [37]



Obrázek 47 Sken s vyplněnými dírami



Obrázek 48 3D CAD model dvířek

### 4.3 Návrh lisovacích nástrojů

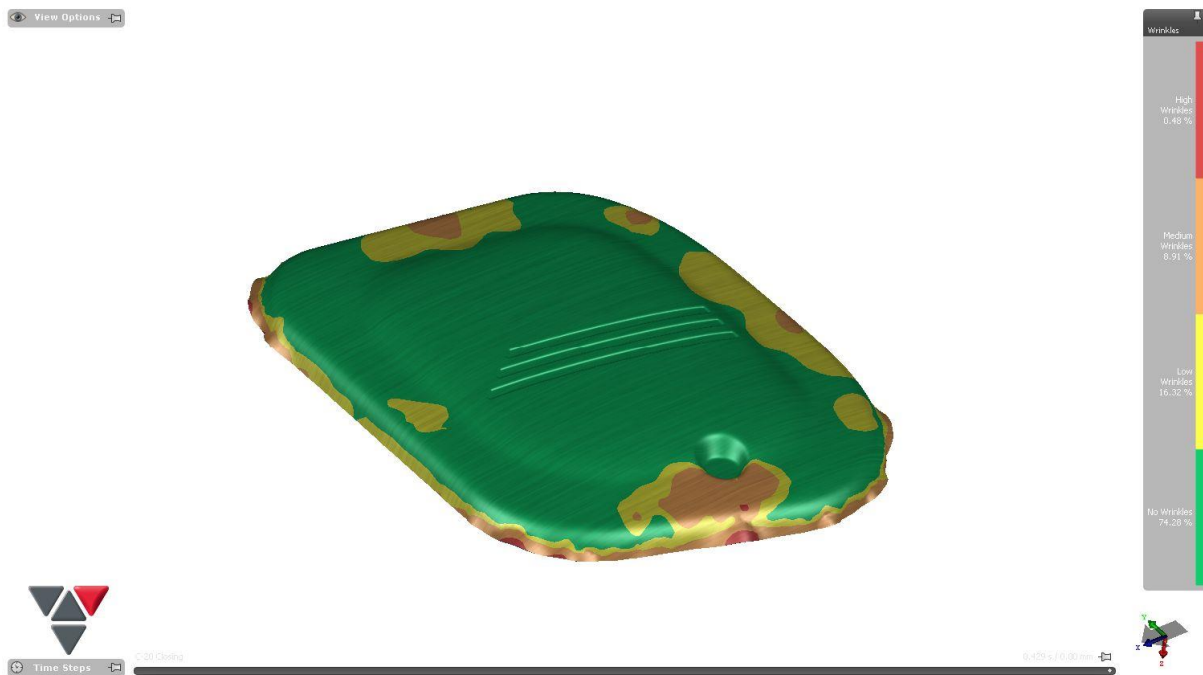
Rozhodli jsme se nástroje tisknout metodou FDM z materiálu PLA. Hlavním důvodem byl přístup k velké FDM 3D tiskárně a nízká cena materiálu. Vzhledem k velikosti dílu je cena materiálu nástroje velmi podstatná, obzvláště v případě lisování na více tahů. PLA poskytuje velmi dobrou pevnost v tlaku a tvrdost za velmi nízkou cenu. Zároveň se jedná o velmi dobře tisknutelný materiál. Špatné vlastnosti PLA ( křehkost, nízká teplotní odolnost a nízká odolnost proti UV záření) nejsou při výrobě našeho lisovacího nástroje podstatné. Pro zjištění tlaku působícího na nástroj a odpružení materiálu byly použity simulace. Nástroje byli navrženy pro 0,7mm tlustý plech z materiálu DC01.

Tabulka 5 Vlastnosti materiálu DC01 (výtažek z normy ČSN EN 10152) [38]

DC01	
Smluvní mez kluzu	Max 280 Mpa
Pevnost v tahu	270 - 410 MPA
Tažnost	min 28%

#### 4.3.1 První verze sady nástrojů

Jako první byl simulován nástroj, který dvířka lisoval v jednom tahu z přístřihu, kterým byl rozvinutý tvar kastlíku bez žádného přídavku. Výsledný výlisek byl však velmi zvlněný po obvodu a zároveň vznikaly velké kontaktní tlaky. Simulace byla provedena v programu Autoform.

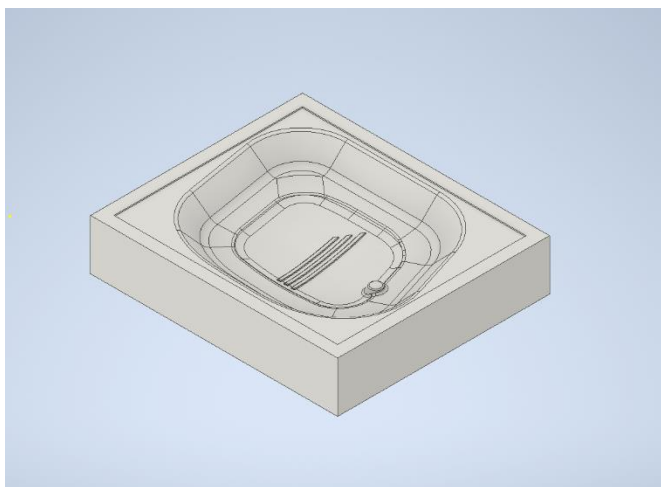


Obrázek 49 Simulace verze 1 nástrojů

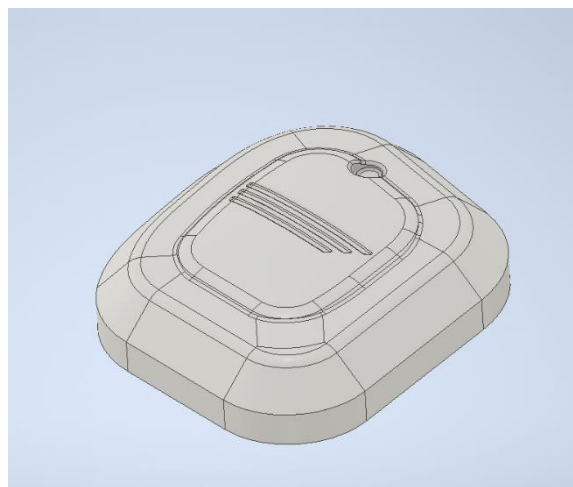
### 4.3.2 Druhá verze sady nástrojů

Možností, jak vyřešit zvlnění výlisku je několik. Nabízí se například lisování s přidržovačem nebo použití brzdící drážky. Použití brzdící drážky na plastovém 3D tištěném nástroji je však značně problematické. Jedná se o velmi zatěžovanou část nástroje a takto v plastovém provedení by se pravděpodobně velmi rychle poškodila. Použití přidržovače je vhodnější alternativou, bohužel obě tyto metody mohou výrazně zvýšit lisovací sílu a tím kontaktní tlak. Vzhledem k malé pevnosti 3D tištěných plastových výtisků je nutné minimalizovat kontaktní tlaky. Další možností je lisovat díl z většího přístřihu a prodloužit tím boční stěnu dvířek. Ke zvlnění v ideálním případě dojde až v přebytečném přidaném materiálu, který se po lisování odstřihne. Dále jsme se z důvodu snížení lisovacích sil a zvýšení jakosti výlisku rozhodli vyrábět díl ve dvou tazích.

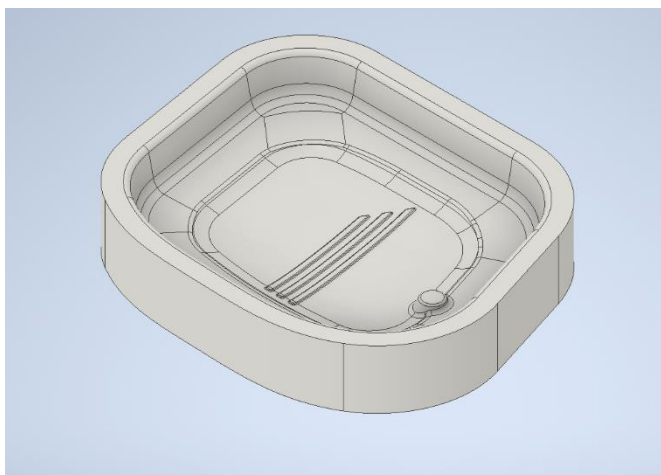
První verze nástrojů pro výrobu ve dvou tazích je spíše experimentální za účelem vytvořit simulaci a dále nástroje zdokonalit. Použili jsme obdélníkový přístřih s přídávkem 20 mm od původního přístřihu.



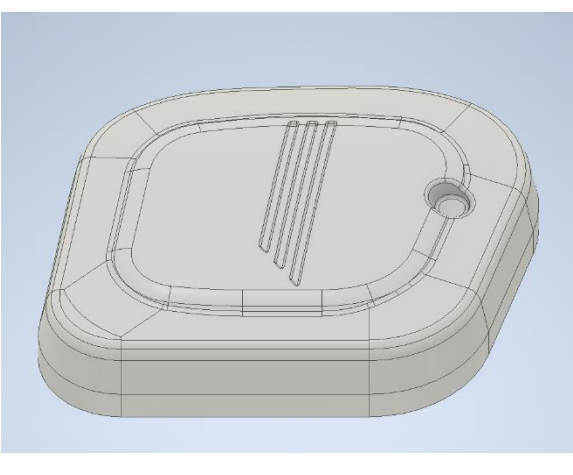
Obrázek 52 Dolní nástroj první operace verze 2



Obrázek 53 Horní nástroj první operace verze 2

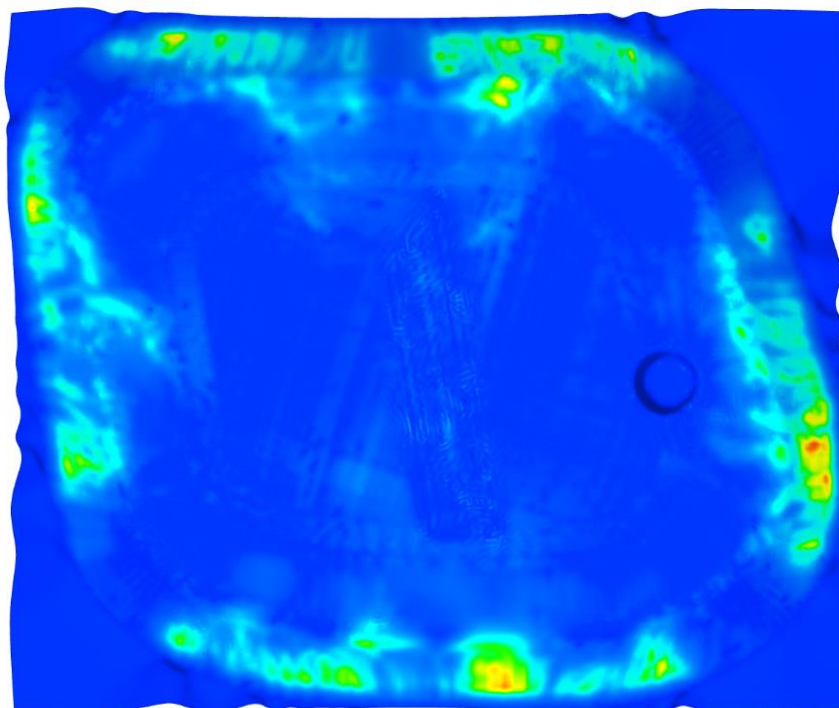
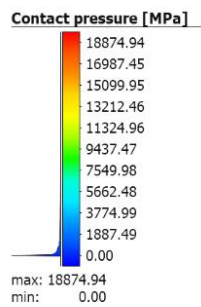


Obrázek 51 Horní nástroj druhé operace verze 2



Obrázek 50 Dolní nástroj druhé operace verze 2

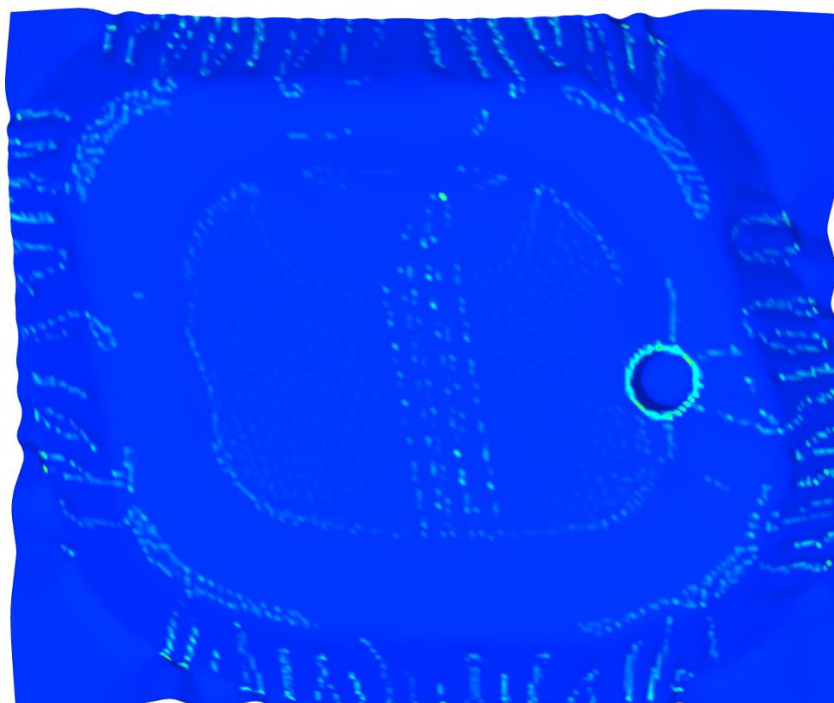
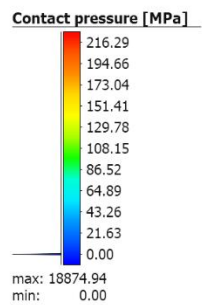
Simulaci jsme provedli v programu Simufact Forming 2021.1. Mřížka simulovaného přístřihu obsahovala 29 216 elementů s hustotou sítě 2,0418 mm. Plech byl simulován s pěti vrstvami. Vzhledem k pružnosti plastu a nízké přesnosti tisku nástroje ( odhad  $\pm 0,2$ mm ) nebyla vytvořena v konstrukci nástrojů žádná vůle. Bohužel samotnou simulaci jsme prováděli se simulovanými absolutně tuhými nástroji. Při dosednutí nástrojů bez vůle v simulaci vznikaly extrémně vysoké lisovací síly a kontaktní tlaky způsobené zesílením tloušťky plechu v určitých oblastech, kde došlo k napěchování plechu. Z tohoto důvodu jsou výrazně průkaznější výsledky 1. kroku simulace před dosednutím. Výsledky této simulace jsou použity na úpravu další verze nástrojů, kde již by počítáno s odpružením plechu.



**StampingFe3D-2 - Results - 1**  
Sub-stage: Forming  
Stroke: 60.0 mm



*Obrázek 54 Simulace verze 2 - první tah 100%*

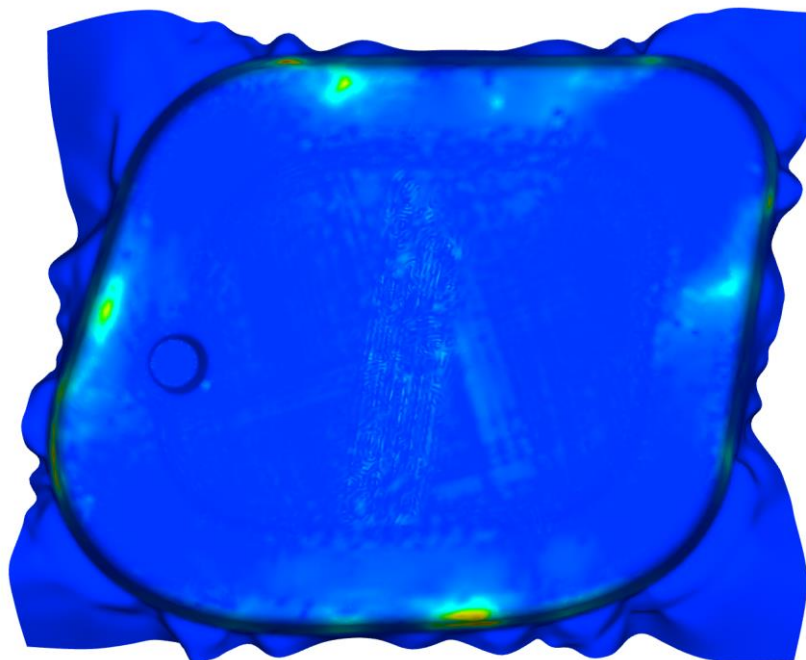
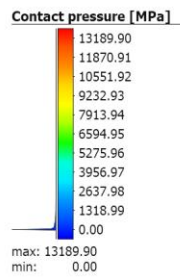


**StampingFe3D-2 - Results - 1**  
Sub-stage: Forming  
Stroke: 59.0144 mm



*Obrázek 55 Simulace verze 2 - první tah 98,96%*

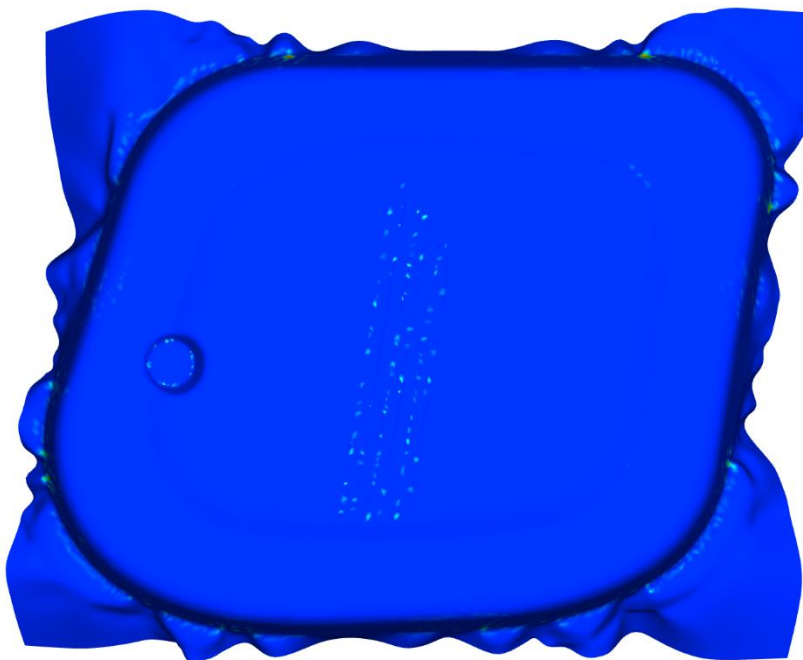
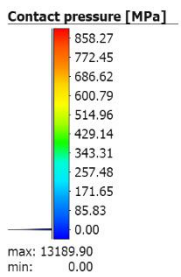




**StampingFe3D-3 - Results - 1**  
Sub-stage: Forming  
Stroke: 60.0 mm



*Obrázek 56 Simulace verze 2 - druhý tah 100%*



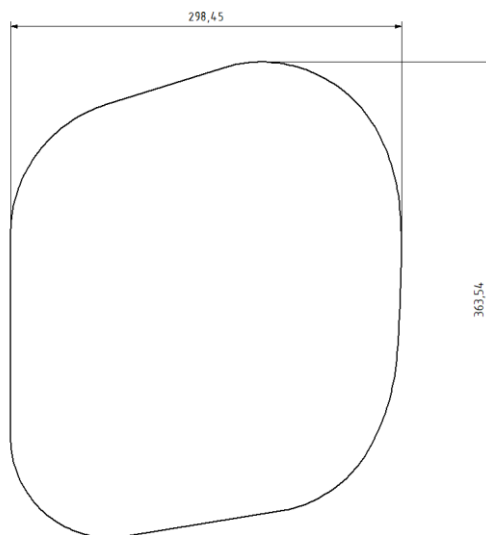
**StampingFe3D-3 - Results - 1**  
Sub-stage: Forming  
Stroke: 59.4768 mm



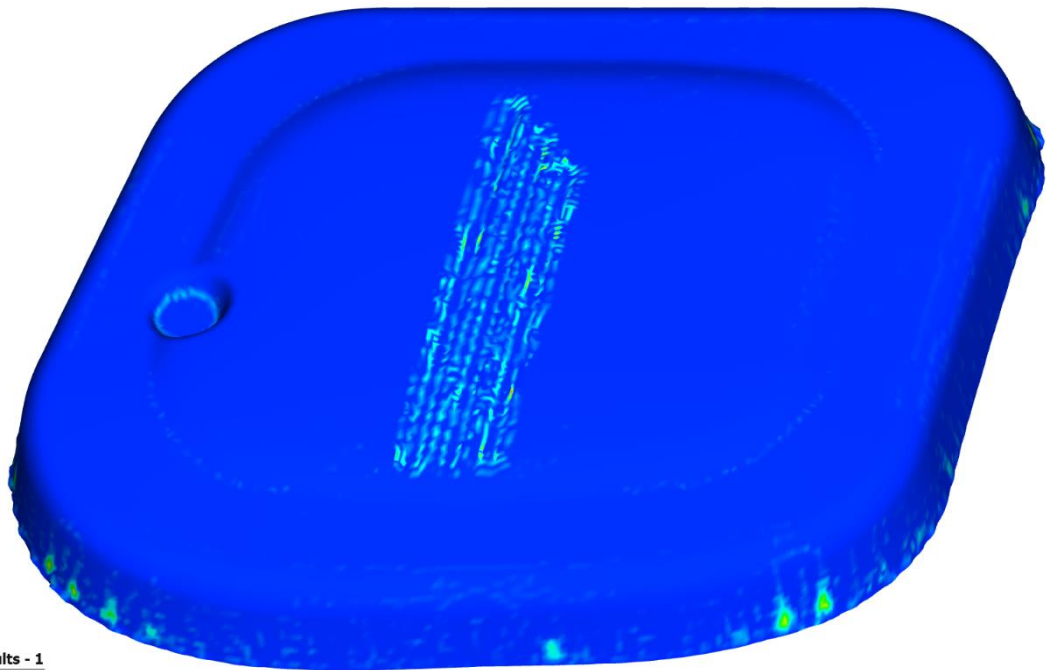
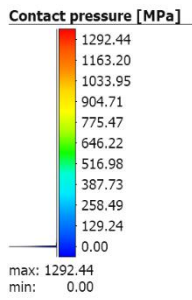
*Obrázek 57 Simulace verze 2 - druhý tah 99,13%*

### 4.3.3 Třetí verze sady nástrojů

Jak můžeme vidět v minulé simulaci, tlaky vznikající ve vnitřním rádiu zapuštění pro zámek jsou velmi vysoké. V další verzi nástrojů jsme se proto rozhodli táhnout zapuštění zámku ve dvou tazích. V prvním tahu bylo zapuštění o 2 mm mělčí a o 1 mm širší s větším vnitřním rádiusem. Zároveň lisování drážek na čele dvířek bylo přesunuto do druhé operace. Pro reálnější výsledky simulací byla vůle při tažení stanovena na 0,05mm pro první operaci a 0,08mm pro druhou operaci. Nástroje byly rozměrově optimalizovány pro 3D tiskárnu s tiskovou plochou 350 mm x 350 mm. Aby bylo možné v nástroji vystředit přístřih, bylo nutné přístřih tvarově změnit a zmenšit. Přístřih má nyní tvar rozvinutého výlisku. Simulaci jsme opět provedli v programu Simufact Forming 2021.1. Mřížka simulovaného přístřihu se skládala z 34 536 elementů s hustotou sítě 1,8612mm. Plech byl simulován s pěti vrstvami.



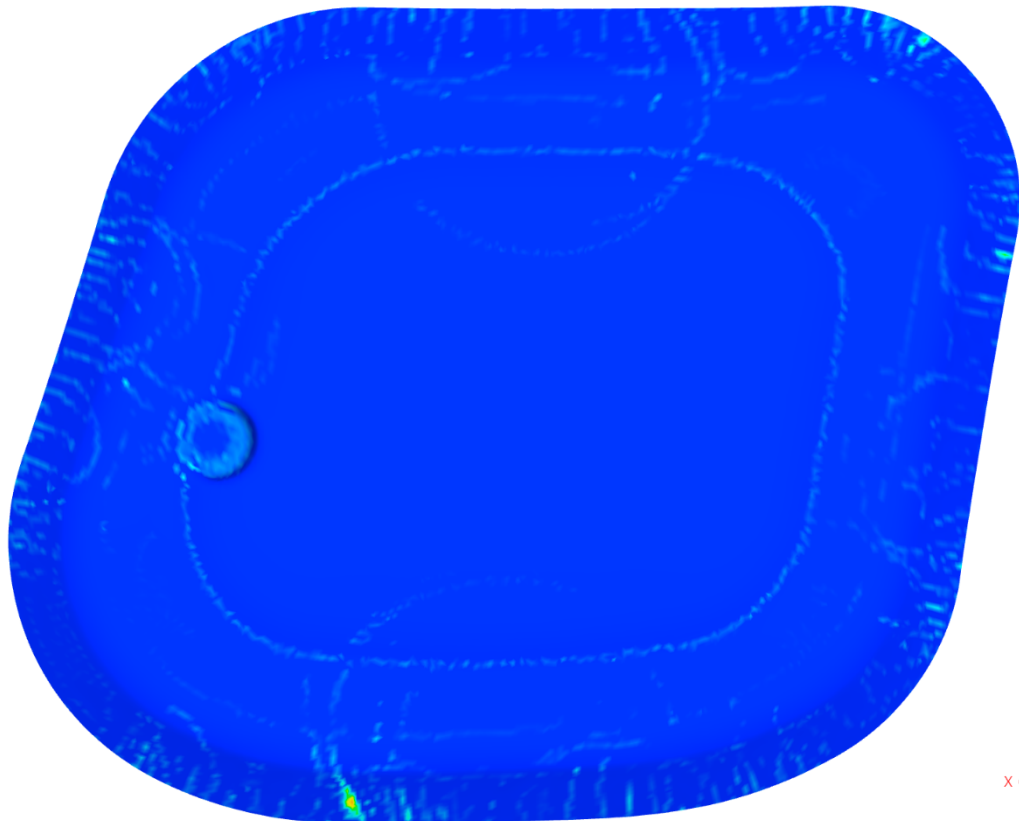
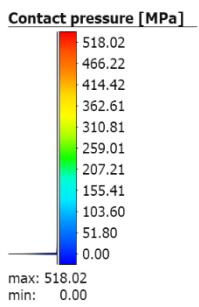
Obrázek 58 Přístřih



**StampingFe3D-5 - Results - 1**  
Sub-stage: Forming  
Progress: 100.00%



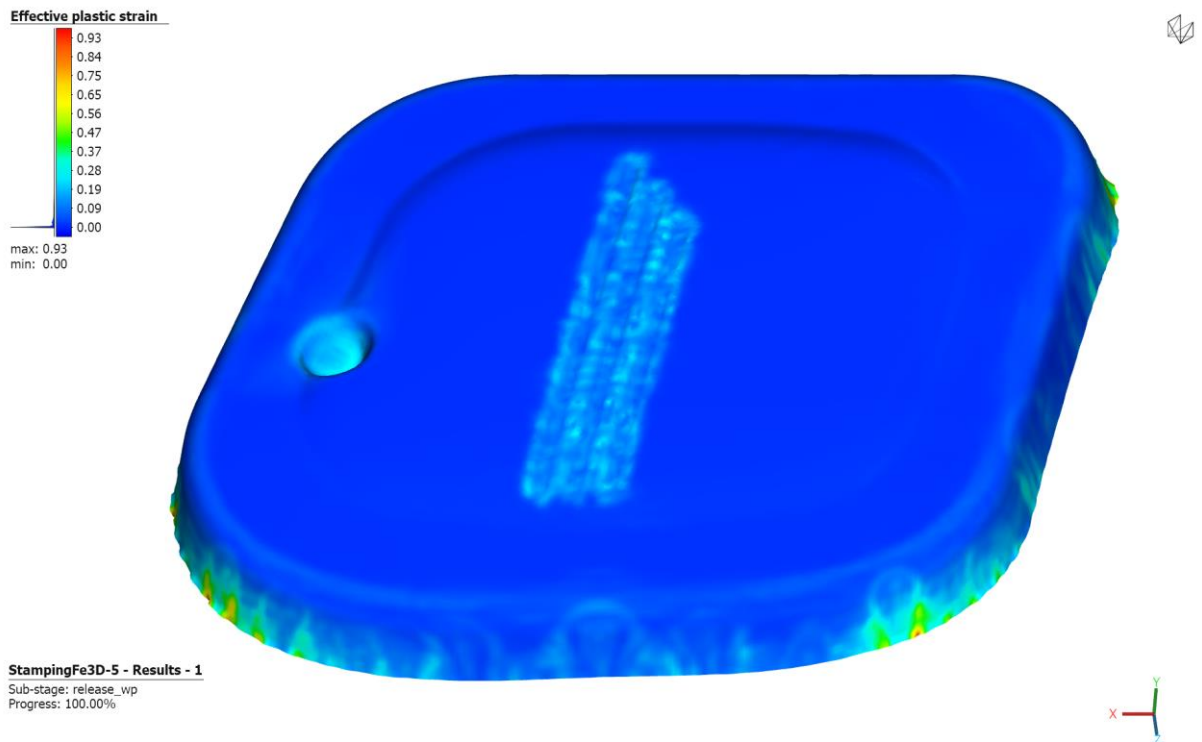
*Obrázek 59 Simulace verze 3- první tah*



**StampingFe3D-2 - Results - 2**  
Sub-stage: Forming  
Progress: 100.00%



*Obrázek 60 Simulace verze 3- druhý tah*

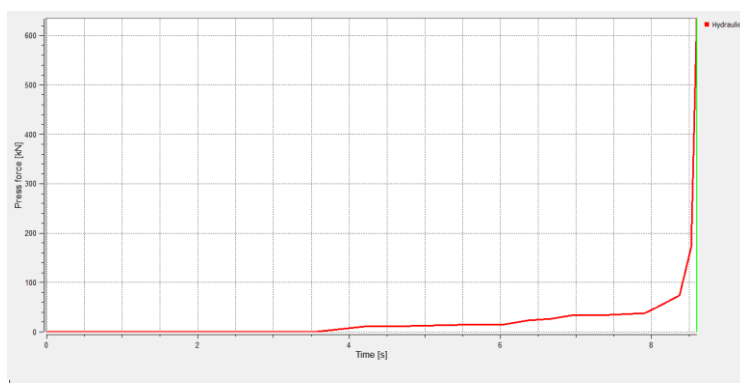


Obrázek 61 Simulace verze 3- druhý tah – odlehčený

Jak můžeme vidět došlo ke snížení kontaktních tlaků, avšak stále jsou tlaky vyšší než mez pevnosti PLA. Při skutečném lisování se plast nejspíše velmi zdeformuje tudíž stále zůstává otázkou, zdali plastový nástroj lisování vydrží a pokud ano, jaký bude skutečný tvar výlisku. Kromě změnění rádiusů a tvaru výlisku by možným řešením mohlo být například vlepění ocelové soustružené vložky do místa zapuštění pro zámek.

Pro první operaci spočítala simulace maximální lisovací sílu 245 kN.

Pro druhou operaci spočítala simulace lisovací sílu 600 kN

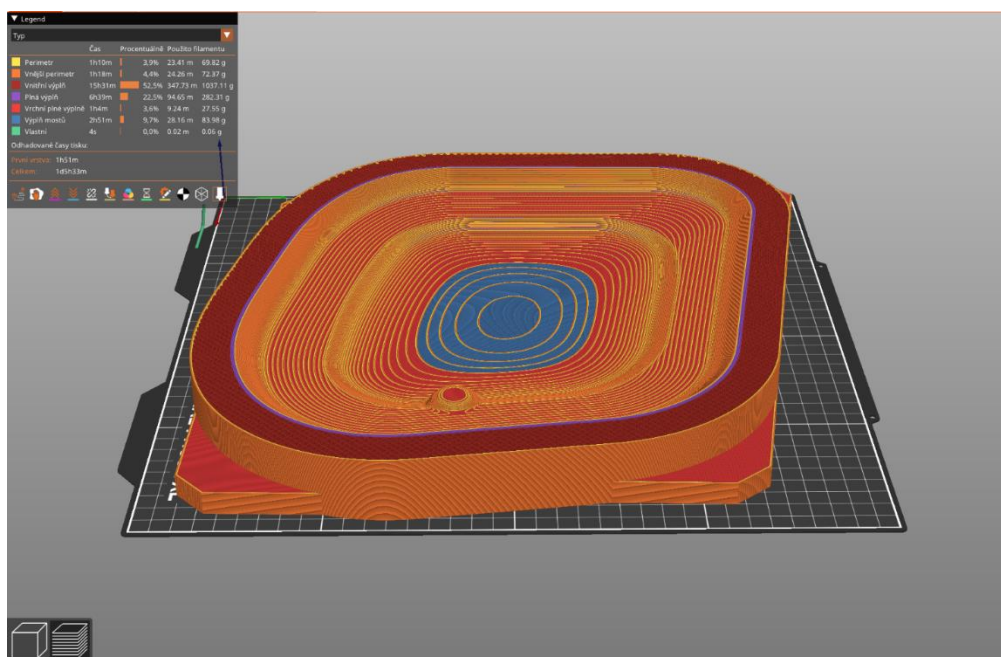


Obrázek 63 Průběh lisovací síly – druhý tah

U druhé simulace je zřejmé, že lisovací síla je příliš velká. Při okrajích dílu dochází ke ztluštění až 0,13mm a při lisovací vůli 0,08mm v těchto místech vznikají velké tlaky.

## 4.4 Tištění nástrojů

Nástroje byli vytištěny na tiskárnách Mercury One a Prusa XL. Tiskárna Mercury One byla vytvořena konverzí z tiskárny Ender 5+ a byla osazena tryskou o průměru 0,4mm, zatímco tiskárna Prusa XL byla osazena tryskou o průměru 0,6mm. Byla zvolena 40% výplň se vzorem do mřížky. Výška vrstvy byla zvolena 0,3mm a počet vrchních plných vrstev byl stanoven na 7. U spodní skořepiny byly zvoleny 3 plné vrstvy. Boční stěny tvořily dva plné perimetry. Spodní nástroj druhé operace byl vytištěn na tiskárně Prusa XL, ostatní nástroje byly vytištěny na tiskárně Mercury One



Obrázek 64 Spodní nástroj první operace připravený na tisk v programu PrusaSlicer



Obrázek 65 Sada nástrojů pro první operaci



Obrázek 66 Sada nástrojů pro druhou operaci

## 4.5 Lisování

Před samotným lisováním bylo třeba připravit přístřihy. Byli vystřiženy tři přístřihy - jeden původní velikost a dva o 5mm z každé strany menší. Přístřihy byli vystřiženy z plechu z oceli DC01 o tloušťce 0,7mm.

Nástroje byly do lisu upnuty pomocí upínek. Byl použit univerzální lis s maximální lisovací silou 1000 kN.

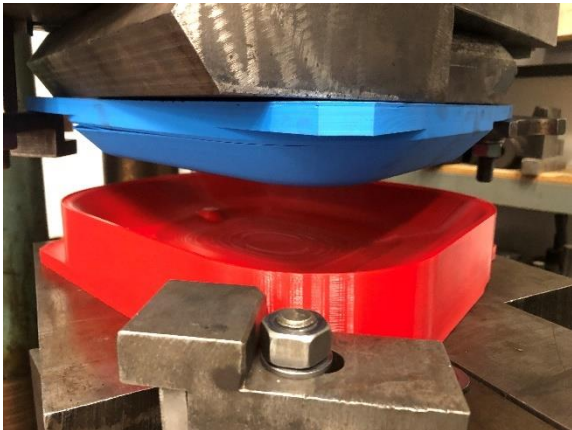
Spodní nástroj první operace obsahoval rámeček, do kterého se vložil přístřih, aby byla pozice přístřihu zajištěna. Pro druhou operaci byl plech otočen, aby bylo možné výlisek z první operace na nástroj vložít a byla tak zajištěna jeho pozice. Mezi plechem a nástrojem byla z obou stran vložena PE folie sloužící ke snížení tření a opotřebení nástroje.



Obrázek 67 Použitý lis

#### 4.5.1 První tah

První malý přístřih byl s přestávkami postupně lisován až do síly 600 kN. Druhý malý přístřih byl lisován lisovací silou 250 kN (síla vypočtená simulací byla 245kN) a třetí velký přístřih byl lisován silou 500 kN. Jak je patrné z obrázků níže lisovací síla přesahující 250 kN nijak výrazně neovlivnila zvlnění výlisku a větší přístřih také nebyl méně vlnitý.



Obrázek 69 Upnutí první operace



Obrázek 68 Přístřih vložený do nástroje



Obrázek 70 První operace, první přístřih 600 kN lisovací síla



Obrázek 71 První operace, druhý přístřih 250 kN lisovací síla



Obrázek 72 První operace, třetí přístřih 500 kN lisovací síla

Po vylisování tří výlisků zůstaly nástroje bez jakéhokoli výrazného poškození. Viditelné byly pouze menší škrábance na povrchu nástroje.





*Obrázek 73 Nástroje prvního tahu po lisování*

#### **4.5.2 Druhý tah**

Začalo se lisováním přístřihu 1. Při postupném zvyšování lisovací síly se začaly ozývat zvuky praskání. Lisování bylo zastaveno a horní nástroj byl zvednut. Díl byl velmi zohýbaný a zvlněný plech po obvodu se vrýval do nástrojů. Rozhodli jsme se pokračovat v lisování. Při lisovací síle 250 kN došlo k destrukci nástroje. Vzniklý výlisek byl velmi zvlněný. V jednom místě došlo dokonce k přeložení plechu. Velmi zvlněný plech se zaryl do plastových nástrojů, které se místo rozlisování zvlnění výlisku plasticky zdeformovaly.



*Obrázek 74 Upnutí druhé operace*



Obrázek 79 Uložení dílu pro druhou lisovací operaci



Obrázek 80 Prasklý nástroj, druhý tah 1



Obrázek 77 Prasklý nástroj, druhý tah 2



Obrázek 78 Dolní nástroj druhý tah po použití



Obrázek 76 Výlisek – druhý tah zezadu



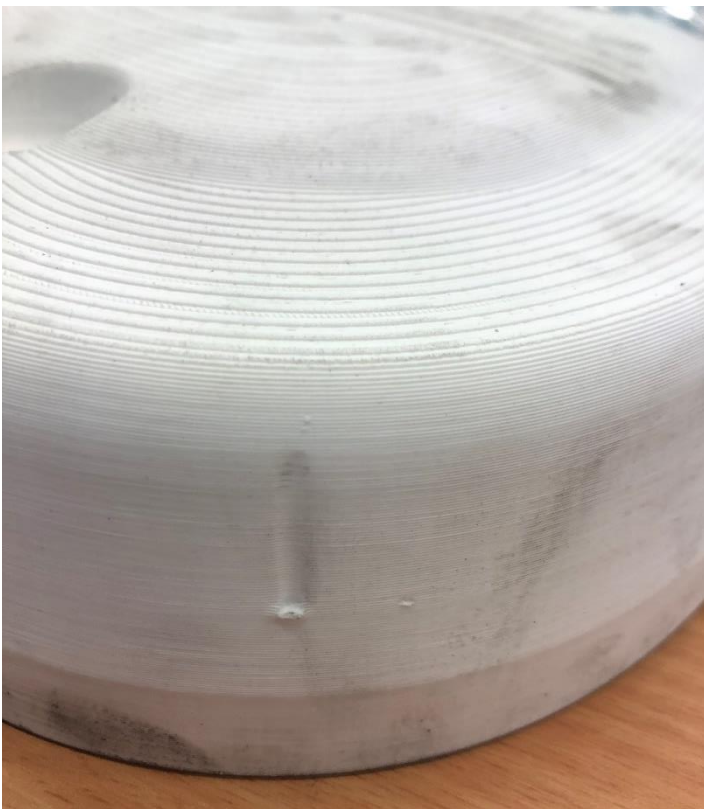
Obrázek 75 Výlisek – druhý tah zepředu



Obrázek 84 Otlačení nástroje 1



Obrázek 81 Otlačení nástroje a přeložení plechu



Obrázek 83 Otlačení nástroje 2



Obrázek 82 Přeložení plechu

## 4.6 Zhodnocení

Finální výlisek je bohužel velmi zvlněný a nedá se tedy tímto výrobním postupem vyrobit v dostatečné kvalitě, avšak zdá se velmi pravděpodobné, že tento díl bude při změně výrobního postupu vyrobitelný i na 3D tištěných plastových nástrojích. Při pohledu na vylisovaný díl je celá přední stěna překvapivě kvalitní, a to i včetně tří drážek, které se na ní vyskytují. Drážky mají poměrně precizní detail. Na výlisku jsou dokonce vidět prolisované i jednotlivé tištěné vrstvy nástroje. Bylo by tedy vhodné zaměřit se na postprocessing, aby byl nástroj hladší. V simulacích byli v oblasti hlubokého prolisu pro zámek dvířek velké kontaktní tlaky přesahující pevnost PLA filamentu. Tento prolis se vylisoval velmi kvalitně. Na nástroji nebylo vidět výrazné opotřebení. Z výsledků lze vyzorovat, že simulace s absolutně tuhými nástroji v tomto případě neodpovídá reálnému lisování. Simulace by byla použitelná pouze v případě, kdyby se vytvořila materiálová karta pro 3D tištěné PLA. Nástroje z PLA jsou velmi měkké a nejsou schopné rozlisovat zvlněný plech a místo toho se plasticky deformují. Horní nástroj pro druhý tah praskl při prvním lisovaném dílu při lisovací síle 250kN. Skutečnost, že se na výlisku vylisovaly drážky v plné výšce dokazuje, že došlo k dosednutí nástrojů a teprve pak k prasknutí nástroje. První nástroj byl o něco robustnější s tlustší boční stěnou a po vylisování tří výlisku je takřka neopotřeben, a to i po lisování silou 600 kN. Pro úspěšné vylisování dílu by bylo nejspíše nutné použít nástroj s přidržovačem.

## 5. Závěr

V teoretické části byla popsána problematika 3D tisku, lisování a lisovacích nástrojů. Byly podrobně popsány metody 3D tisku SLA a FDM, včetně srovnání vlastností materiálů, které je možné těmito metodami tisknout. Dále jsou rozebrány dopady tiskových parametrů na vlastnosti vytištěných dílů. Poté je teoretická část zaměřena na tváření, hlavně na téma lisování, a to i včetně lisovacích nástrojů a jejich konstrukce. V experimentální části práce bylo provedeno oskenování dílu na 3D skeneru. Podle skenu byl ručně vytvořen CAD model, který sloužil, jako základ pro návrh nástrojů. Byly vytvořeny tři verze nástrojů. První verze nástrojů lisovala díl jedním tahem a byla nasimulována v programu Autoform, zbylé dvě byly nasimulovány v programu SimuFact Forming a lisování dílu probíhalo ve dvou tazích. Lisování ve dvou tazích bylo zvoleno z důvodu snížení lisovacích sil a zvýšení kvality výlisku. Vzniklá sada nástrojů byla poté vytištěna na 3D tiskárně a následně otestována reálným lisováním. Lisování probíhalo na univerzálním lisu, ke kterému byli nástroje připevněny upínkami. Byly vystřiženy tři přístřihy. První operace proběhla úspěšně u všech tří výlisků a nástroje byly takřka nepoškozeny, avšak plech byl lehce zvlněný. Při lisování prvního plechu, při druhé operaci došlo k destrukci nástroje při působení síly 250 kN. Nástroje na sebe už však dosedly. Vzniklý plechový díl byl ale velmi zvlněný. Při druhé operaci se zvlněný plech zakousnul do měkkých plastových nástrojů, které nebyli plech schopny srovnat. Zároveň došlo k poškození povrchu nástroje. Reálné výsledky lisování se značně lišily, od výsledků nasimulovaných. Provedené simulace tedy nepomohly s návrhem nástrojů. Hlavním důvodem nepřesnosti simulací bylo pravděpodobně simulování absolutně tuhých nástrojů, místo simulování deformovatelných nástrojů, které by více odpovídaly použitým plastovým nástrojům.

Podměty pro další práci:

- Simulovat lisování s deformovatelnými nástroji
- Znovu vypracovat výrobní postup dílu s nástroji s přidržovačem, nebo lisovat na více tahů
- Dále řešit vyztužení nástrojů

## Bibliografie

- [1] *Composites Part B: Engineering: Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*. Oxon: Elsevier, 2018, .
- [2] ŠTAFFOVÁ, Martina, František ONDREÁŠ, Juraj SVATÍK, Marek ZBONČÁK, Josef JANČÁŘ a Petr LEPCIO. 3D printing and post-curing optimization of photopolymerized structures: Basic concepts and effective tools for improved thermomechanical properties. *Polymer Testing* [online]. 2022, **108** [cit. 2022-11-06]. ISSN 01429418. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymertesting.2022.107499
- [3] KHADILKAR, Aditya, Jun WANG a Rahul RAI. Deep learning–based stress prediction for bottom-up SLA 3D printing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2019, **102**(5-8), 2555-2569 [cit. 2022-11-06]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-019-03363-4
- [4] SALONITIS, K. Stereolithography. *Comprehensive Materials Processing* [online]. Elsevier, 2014, 19-67 [cit. 2023-08-01]. ISBN 9780080965338. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-096532-1.01001-3
- [5] What is FDM 3D Printing?. In: *HLH RAPID* [online]. AMI, 2023 [cit. 2023-08-09]. Dostupné z: <https://hlhrapid.com/knowledge/what-is-fdm-3d-printing/>
- [6] 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?. In: *SVĚT HARDWARE* [online]. oXyShop s.r.o., 2023 [cit. 2023-08-01]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>
- [7] 3D Printing Concepts and 3D Printer Parts. In: *Leapfrog: 3D Printers* [online]. 2020 [cit. 2023-08-01]. Dostupné z: <https://www.lpfrg.com/guides/3d-printing-concepts-and-3d-printer-parts/>
- [8] Creality Ender 5 Plus. In: *3DJAKA* [online]. niceshops GmbH, c2010-2023 [cit. 2023-08-09]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/3d-tiskarny-nahradni-dily-creality/ender-5-plus>
- [9] KRISTIAWAN, Ruben Bayu, Fitriani IMADUDDIN, Dody ARIAWAN, UBAIDILLAH a Zainal ARIFIN. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament

- processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering* [online]. 2021, **11**(1), 639-649 [cit. 2023-08-09]. ISSN 2391-5439. Dostupné z: doi:10.1515/eng-2021-0063
- [10] *ABS FILAMENT: TECHNICKÝ LIST*. Filament-PM by Plasty Mladeč. Dostupné také z: [www.filament-pm.cz](http://www.filament-pm.cz)
- [11] *PETG FILAMENT: TECHNICKÝ LIST*. Filament-PM by Plasty Mladeč. Dostupné také z: [www.filament-pm.cz](http://www.filament-pm.cz)
- [12] *PLA FILAMENT: TECHNICKÝ LIST*. Filament-PM by Plasty Mladeč. Dostupné také z: [www.filament-pm.cz](http://www.filament-pm.cz)
- [13] *Raise3D ABS Technical Data Sheet*. 3. 2017. Dostupné také z: [www.RAISE3D.COM](http://www.RAISE3D.COM)
- [14] *Raise3D Premium ABS Technical Data Sheet*. 3. 2017. Dostupné také z: [WWW.RAISE3D.COM](http://WWW.RAISE3D.COM)
- [15] *Raise3D Premium PLA Technical Data Sheet*. 3. 2017. Dostupné také z: [www.RAISE3D.COM](http://www.RAISE3D.COM)
- [16] *Technický list: Prusament ASA od Prusa Polymers*. 2022.
- [17] *Technický list: Prusament PLA od Prusa Polymers*. 1.1. 2022.
- [18] *Technický list: Prusament PC Blend od Prusa Polymers*. 2022.
- [19] *Technický list: Prusament PETG od Prusa Polymers*. 2022.
- [20] *Technical datasheet: Liqcreate Stone Coal Black*. Dostupné také z: [www.liqcreate.com](http://www.liqcreate.com)
- [21] *Technical Data Sheet: 3DJAKE ecoResin*. 1. Saaz 99, Paldau, Rakousko: 3Djake GmbH, 2022. Dostupné také z: <http://www.3djake.com/>
- [22] *Technical datasheet: Liqcreate Strong-X*. Dostupné také z: [www.liqcreate.com](http://www.liqcreate.com)
- [23] *Technický list: Prusamentová pryskyřice Tough - všechny barvy*. 1.2. 2023.
- [24] 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. 2023-08-01]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.10.003
- [25] HODGSON, Gary. Flow Math. In: *Slic3r Manual* [online]. [cit. 2023-08-09]. Dostupné z: <https://manual.slic3r.org/advanced/flow-math>
- [26] Vrstvy a perimetry. In: *Prusa Research* [online]. shopsys [cit. 2023-08-08]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/vrstvy-a-perimetry\\_1748](https://help.prusa3d.com/cs/article/vrstvy-a-perimetry_1748)

- [27] TECHNOLOGIČNOST KONSTRUKCE PŘI 3D TISKU PLASTOVÝCH DÍLŮ. In: *FAKULTA STROJNÍ ČVUT V PRAZE* [online]. ČVUT FS, c2014-2023 [cit. 2023-08-09]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/technologicnost-konstrukce-3dtisk/technologicnost-konstrukce-pri-3d-tisku-plastovych-dilu-3dtisk/>
- [28] Klipper Input Shaping for Ender 3 - All You Need to Know. In: *Obico* [online]. 2022 [cit. 2023-08-01]. Dostupné z: <https://www.obico.io/blog/klipper-input-shaping-ender-3/>
- [29] FAQ - Často kladené otázky. In: *Prusa Research* [online]. Prusa Research a.s. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/faq-casto-kladene-otazky\\_1932](https://help.prusa3d.com/cs/article/faq-casto-kladene-otazky_1932)
- [30] Creality HALOT SKY (CL-89). In: *CREALITY* [online]. STUDIO design, 2023 [cit. 2023-08-09]. Dostupné z: <https://www.crealitystore.cz/produkt/creality-halot-sky-cl-89/>
- [31] Original Prusa SL1S SPEED 3D tiskárna + CW1S. In: *Prusa Research* [online]. Prusa Research a.s. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/original-prusa-sl1s-speed-3d-tiskarna-cw1s/#awards>
- [32] BAREŠ, Karel, Karel DÍTĚ, Vladimír HAŠEK et al. *Lisování*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1971.
- [33] NOVOTNÝ, Jiří, Jan ŠANOVEC, Bohumír BEDNÁŘ a Viktor KREIBICH. *TECHNOLOGIE I: Slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy*. České vysoké učení technické v Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006.
- [34] Technologie plošného tváření - stříhání. In: *KATEDRA STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE* [online]. Katedra strojírenské technologie, 2018 [cit. 2023-08-09]. Dostupné z: [https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/06.htm](https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/06.htm)
- [35] SUCHY, Ivana. *Handbook of die design*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2006. McGraw-Hill handbooks. ISBN 9780071462716.
- [36] *How to Do Rapid Tooling for Sheet Metal Forming With 3D Printed Dies* [online]. [cit. 2023-08-01]. Dostupné z: <https://blogs.ib-caddy.com/wp-content/uploads/2021/01/3DPrintedDies.pdf>
- [37] 3D skener Shining EinScan-SE (otočný talíř). In: *BOUKAL* [online]. Boukal s. r. o., c1993-2023 [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://www.boukal.cz/3d-skener-shining-einscan->



se-otocny-talir/16448/produkt?gclid=Cj0KCQjwtmlBhD3ARIsAARoaExcBvmjUsSWCcf-PRPIwkBjViJppCmJRn-FUc4CcVliLuixfiUI7rUaAv9fEALw\_wcB

- [38] ČSN EN 10152 (420911). *Ocelové ploché výrobky válcované za studena elektrolyticky pozinkované pro tváření za studena - Technické dodací podmínky* [online]. 2009 [cit. 10,8,2023].
- [39] PROCHÁZKA, Jiří, Miroslav ZAHRADNÍK, Milan NĚMEC a Jiří NOVOTNÝ. *TECHNOLOGIE SLÉVÁNÍ, TVÁŘENÍ A SVAŘOVÁNÍ*. Praha 1, Husova 5: Ediční středisko ČVUT, 1982.
- [40] What To Do When 3D Printing Supports Keep Failing. In: *Printing It 3D* [online]. Printing It 3D, 2021 [cit. 2023-08-09]. Dostupné z: <https://printingit3d.com/what-to-do-when-3d-printing-supports-keep-failing/>
- [41] Sestava 3D tiskárny TRILAB DeltiQ 2. In: *Materialpro3d* [online]. 2023 [cit. 2023-08-09]. Dostupné z: [https://www.materialpro3d.cz/3d-tiskarny/trilab-deltiq-2-3d-tiskarna-novinka/?variantId=15657&gad=1&gclid=CjwKCAjw8symBhAqEiwAaTA\\_\\_Dnh4XoMwi gUl\\_E7PxBIkHDhMMuUcR44oHPQlsvq7cGIIJG7YSpfZhoCn3QQAvD\\_BwE](https://www.materialpro3d.cz/3d-tiskarny/trilab-deltiq-2-3d-tiskarna-novinka/?variantId=15657&gad=1&gclid=CjwKCAjw8symBhAqEiwAaTA__Dnh4XoMwi gUl_E7PxBIkHDhMMuUcR44oHPQlsvq7cGIIJG7YSpfZhoCn3QQAvD_BwE)
- [42] 2A. Rozebrání extruderu MK3S+. In: *Prusa Research* [online]. Prusa Research a.s. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/guide/2a-rozebrani-extruderu-mk3s\\_188397](https://help.prusa3d.com/cs/guide/2a-rozebrani-extruderu-mk3s_188397)
- [43] Jawa 250 typ 353. In: *Jawa klub* [online]. Jawa klub, c2001-2023 [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: [https://cs.jawa-club.com/gallery\\_detail.php?id=6&ddlb\\_model=8&ddlb\\_submodel=8](https://cs.jawa-club.com/gallery_detail.php?id=6&ddlb_model=8&ddlb_submodel=8)
- [44] Lisovací náradí. In: *Náradovna ŠKODA AUTO* [online]. 2023 [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://skoda-naradovna.cz/cs/lisovaci-naradi/>

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Vlastnosti filamentů pro FDM 3D tisk [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] .....	22
Tabulka 2 Mechanické vlastnosti na 3D tištěných vzorcích [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] .....	23
Tabulka 3 Rázové pevnosti testované na 3D tištěných vzorcích [10] [11] [12] [13] [15] [16] [17] [18] [19] [20].....	24
Tabulka 4 Vlastnosti SLA pryskyřic [21] [22] [20] [23].....	26
Tabulka 5 Vlastnosti materiálu DC01 (výtažek z normy ČSN EN 10152) [38] .....	45

## Seznam obrázků

Obrázek 1 SLA tisk zdola [3].....	14
Obrázek 2 Ukázka SLA 3D tisku [40] .....	14
Obrázek 3 SLA 3D tisk shora [3].....	15
Obrázek 4 Ukázka FDM 3D tisku [5] .....	16
Obrázek 5 Tisková hlava [42].....	16
Obrázek 6 Schéma tiskové hlavy [7].....	17
Obrázek 7 Kartézská FDM 3D tiskárna [6] .....	18
Obrázek 8 Core XY FDM 3D tiskárna [8] .....	18
Obrázek 9 Delta FDM 3D tiskárna [41].....	19
Obrázek 10 Testovací vzorky Prusa Research [16] .....	24
Obrázek 11 Testovací vzorek pro tahovou zkoušku Raise 3D [15].....	25
Obrázek 12 Testovací vzorek pro zkoušku ohybem Raise 3D [15] .....	25
Obrázek 13 Testovací vzorek pro zkoušku vrubové houževnatosti Raise 3D.....	25
Obrázek 14 Vzorky pro mechanické zkoušky Fiberthree [20] .....	25
Obrázek 15 Detail vodorovné stěny při FDM 3D tisku [9].....	26
Obrázek 16 Šířka perimetru [26] .....	27
Obrázek 17 Přesah dvou perimetrů [26] .....	27
Obrázek 18 Vhodná orientace dílu pro FDM 3D tisk [27] .....	28
Obrázek 19 Vzory výplně a hustota výplně [27].....	29
Obrázek 20 Vliv vibrací na výtisk [28].....	29
Obrázek 21 Imput shaping [28] .....	29
Obrázek 22 Vliv střížné vůle na povrch stříhané stěny a) správná střížná vůle, b) příliš velká střížná vůle [33] .....	32
Obrázek 23 Schéma stříhu [39] .....	32
Obrázek 24 Stříhání s přidržovačem a stříhání s nátláčnou hranou [34] .....	33
Obrázek 25 Střížné plány a využití materiálu [34].....	34
Obrázek 26 Orientace plechu pro ohýbání.....	35
Obrázek 27 Ohraňování [33] .....	35
Obrázek 28 Ohýbání s pohyblivými částmi nástroje [33] .....	36
Obrázek 29 Tažení [33].....	36
Obrázek 30 Nástroj s brzdící drážkou [33].....	37

Obrázek 31 Postupové stříhání [33] .....	38
Obrázek 32 Dorazy a)pevný doraz, b) automatický doraz [35] .....	39
Obrázek 34 Postupový nůž [35].....	39
Obrázek 33 kombinované postupové tažení a stříhání [33] .....	39
Obrázek 35 Nástroj s vodícími tyčemi [35].....	40
Obrázek 36 Raznice na bočnici Škoda Auto [44] .....	40
Obrázek 37 Postupový nástroj s vodící deskou [33].....	40
Obrázek 38 Nástroj s přidržovačem [33] .....	41
Obrázek 39 Druhá operace Formlabs [36] .....	42
Obrázek 40 První operace Formlabs [36] .....	42
Obrázek 41 Ohýbaný díl Formlabs [36] .....	42
Obrázek 42 Přehled nástrojů a tvařenců Formlabs [36] .....	43
Obrázek 43 Dvířka bateriové schránky Jawa .....	43
Obrázek 44 Jawa 250 „Kývačka“ [43] .....	43
Obrázek 45 3D skener Shining EinScan-SE [37] .....	44
Obrázek 46 Sken dvířek .....	44
Obrázek 47 Sken s vyplněnými dírami.....	44
Obrázek 48 3D CAD model dvířek .....	45
Obrázek 49 Simulace verze 1 nástrojů .....	46
Obrázek 50 Dolní nástroj druhé operace verze 2.....	47
Obrázek 51 Horní nástroj druhé operace verze 2 .....	47
Obrázek 52 Dolní nástroj první operace verze 2 .....	47
Obrázek 53 Horní nástroj první operace verze 2.....	47
Obrázek 54 Simulace verze 2 - první tah 100% .....	48
Obrázek 55 Simulace verze 2 - první tah 98,96% .....	48
Obrázek 56 Simulace verze 2 - druhý tah 100% .....	49
Obrázek 57 Simulace verze 2 - druhý tah 99,13%.....	49
Obrázek 58 Přístřih .....	50
Obrázek 60 Simulace verze 3- první tah .....	51
Obrázek 59 Simulace verze 3- druhý tah.....	51
Obrázek 61 Simulace verze 3- druhý tah – odlehčený .....	52
Obrázek 63 Průběh lisovací síly - první tah.....	52

Obrázek 62 Průběh lisovací síly – druhý tah.....	52
Obrázek 64 Spodní nástroj první operace připravený na tisk v programu PrusaSlicer.....	53
Obrázek 66 Sada nástrojů pro první operaci .....	54
Obrázek 65 Sada nástrojů pro druhou operaci .....	54
Obrázek 67 Použitý lis.....	55
Obrázek 68 Přístřih vložený do nástroje.....	55
Obrázek 69 Upnutí první operace .....	55
Obrázek 70 První operace, první přístřih 600 kN lisovací síla .....	56
Obrázek 71 První operace, druhý přístřih 250 kN lisovací síla .....	56
Obrázek 72 První operace, třetí přístřih 500 kN lisovací síla.....	56
Obrázek 73 Nástroje prvního tahu po lisování.....	57
Obrázek 74 Upnutí druhé operace .....	57
Obrázek 75 Výlisek – druhý tah zepředu.....	58
Obrázek 76 Výlisek – druhý tah zezadu .....	58
Obrázek 77 Prasklý nástroj, druhý tah 2 .....	58
Obrázek 78 Dolní nástroj druhý tah po použití .....	58
Obrázek 79 Uložení dílu pro druhou lisovací operaci.....	58
Obrázek 80 Prasklý nástroj, druhý tah 1 .....	58
Obrázek 81 Otlačení nástroje a přeložení plechu .....	59
Obrázek 82 Přeložení plechu .....	59
Obrázek 83 Otlačení nástroje 2 .....	59
Obrázek 84 Otlačení nástroje 1 .....	59