



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA DÍLŮ SLUNEČNÍCH BRÝLÍ S VYUŽITÍM 3D FDM TISKU

PRODUCTION OF SUNGLASES PARTS USING A 3D FDM PRINTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dominik Řepa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Dominik Řepa
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výroba dílů slunečních brýlí s využitím 3D FDM tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh a výroba dílů slunečních brýlí s využitím metod 3D tisku na FDM tiskárně. Autor provede rešerši zvolené problematiky. Zvolí metody a materiál vhodné pro danou aplikaci. Navrhne experimenty pro ověření správné funkce dílů, včetně metody MKP. Po provedení experimentální části získané poznatky aplikuje do hotového produktu a provede technicko–ekonomické zhodnocení a doporučení pro další využití.

Cíle diplomové práce:

- rešerše zvolené problematiky
- návrh experimentální části
- ověřovací výpočty MKP
- provedení a vyhodnocení experimentů
- výroba funkčního prototypu
- technicko–ekonomické zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univ., 2002. 128 s. ISBN 80-248-0034-9.

FÖRT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007. 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.

CHANG, Tien-Chien, Richard WYSK a Hsu-Pin WANG. Computer-Aided Manufacturing. 3. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005. 684 s. ISBN 0-13-142919-1.

CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu-Sing LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010. 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem specifických slunečních brýlí vyrobených metodou FDM 3D tisku. Teoretická část obsahuje charakteristiku slunečních brýlí a jejich výroby, charakteristiku jednotlivých metod 3D tisku, materiálů, komponent 3D tiskárny a parametry pro 3D tisk modelu. V experimentální části byly 3D tištěné vzorky, které byly tepelně zpracované na různé teploty, podrobeny mechanické zkoušce tahem. V další experimentální části byly běžné sluneční brýle podrobeny měření pevnosti pantů. Vyhodnocené parametry byly zhodnoceny a aplikovány do modelu. Výsledný model byl ověřen pomocí MKP a následně byl vytvořen fyzický prototyp slunečních brýlí.

Klíčová slova

3D tisk, Technologie FDM, sluneční brýle, zkouška tahem, tepelné zpracování

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the design of specific sunglasses produced by the FDM 3D printing method. The theoretical part contains characteristics of sunglasses and their production, characteristics of individual 3D printing methods, materials, 3D printer components and parameters for 3D printing of the model. In the experimental part, the 3D printed samples, which were heat treated to different temperatures, were subjected to a mechanical tensile test. In the next experimental part, regular sunglasses were subjected to hinge strength measurements. The evaluated parameters were evaluated and applied to the model. The resulting model was verified using FEM and a physical prototype of the sunglasses was subsequently created.

Keywords

3D printing, FDM technology, sunglasses, tensile test, heat treatment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŘEPA, Dominik. Výroba dílů slunečních brýlí s využitím 3D FDM tisku [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/148803>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Výroba dílů slunečních brýlí s využitím 3D FDM tisku vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Bc. Dominik Řepa

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	10
1.1 Sluneční brýle	10
1.2 Typy slunečních brýlí	11
1.2.1 Cestovní brýle (Wayfarers)	11
1.2.2 Pilotky (Aviators)	11
1.2.3 Sluneční brýle Browline	11
1.2.4 Čtvercové sluneční brýle	12
1.2.5 Kulaté sluneční brýle	12
1.2.6 Sluneční brýle Wrap-Around.....	13
1.2.7 Sluneční brýle Shield.....	13
1.3 Aktuální výrobní technologie slunečních brýlí	14
1.3.1 CNC Frézování	14
1.3.2 Prostřihování za pomoci matric, frézování drážek	14
1.3.3 Vstřikováním termoplastu do kovové formy	14
1.3.4 Pájením, případně svařováním	14
1.3.5 Alternativní metody – 3D tisk	14
2 TECHNOLOGIE VÝROBY	15
2.1 Možné varianty technologií 3D tisku slunečních brýlí	15
2.1.1 MJM 3D tisk	15
2.1.2 LOM 3D tisk.....	15
2.1.3 SLA 3D tisk	11
2.1.4 FFD/FFF 3D tisk	11
2.1.5 FFD/FDM 3D tisk	11
2.1.6 MJF 3D tisk	11
2.2 Zhodnocení možných metod 3D tisku.....	12
2.3 Tiskárny FFD/FDM-FFF.....	13
2.3.1 FFD/FFF tiskárna s kartézským systémem	13
2.3.2 3D tiskárna typu delta	16
2.4 Materiál využívaný při metodách FFF, FDM	17
2.4.1 PLA.....	17
2.4.2 PET-G.....	17
2.4.3 ABS	18
2.4.4 ASA	18

2.4.5	Nylon	18
2.5	Programy pro 3D tisk	19
2.5.1	Ultimaker Cura	19
2.5.2	Prusa Slicer	19
2.5.3	Simplify3D	19
2.6	Parametry pro nastavení tisku	20
2.6.1	Velikost trysky	20
2.6.2	Výška vrstvy tisku	20
2.6.3	Tisková rychlost	21
2.6.4	Teplota tisku	21
2.6.5	Shells a hustota výplně (infill)	21
2.7	Post processing	23
3	Výroba součástí slunečních brýlí	25
3.1	Tvorba 3D modelu slunečních brýlí	25
3.1.1	Skenování sklíčka brýlí	25
3.1.2	Tvar obrouček	26
3.1.3	Návrh pantů slunečních brýlí	27
3.1.4	Experimentální změření pevnosti pantu slunečních brýlí	34
3.1.5	Návrh paliček se štítky	36
3.1.6	Dvoubarevný tisk štítku	37
3.2	Experimentální změření pevnosti materiálu	39
3.2.1	Tahová zkouška	39
3.2.2	Příprava vzorku pro tahovou zkoušku	39
3.2.3	Vzorky pro tahovou zkoušku	40
3.2.4	Tisk vzorků	42
3.2.5	Tepelné zpracování vzorků – žihání v horkovzdušné troubě	42
3.2.6	Naměřené hodnoty	43
3.2.7	Zhodnocení experimentu	44
3.3	Ověření pevnosti metodou MKP	45
3.4	Výroba modelu	48
3.4.1	Tiskárna Anycubic I3 Mega	48
3.4.2	Příprava programů pro 3D tisk	49
3.4.3	Příprava tiskárny před tiskem	51
3.4.4	Postprocessing	53
3.5	Technicko ekonomické zhodnocení	58

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

ÚVOD

Aditivní metody jsou jednou z nejrychleji se rozvíjejících oblastí současnosti. Princip spočívá v nanášení tenkých vrstev materiálu na sebe, z nichž vznikne výsledný model. Metoda 3D tisku FDM neboli fused deposition moulding spočívá v natavování tenkého plastového drátu a nanášení vrstev na vyhřátou podložku. Metoda byla vytvořena k rychlé tvorbě prototypů bez nutnosti výroby forem, ale stále více se začíná již využívat i pro výrobu finálních součástí zejména pro kusovou případně malosériovou výrobu. Metoda je výhodná zejména kvůli téměř nulového odpadu v porovnání například s třískovým obráběním což je příznivé z hlediska ekonomického i ekologického a také z hlediska rychlosti realizace výroby, která je v porovnání s ostatními metodami výroby o poznání rychlejší. Své výhody ukázal FDM 3D tisk např. při vlně SARS COV-19, kdy za pomoci 3D tiskáren běžných občanů byly tisknuty ochranné štíty pro zdravotníky, nebo například při sériové výrobě FDM 3D tiskáren metodou REP-RAP. Mezi nevýhody FDM 3D tisknutých dílů patří zejména menší mechanická a tepelná odolnost, a také degradace při vystavení povětrnostním vlivům a UV záření. Tyto nevýhody lze částečně eliminovat vhodnou volbou materiálu pro 3D tisk. Další nevýhodou je dlouhá doba tisku výrobku, což se dá při sériové výrobě eliminovat tiskem na více tiskárnách současně.

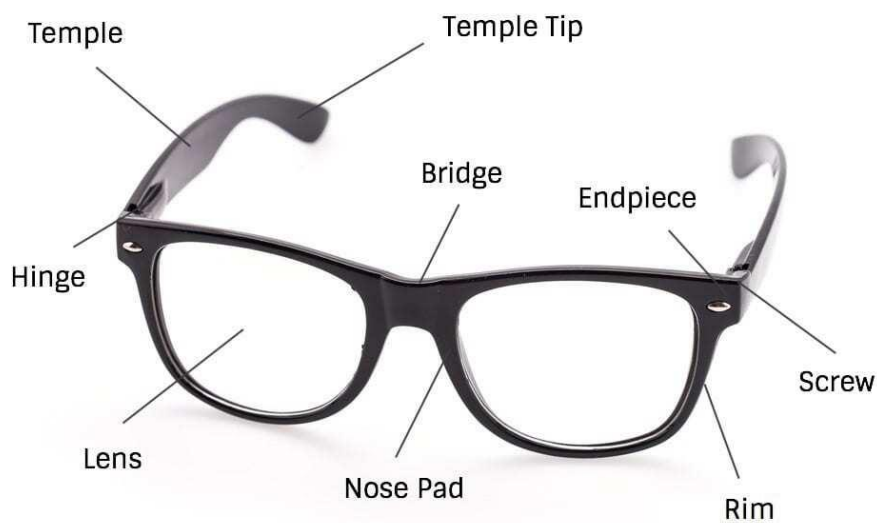
Hlavním důvodem této práce je vytvoření specifických slunečních brýlí, které budou obsahovat štítky s nápisy. Brýle budou mít různé barevné varianty každé komponenty a také text a barva štítků bude na každých brýlích specifická. Z tohoto hlediska by bylo finančně velmi nákladné vyrábět sluneční brýle klasickou metodou vstřikováním plastů kvůli nutnosti specifické formy na každý odlišný díl slunečních brýlí. Tato práce má odhalit, zda lze tyto sluneční brýle vyrobit metodou 3D FDM tisku s podobnými vlastnostmi jako u slunečních brýlí vyrobených běžnou metodou.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Sluneční brýle se liší v několika parametrech jako například tvar a materiál sklíček, pantů, obrouček a paliček.

1.1 Sluneční brýle

Sluneční brýle jsou tvořeny sklíčky vyrobenými z tvrzeného skla, nebo polymeru, upevněnými v obroučkách. Obroučky obsahují panty, na kterých jsou upevněny paličky. Panty jsou tvořeny buď samostatným kovovým mechanismem vlepeným, nebo vtaveným do obrouček a paliček, případně jsou součástí paličky, obrouček a sešroubovány šroubem. Některé sluneční brýle obsahují výměnné nosní polštářky, jiné mají nosní oporu tvořenou přímo obroučkami.[1]



Obr. 1 Komponenty brýlí [2].

1.2 Typy slunečních brýlí

Sluneční brýle se dělí na několik podskupin záviselých na designu a způsobu použití.

1.2.1 Cestovní brýle (Wayfarers)

Dizajn je vytvořený společností Ray-Ban v 50. letech minulého století a je stále velmi populární. Brýle mají silné rámy obvykle vyrobené z plastu. Jsou podobné čtvercovým ráům, ale dno je zakřivené a tvoří obrácený lichoběžník.[3]



Obr. 2 Ukázka slunečních brýlí typu Wayfarers [4]

1.2.2 Pilotky (Aviators)

Design je původně vytvořený v roce 1935 pro vojenské piloty, ale brýle přešly velmi rychle do módy a popularita vydržela dodnes. Design má tvar slzy a celokovový rám. Ojediněle se vyrábí rám i z plastu. Brýle poskytují velmi dobré zorné pole a vynikající ochranu očí.[3]



Obr. 3 Ukázka slunečních brýlí typu Aviator [5]

1.2.3 Sluneční brýle Browline

Brýle získaly svůj název podle svého tlustého horního rámu, který se táhne podél obočí. Dolní část obrouček je tvořena velmi tenkými ráfky. Brýle byly navrženy v 50. až 60. letech minulého století a stále jsou populární.[3]



Obr. 4 Ukázka slunečních brýlí typu Browline[6]

1.2.4 Čtvercové sluneční brýle

Brýle nejsou plně čtvercové, ale mají zaoblené rohy ve spodní části. Vyrábí se v různých velikostech a stylech. Obroučky i paličky jsou většinou tvořeny plastovým rámem.[3]



Obr. 5 Ukázka čtvercových slunečních brýlí [7]

1.2.5 Kulaté sluneční brýle

Kulaté sluneční brýle se staly velkou oblibou spolu s kapelou Beatles, z toho důvodu jsou lidově označovány názvem „Lenonky“. Stále jsou velmi populární zejména pro návštěvníky festivalů. Obroučky jsou tvořeny kovovým, nebo plastovým kulatým rámem a paličky mohou být buď kovové s platovým či gumovým zakončením, případně plastové.[3]



Obr. 6 Ukázka kulatých slunečních brýlí [8]

1.2.6 Sluneční brýle Wrap-Around

Sluneční brýle funkcionalistického stylu. Brýle jsou navinuty okolo očí tak, že obroučky propouští okolo jen minimum UV záření. Brýle jsou velmi populární u sportovců, zejména cyklistů se značkou Oakley. Brýle poskytují jedno z největších zorných polí. [3]



Obr. 7 Ukázka slunečních brýlí typu Wrap-Around [9]

1.2.7 Sluneční brýle Shield

Brýle nabízejí nejlepší ochranu očí obrovskými čočkami, které se obepínají okolo přední a boční strany. Rám brýlí může být v různých variantách buď celý z plastu, případně část rámu tvoří samotné čočky. Paličky mohou být jak kovové, tak i plastové.[3]



Obr. 8 Ukázka slunečních brýlí typu Shield [10]

1.3 Aktuální výrobní technologie slunečních brýlí

Součásti brýlí jsou vyráběny různými technologiemi v závislosti na ceně, možnosti přizpůsobení na míru a výsledné kvalitě brýlí. Každá součást může být vyráběna odlišnými metodami výroby.[11]

1.3.1 CNC Frézování

Mnoho prémiových slunečních brýlí je vyráběno pomocí CNC Frézování. To umožňuje přizpůsobení obrouček na míru. Obroučky jsou obrobena z tabule acetátu pryskyřice a následně vyhlazeny za pomoci zařízení pro vyhlazení. [12]

1.3.2 Prostřihování za pomoci matric, frézování drážek

Nejvíce rozšířenou metodou levné výroby obrouček slunečních brýlí je proces prostřihování. Tabule acetátu celulózy je v peci ohřata na teplotu, při které je materiál tvárný. Do ohřátého materiálu je následně zatlačena ocelová matrice, která prostřihne a vytvaruje obroučky. Drážky v obroučkách jsou vyrobeny CNC frézováním na specializovaném pracovišti a výsledné obroučky jsou následně vyhlazeny za pomoci zařízení pro vyhlazení, případně lakovány. [12]

Obdobně je tomu tak i při výrobě paliček slunečních brýlí. Tabule acetátu celulózy je v peci ohřata na teplotu, při které je materiál tvárný a následně je do tabule zatlačena ocelová matrice, která prostřihne a vytvaruje paličky brýlí. Následně jsou do paliček vyříznuty šterbiny pro umístění pantů, do kterých se vtaví zahřáté panty. Výsledná paličky jsou následně vyhlazeny za pomoci vyhlazovacích zařízení, případně ještě i lakovány. [12]

1.3.3 Vstřikováním termoplastu do kovové formy

Velké množství slunečních brýlí se vyrábí tlakovým vstřikováním termoplastů. Metoda je vhodná pro velkosériovou až masovou výrobu levných slunečních brýlí. Granulát termoplastu je roztaven a pod vysokým tlakem vstříknut do kovové formy. Po ochlazení je komponenta opracována od vtoků a výtoků a případně povrchově upravena případně lakována.[12]

1.3.4 Pájením, případně svařováním

Mnoho kovových rámců brýlí je tvořeno vytvarovaným tenkým profilem, který je k sobě spojen pájením, případně svařováním. [12]

1.3.5 Alternativní metody – 3D tisk

3D tisk je využíván zřídka zejména pro výrobu obrouček dioptrických brýlí na míru. Moderní metoda MJF na tiskárnách HP Multijet Fusion technology dosahuje dostatečné přesnosti tisku, pevnosti a rychlosti tisku. [13]

HP Multijet Fusion technology

Tato metoda využívá plastového prášku, který je nanášen ve vrstvách na podložku a následně selektivně vytvrzován za pomoci roztoku a působení tepla. Metoda umožňuje volné rozmístění modelů v prostoru bez použití podpor. Podporou je v tomto případě samotný prášek. Po vytištění je samotný prášek odsán a zůstanou jen hotové modely. Metoda je relativně rychlá a je využívána k masové produkci obrouček dioptrických brýlí na míru [13], případně ojedinele i pro výrobu komponent slunečních brýlí. [14]

2 TECHNOLOGIE VÝROBY

2.1 Možné varianty technologií 3D tisku slunečních brýlí

2.1.1 MJM 3D tisk

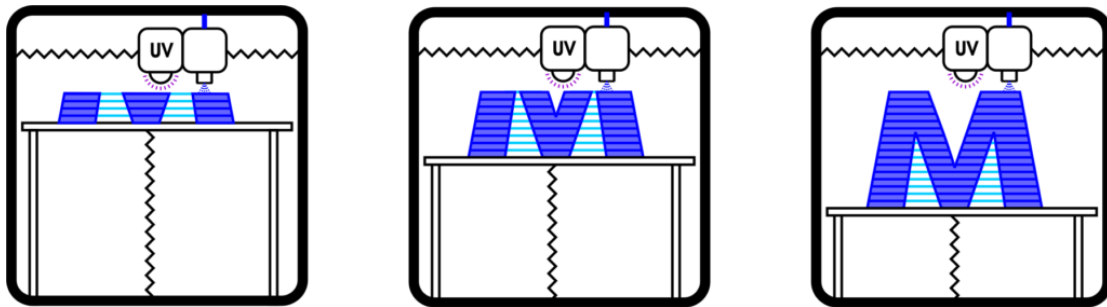
Multijet printig je vysoce kvalitní 3D tisk, který využívá UV světla k vytvrzování fotopolymery. Při procesu tisku dochází k rozstříku drobných kapiček fotopolymery na tiskovou desku. UV lampa vytvrzuje nanesené vrstvy fotopolymery. Po dokončení jedné vrstvy se tisková podložka posune o úroveň níž. Tento proces se opakuje, dokud se nevytiskne celý díl. Oproti SL (laser sintering) metodám má výtisk z metody MJM nižší množství porozity a hladší povrch. Díky tomu je doba výroby zkrácena oproti SL metodám o čas potřebný k dokončovacím operacím. [15]

Výhody:[15]

- Vysoká přesnost tisku
- Odolnost výrobku vůči teplotě
- Hladký povrch

Nevýhody: [15]

- Nízká pevnost
- Nutnost postprocessingu
- Vysoká cena 3D tiskárny



Obr. 9 Schéma MJM tisku [16].

2.1.2 LOM 3D tisk

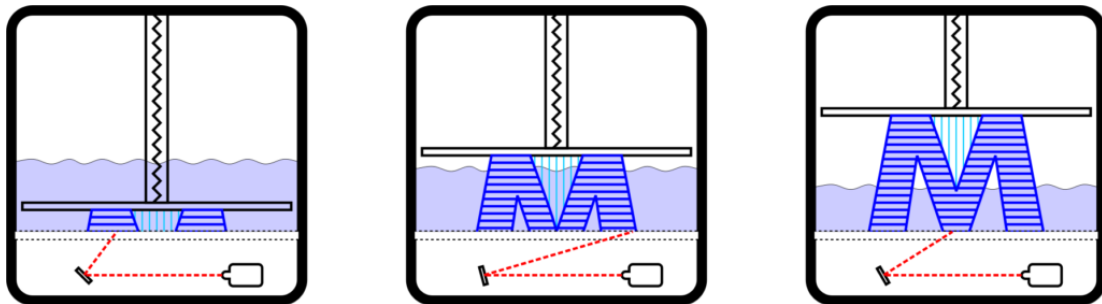
Laminated Object Manufacturing – metoda založená na vyřezávání jednotlivých vrstev laserem či nožem, které jsou následně spékány či lepeny. Výhodou je univerzálnost použití materiálů. Nejčastěji se používá papírů, plastů nebo kovových plechů. LOM se díky své rychlosti a nízké ceně využívá pro výrobu prototypů ale i finálních součástí. [17, 88]

Výhody:[17]

- Cena výtisku

Nevýhody: [17]

- Nízká pevnost
- Vysoká cena 3D tiskárny

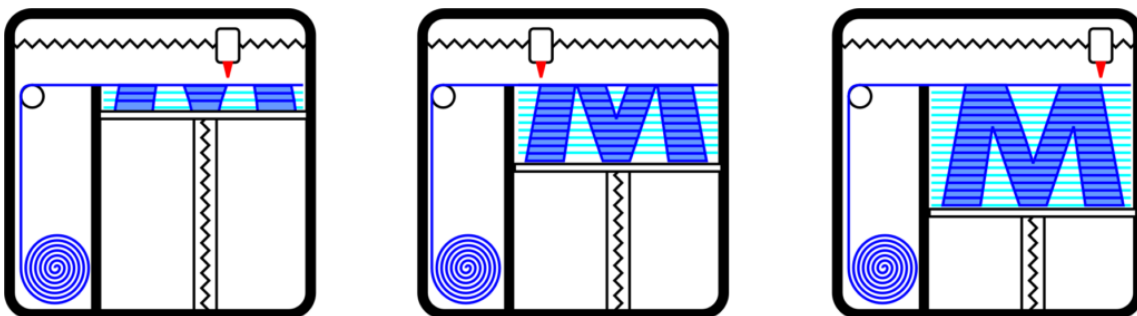


Obr. 10 Schéma LOM tisku [19].

2.1.3 SLA 3D tisk

Stereolitografický (SLA) 3D tisk je metoda, založena na principu vytvrzování tekuté pryskyřice pomocí světelného paprsku (např. laser). Jedná se o technologii 3D tisku s nejlepší kvalitou povrchu a nejlepším provedením detailů. SLA metoda využívá několik různých provedení pryskyřice (standartní, zubařská atd.). SLA metoda 3D tisku je první vyvinutá metoda 3D tisku na světě. Díky vysoké kvalitě povrchu je často SLA využíváno k výrobě prototypů. [18, 19]

- | | |
|---|--|
| <p>Výhody:[18]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vysoká přesnost tisku • Odolnost výrobku vůči teplotě | <p>Nevýhody: [18]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nízká pevnost • Nutnost postprocessingu • Cena |
|---|--|

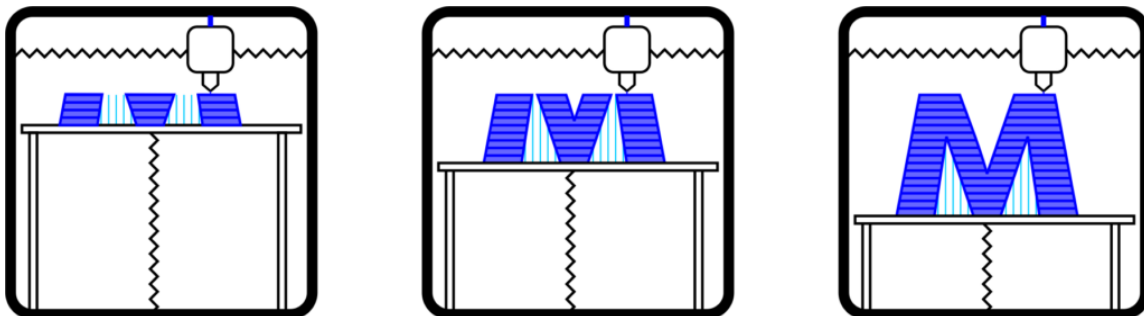


Obr. 11 Schéma SLA tisku [20].

2.1.4 FFD/FFF 3D tisk

Je metoda výroby součástí aditivním nanášením jednotlivých vrstev materiálu na sebe. K tavení materiálu dochází většinou těsně za hranicí tání tištěného materiálu. Po natavení materiálu z tiskové hlavy přenáší na tiskovou strunu podložku a zde tvoří obrys výtisku. Tisk probíhá protlačováním filamentu přes horkou trysku. Těsně po nanesení materiálu na podložku materiál vlivem ochlazení ztuhne. Po dokončení jedné vrstvy obrysu a výplně se tisková hlava posouvá o úroveň výš, kde nanáší další požadovaný tvar a jeho výplň. Tímto postupným nanášením jednotlivých vrstev dojde k postupnému vytvoření požadované součásti. FDM (fused deposit modeling) se v roce 1991 stal ochranou známkou společnosti Stratasys. Proto se pro tuto metodu využívá také název FFF (fused filament fabrication). FDM / FFF je v dnešní době považován za nejjednodušší způsob výroby součástí metodou 3D tisku. [18, 21]

- | | |
|---|---|
| <p>Výhody:[18]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nízká cena tiskárny • Nízká cena výtisku • Vysoká pevnost • Jednoduchá výměna barvy materiálu | <p>Nevýhody: [18]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hrubší povrch • Horší přesnost tisku |
|---|---|

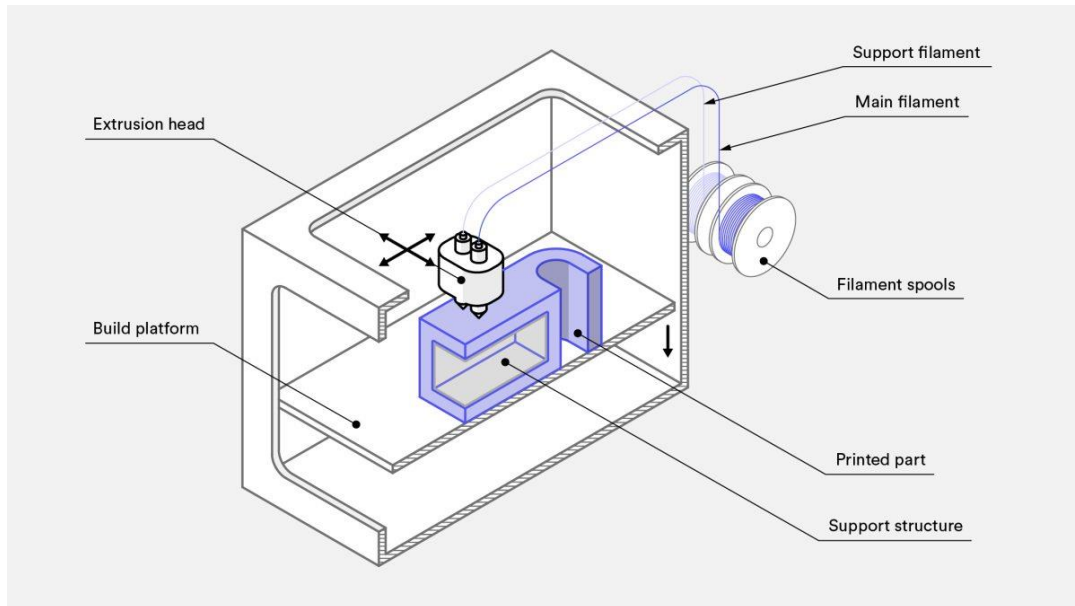


Obr. 12 Schéma FFF tisku [22].

2.1.5 FFD/FDM 3D tisk

FDM (Fused deposition modeling nebo FFF - Fused Filament Fabrication) je technologie 3D tisku patentovaná značkou Stratasys. V podstatě se jedná o podobnou metodu s drobnými odlišnostmi jako FFF, jen ostatní výrobci nesmí používat ochrannou známku FDM vlastněnou společností Stratasys. Lidově se využívá označení FDM u většiny FFF tiskáren. Součástí tiskáren Stratasys je temperovaná skříň viz obr. 13 [18, 23]

- | | |
|--|--|
| <p>Výhody:[23]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nízká cena výtisku • Široké spektrum barev • Vysoká pevnost | <p>Nevýhody:[23]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nízká tepelná odolnost • Hrubší povrch • Horší přesnost tisku • Vysoká cena tiskárny |
|--|--|



Obr. 13 Schéma FFD/FDM tisku [24].

2.1.6 MJF 3D tisk

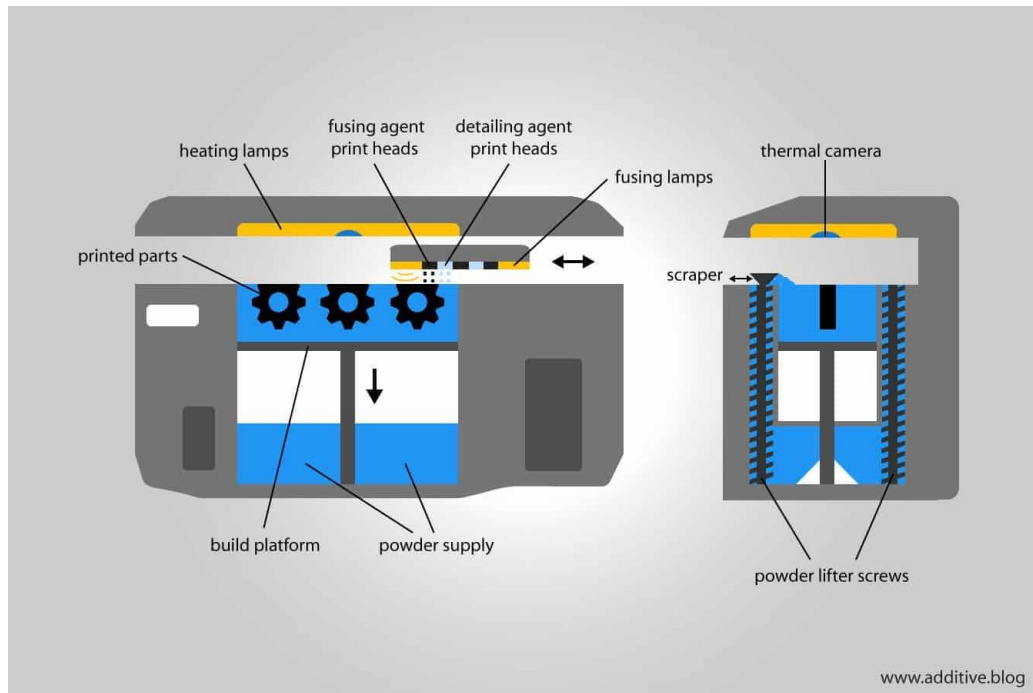
Metoda je založena na velmi přesném a rychlém nanášení stavebního materiálu a speciálních roztoků a následné interakci s teplotou. Tisk každé vrstvy je konstantní bez ohledu na velikost tištěného modelu. Stavební prostor o velikosti 380 x 284 x 380 mm se vytiskne na HP Jet Fusion 5200 za 9,5 hodiny [18, 25]

Výhody:[25]

- Tisk více volně rozmístěných modelů bez nutnosti podpor
- Přijatelná cena výtisku
- Vysoká přesnost tisku
- Vysoká pevnost
- Relativně vysoká rychlost tisku více modelů současně

Nevýhody: [25]

- Velmi vysoká pořizovací cena zařízení
- Nutnost tisku více modelů současně



Obr. 14 Schéma MJF tisku [26].

2.2 Zhodnocení možných metod 3D tisku.

Jako nejvhodnější metoda tisku byla vybrána metoda FFD/FFF kvůli možnosti tisku barevných materiálů a snadné výměně barvy materiálu, jelikož bude výsledný produkt ve více barevných variacích a na štítcích bude třeba tisku dvou různých barev. Dále kvůli nízké ceně výtisku, samotné tiskárny a dobrým mechanickým vlastnostem tištěného modelu. Oproti metodě FFD/FFF dosahuje také lehce větší pevnosti a přesnosti modelu. Možnou metodou je i metoda HP Multijet Fusion v kombinaci s metodou FFD/FDM pro tisk štítků, nicméně vzhledem k pořizovací ceně tiskárny HP není metoda pro nízkorozpočtový projekt s produkcí desítek kusů ročně vyhovující.

2.3 Tiskárny FFD/FDM-FFF

2.3.1 FFD/FFF tiskárna s kartézským systémem

Jedná se o nejpoužívanější typ tiskárny. Využívá pohybu tří os (X,Y,Z). Ve směru osy X a Y se většinou pohybuje tisková hlava a ve směru osy Z se pohybuje tisková deska. Velmi rozšířená metoda na poli amatérského tisku díky jednoduchosti a nízké pořizovací ceně (základní modely jsou sehnatelné již od 4000 Kč a dosahují uspokojivých výsledků tisku). Tato metoda se lidově označuje jako FDM, nicméně tuto zkratku má patentovanou společnost Stratasys a ostatní výrobci ji proto nesmí používat.[27]

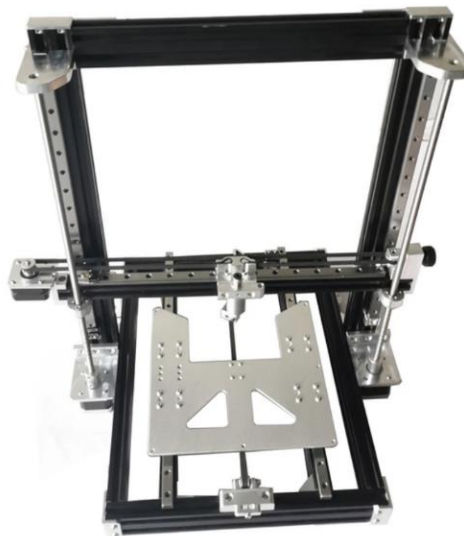
Výrobci:

Prusa Research, Creality – Ender, Anycubic, MakerBot, Kywoo, Bambu Lab

Rozbor částí tiskárny

Rám

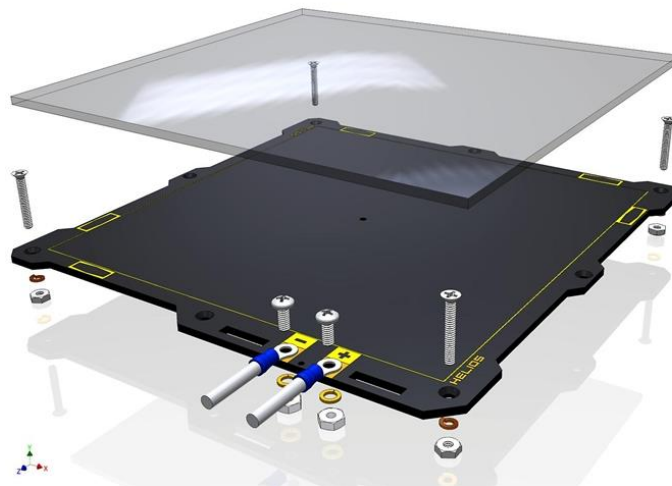
V rámu tiskárny jsou umístěny veškeré komponenty tiskárny. U některých typů tiskárny může být samotný rám tiskárny tvořen vodícími tyčemi jednotlivých os tiskárny. Využívaným materiálem bývají často hliníkové profily, ocelové tyče, ocelové plechy často spojené i 3D tištěnými díly především u RepRap tiskáren Prusa. Tuhost rámu ovlivňuje výslednou přesnost tiskárny.[27]



Obr. 15 Rám 3D FDM tiskárny [28].

Tisková podložka (Bed)

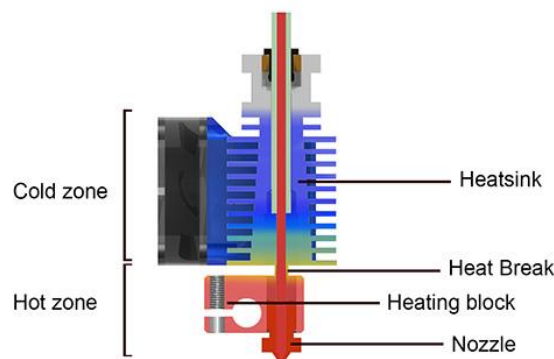
Na tiskovou podložku nanáší hlava tiskárny roztavený materiál. Aby nedocházelo k odlepování výtisku a nadzvedávání hran výtisku vlivem ochlazení a tedy smrštění výtisku, bývá tisková podložka u většiny tiskáren vyhřívaná. Povrch podložky bývá v různých provedeních, často z teplotně odolného plastu, skla či kovu, případně folie, která je sundána po dotisknutí i s modelem. Povrch musí být proveden tak, aby se tištěný model při tisku neodlepoval, ale aby bylo možné po dotisknutí model snadno z podložky odstranit. [27]



Obr. 16 Tisková podložka (bed) [29].

Extruder

Extruder je hlavní komponentou 3D tiskárny. Je tvořen dvěma základními částmi „cool end“ a „hot end“. Cool end je část do které vstupuje materiál a jeho úkolem je přivádění materiálu do hot endu. Bývá v provedení s přímým pohonem a s pohonem v bowdenu. Hot end je tvořen vyhřívanými tělísky, termistorem a samotnou tryskou. [27]



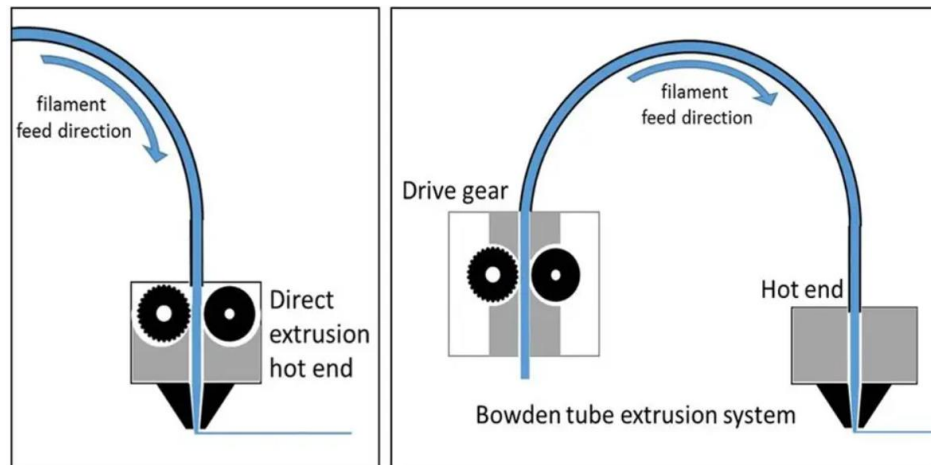
Obr. 17 Extruder [30].

Přímý pohon a pohon bowdenem

Přímý pohon – Cool end a hot end jsou v jednom bloku a filament jde přímo z cool endu do hot endu.

Pohon bowdenem – Cool end a hot end jsou odděleny a spojeny bowdenem. Velkou výhodou je, že cool end tvořený těžkým krokovým motorkem je oddělen od tiskové hlavy a nepohybuje se tedy spolu s tiskovou hlavou. Snížená hmotnost tiskové hlavy umožňuje větší rychlost tisku a minimalizuje rázy, které se přenáší při pohybu tiskové hlavy do rámu tiskárny a zhoršují

přesnost tisku. Nevýhodou je mírně menší přesnost podávání materiálu díky pružnosti filamentu v bowdenu což může zhoršit přesnost tisku zejména při použití retrakce.[27]



Obr. 18 Přímý a nepřímý pohon [31].

Hotend chladič, ventilátor – Úkolem chladiče je zajistit, aby se materiál neroztavil dřív, než doputuje k trysce, což by mohlo způsobit ucpání extruderu.[27]

Podávací kolečka – slouží k pohybu materiálu a tlačí jej do hot endu. [27]

Topné těleso - ohřívá trysku, ve které se taví materiál [27]

Termistor – bývá umístěn v topném tělesu a slouží jako senzor teploty[27]

Tryska – Poslední část soustavy extruderu, ze které vytéká materiál na podložku. Vyrábí se v několika průměrech (0.1; 0.2 ;0.3 ;0.4 ;0.8mm...) a z různých materiálu (mosaz, ocel, titan) s ohledem na životnost a použitý typ filamentu. Při volbě podmínek tisku je třeba brát v potaz pravidlo, že výška tisku by neměla přesahovat 80% průměru trysky. [27]

Ventilátor tištěné vrstvy – Slouží k chlazení materiálu naneseného na tiskovou podložku pro udržení tisknutého tvaru. [27]

Endostop spínače – každá osa tisku obsahuje endostop spínače na začátku a na konci díky kterým se určí, kde se nachází poloha tisku. [27]

Vodící šrouby – slouží k pohybu tiskové hlavy obvykle ve směru osy Z[27]

Řemenový pohon – řemenem je poháněn většinou pohyb ve směru osy X a Y[27]

Krokové motory – slouží k pohybu ve směru os X, Y, Z a k vtlačování filamentu do extruderu. Zajišťují přesný pohyb většinou ve 200 krocích na otáčku. [27]

Elektrické komponenty – zdroj, základní deska, řídicí monitor, datový vstup[27]

Skříň – Je součástí jen některých tiskáren typu FFF. U FDM tiskáren Stratasys je součástí již v základu. Je tvořena samotnou skříní a ventilátory spolu s topnými tělisky napojenými na čidla teploty. Slouží k regulaci a udržení konstantní teploty. Naprosto zásadní při tisku ABS, kdy i při menší změně teploty dochází k velkému smrštění modelu a dochází tak k oddělování jednotlivých vrstev. [27]



Obr. 19 Temperovaná tisková skříň [32].

2.3.2 3D tiskárna typu delta

Tiskárna typu delta využívá také kartézský souřadnicový systém, rozdíl je však ve způsobu zajištění pohybu v jednotlivých osách. Pohyb tiskové hlavy je zajištěn třemi rameny připojenými k vertikálním pojezdům. Tisková podložka se nehýbe. Díky nehybné podložce dosahuje metoda lepších přesností při tisku vysokých součástí. [33]



Obr. 20 Tiskárna typu delta [34].

Výrobci:

TriLab, Anycubic, Flsun

Výhody: [33]

- vysoká rychlost tisku
- možnost tisku vysokých modelů

Nevýhody: [33]

- složité opravy
- vyšší pořizovací cena
- přesnost závislá na poloze tiskové hlavy

2.4 Materiál využívaný při metodách FFF, FDM

Při výrobě metodou FDM, FFF lze použít širokou škálu materiálů. Běžně používané termoplasty mohou být plněny například drceným dřevem, sklem, případně kovovými pilinami. [35]

2.4.1 PLA

Nejvíce rozšířeným materiálem pro tuto metodu je PLA. Díky velké rozšířenosti je možné materiál koupit v různých škálách odstínů barev a s obsahem různých příměsí jako například dřevěné piliny (Woodfil), skleněný prášek a kovové piliny. Materiál se na rozdíl od většiny ostatních materiálů nevyrábí z ropy, ale z kukuřičného škrobu nebo cukrové třtiny. Má velmi podobné vlastnosti jako většina ostatních používaných materiálů. Velmi rozšířený zejména kvůli velmi dobrým tiskovým vlastnostem a nízké pořizovací ceně. Nevýhodou je nižší pevnost.[36]

Tiskové vlastnosti (mírně se liší u jednotlivých výrobců):[26]

Teplota extruderu: 150-210°C

Teplota podložky: 0-60°C

2.4.2 PET-G

PET (polyethylentereftalát) je nejrozšířenějším plastovým materiálem na světě. Označení PET-G je z důvodů přidání glykolu kvůli snazšímu tisku. Hlavními výhodami je vysoká houževnatost, pružnost, malá tepelná roztažnost a vyšší tepelná odolnost. PET-G je odolný vůči mnoha chemikáliím, včetně některých rozpouštědel a kyselin. To z něj činí vhodný materiál pro aplikace, které vyžadují odolnost vůči chemickým látkám. Materiál je v základní formě transparentní, ale díky příměsím je dostupný v mnoha barvách i v téměř netransparentní formě.

Materiál není vhodný pro tisk malých modelů, velmi špatně se z něj odstraňují podpory a je náchylný ke stringování. Naopak je vhodný pro tisk větších modelů z důvodu malé tepelné roztažnosti a dobré soudržnosti vrstev[37]

Tiskové vlastnosti (mírně se liší u jednotlivých výrobců):[37]

Teplota extruderu: 210-235°C

Teplota podložky: 45-60°C

2.4.3 ABS

ABS (akrylonitril-butadien-styren) vyniká zejména dobrými mechanickými vlastnostmi a přijatelnou pořizovací cenou. Při správných podmínkách tisku mají vytisknuté modely dobré mechanické vlastnosti a vyšší tepelnou odolnost. Při tisku bez temperované skříně je velmi náchylný ke vzniku takzvaného wrappingu (nadzvednutí rohu výtisku z podložky, nebo předchozí vrstvy a v podstatě nepoužitelný. Další nevýhodou je velká degradace při použití na přímém slunci. Materiál při tisku výrazně zapáchá, proto není vhodný pro tisk v domácích podmínkách. Díky své odolnosti proti opotřebení je ABS vhodný pro výrobu funkčních a prototypových dílů, které budou podrobeny opakovanému používání.

Materiál je vhodný, díky rozpustnosti v acetonu, pro chemické vyhlazování povrchu leptáním[38]

Tiskové vlastnosti (mírně se liší u jednotlivých výrobců):[38]

Teplota extruderu: 220-275°C

Teplota podložky: 100-130°C

2.4.4 ASA

ASA je velmi blízký materiálu ABS. Největším rozdílem je větší odolnost vůči UV záření což umožňuje i venkovní použití a lepší tiskové vlastnosti. Materiál disponuje vysokou pevností, odolností proti vysoké teplotě a dobrými tiskovými vlastnostmi, je vhodný pro mechanicky namáhané díly. Materiál je vhodný stejně jako ABS pro vyhlazení povrchu acetonem, takže je vhodný i pro díly s estetickým důrazem. Nevýhodou je stejně jako u ABS silný zápach při tisku a je tedy nevhodný pro tisk v domácích podmínkách. [39]

Tiskové vlastnosti (mírně se liší u jednotlivých výrobců):[39]

Teplota extruderu: 250-260°C

Teplota podložky: 60-110°C

2.4.5 Nylon

Nylon dosahuje velmi dobré houževnatosti a odolnosti. Nylon je elastický materiál, který nabízí určitou míru pružnosti. To umožňuje tisknout objekty s flexibilními částmi nebo pružnými středy. Materiál vyniká nízkým součinitelem tření, takže je vhodný pro součásti s funkčním použitím. Velkou nevýhodou materiálu je velká hygroskopičnost což je schopnost absorbovat velké množství vlhkosti, která zhoršuje mechanické vlastnosti a kvalitu tisku, proto je třeba materiál skladovat v odvlhčovacích zařízeních. Další nevýhodou je vyšší pořizovací cena materiálu. Materiál je velmi náchylný ke stringování a není tedy vhodný pro tiskárny s nepřímým vedením filamentu [40]

Tiskové vlastnosti (mírně se liší u jednotlivých výrobců):[40]

Teplota extruderu: 235-260°C

Teplota podložky: 100-130°C

2.5 Programy pro 3D tisk

Pro vytvoření tiskového souboru čitelného 3D tiskárnou je třeba programu zvaného „Slicer“, který vyexportovaný STL soubor z modelovacího programu převede, po nastavení tiskových podmínek, na soubor čitelný 3D tiskárnou. V programu je třeba nastavit mnoho parametrů závislých na druhu a výrobci materiálu, tvaru a funkci modelu, typu tiskárny viz kapitola 2.6 [41]

2.5.1 Ultimaker Cura

Open source software, který je velmi intuitivní, přehledný a disponuje velkou škálou nastavení. Jeden z nejvíce rozšířených softwarů pro nastavení 3D tisku. [41]

2.5.2 Prusa Slicer

Velmi rozšířený open source software zejména u uživatelů tiskáren Prusa. Software obsahuje většinu potřebných nastavení pro kvalitní 3D tisk a je velmi jednoduchý a intuitivní.[41]

2.5.3 Simplify3D

Placený software obsahující oproti freewarovým softwarům i pokročilou úpravu podpor a propracované nástroje pro práci s více extrudery. Software má možnost instalace širokého spektra add-inů.[41]

2.6 Parametry pro nastavení tisku

2.6.1 Velikost trysky

Velikost trysky ovlivňuje výsledný detail tisku zejména v rovině rovnoběžné s podložkou. Dále velmi ovlivňuje rychlost tisku. [42]



Obr. 21 Trysky základních průměrů [43].

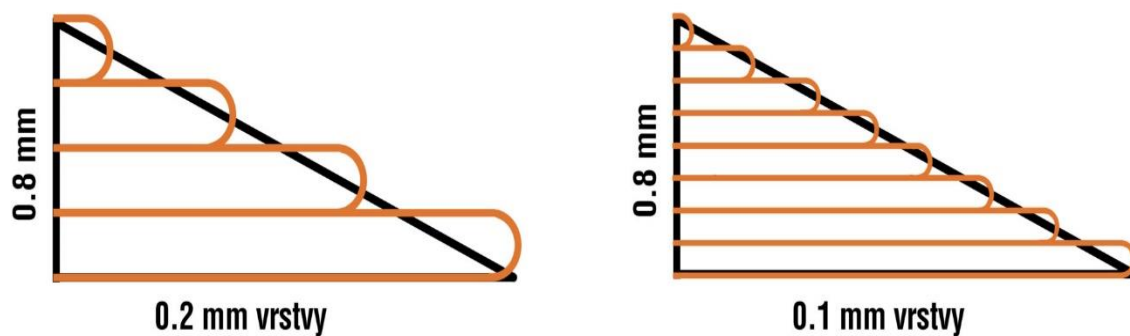
Dalším faktorem je zvýšená odolnost výtisku při použití větší trysky. Výtisk tisknutý tryskou 0,6mm dosahuje až o 25.6% větší rázové houževnatosti než výtisk tisknutý tryskou 0,4mm. [44]

2.6.2 Výška vrstvy tisku

Výška vrstvy je implicitním parametrem ve všech procesech 3D tisku. Geometrie je generována v rovině X, Y a vytahována podél osy Z. Vytahování podél osy Z probíhá po vrstvách, jejichž výšku je třeba předem nastavit. [45]

Úprava výšky vrstvy ovlivňuje dva hlavní faktory, kvalitu tisku a rychlost tisku. Menší vrstva tisku dokáže lépe vykreslit detail ve směru osy Z, ale negativně ovlivní dobu tisku. [45]

Platí pravidlo, že výška tisknuté vrstvy by neměla přesahovat 80% průměru trysky. Při použití nejvíce využívané trysky 0.4mm by tedy výška tisknuté vrstvy neměla přesahovat 0.32mm. Naopak za výšku pro dosažení vysoké kvality se u trysky 0.4mm považuje výška vrstvy 0.1mm. [45]



Obr. 22 Vliv výšky vrstvy na kvalitu modelu [46].

2.6.3 Tisková rychlost

Rychlost tisku se volí na základě použitého materiálu, průměru trysky, rozměru výtisku, požadované kvality a možnostech a tuhosti tiskárny. U větších modelů se volí větší rychlost tisku z důvodu delších drah tisku s neměnným vektorem. U malého modelu rychlost tisku zásadně nemění čas tisku jako u velkého modelu. U tiskáren s tužším rámem a lehčím extruderem je možné navolit vyšší rychlost tisku, u levnějších a méně tuhých tiskáren má vyšší rychlost tisku za následek zhoršenou kvalitu tisku způsobenou vibracemi, rázy a pohybem celé konstrukce tiskárny. [47]

2.6.4 Teplota tisku

Teplota závisí na typu materiálu a na konkrétním výrobci materiálu. Každý výrobce uvádí vlastní požadované teploty tisku. Teploty jsou uváděny v rozmezí a je třeba pro každou tiskárnu a vlastnosti modelu zvolit optimální teplotu. Vyšší hodnota z uvedeného rozsahu ovlivní pozitivně pevnost tisknutého modelu, ale může zhoršit přesnost tisku. Při nižší teplotě bude model přesnější, ale méně pevný kvůli nedostatečnému spečení jednotlivých vrstev tisku.[47]

Jsou voleny hned 3 teploty pro tisk:

Teplota tiskové hlavy

Teplota tiskové hlavy je vyvozená z teploty tavení daného materiálu. Pohybuje se v rozmezí cca 120-400 °C a je pro každý materiál daná výrobcem. [47]

Teplota vyhřívání podložky

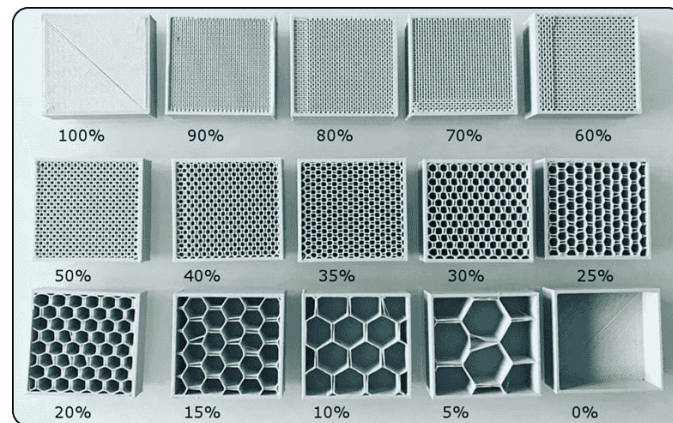
Teplota vyhřívání podložky ovlivňuje zejména přilnutí modelu k tiskové podložce a zmiňuje napětí mezi tiskovými vrstvami způsobeným změnou teploty mezi vrstvami tisku. Teplota podložky bývá také udávána výrobcem materiálu.[47]

Teplota vzduchu v tiskové skříni (pokud tiskárna obsahuje temperovanou tiskovou skříň)

Teplota vzduchu v tiskové skříni ovlivňuje zejména pnutí mezi jednotlivými vrstvami tisku. Nejvíce ovlivňuje materiály s vysokou tepelnou roztažností jakým je třeba ABS, které bez temperované skříně není prakticky možné v dobré kvalitě tisknout.[47]

2.6.5 Shells a hustota výplně (infill)

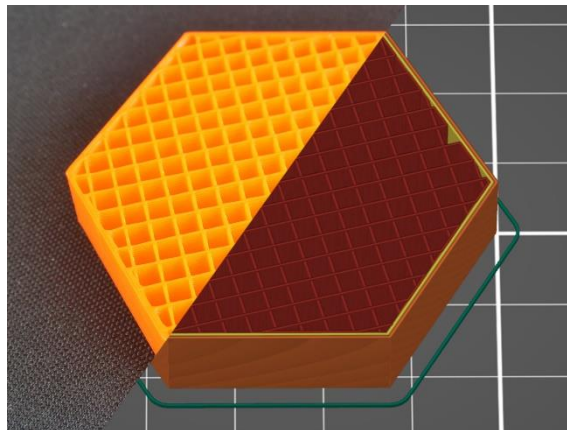
Hustota výplně je využívána zejména k úspoře materiálu, hmotnosti modelu a času tisku. Shells udává tloušťky stěn, spodní vrstvy, horní vrstvy a stěny výplně. Hodnota infill lze měnit od hodnoty 0% po 100% a udává poměr výplně k prázdné části. Je třeba brát v potaz funkci modelu a podle ní navolit vhodný infill. Obvyklý infill pro úsporu času a materiálu bývá obvykle 20%. [47]



Obr. 23 Hustota výplně [49].

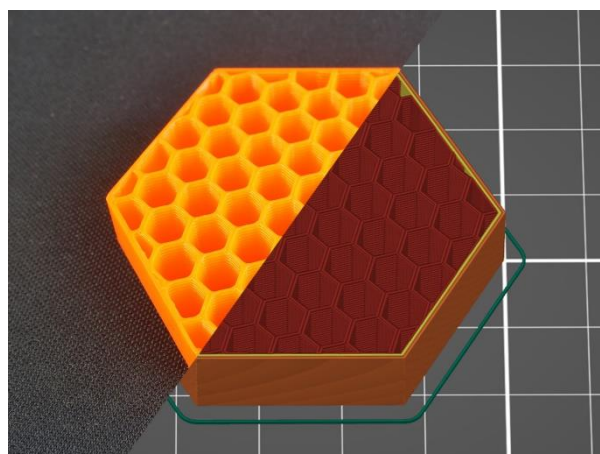
Druhy výplně

Mřížka – Jedna z nejrychleji tisknutelných výplní. Nevýhodou je křížení cest ve struktuře což může mít za následek zničení modelu při tisku.[47]



Obr. 24 Výplň typu mřížka [50].

Honeycomb – Velkou výhodou je odolnost součásti. Při tisku nedochází k překrytí vrstev. Nevýhodou je větší spotřeba materiálu.[47]



Obr. 25 Výplň typu honeycomb [51].

2.7 Post processing

Většina součástí vyrobená 3D tiskem vyžaduje po vytištění dokončovací operace. Jedná se zejména o odstranění otřepů, podpor a povrchové úpravy. [47]

Odstranění podpor

Podpory slouží u modelu k tisku vrstvy, pod kterou se nenachází žádný materiál. Vyhotovují se buď ze stejného materiálu, nebo z takzvaného vymyvateľného materiálu, který se rozpustí po vytištění chemicky buď vodou nebo lemonsalem. Na tisk podpor z odlišného materiálu oproti modelu je třeba tiskárny se dvěma extrudery. Podpory ze stejného materiálu jsou z modelu vylamovány. Pokud jsou umístěny ve špatně dostupných místech, může být odstranění velmi náročné. Snadnost odstranění ovlivňuje také teplota tisku. Při vysoké teplotě se mohou podpory spéct s modelem jejich odstranění je potom velmi obtížné a může vést i k destrukci modelu.[48]

Broušení

Nejčastější povrchovou úpravou po 3D tisku je broušení. Začíná se brusným papírem s nízkou zrnitostí a postupuje se k zrnitosti vyšší. Při broušení je třeba postupovat pomalu, jelikož při broušení vzniká velké množství tepla, které může povrch modelu natavit a vytvořit nehezký povrch.[48]

Vyhlazování acetonem

Tato metoda je dostupná zejména pro materiál ABS z důvodu rozpustnosti v acetonu.

Vytištěný model se vloží do uzavřené nádoby, kde je vystaven výparům acetonu. Výpary acetonu reagují s povrchovou vrstvou modelu a natavením (rozpuštěním) ji vyhlazují. Výsledkem je lesklý vzhled.[48]



Obr. 26 Výtisk po vyhlazení Acetonem [52].

Tepelné zpracování

Žíhání po 3D tisku by mělo mít za následek zmírnění vnitřního pnutí mezi jednotlivými vrstvami vzniklého chladnutím vrstev. Tomuto tématu bude věnována kapitola 3.5, kde bude proveden experimentální ověření vlastností žíháných vzorků PLA při tahové zkoušce. [53]

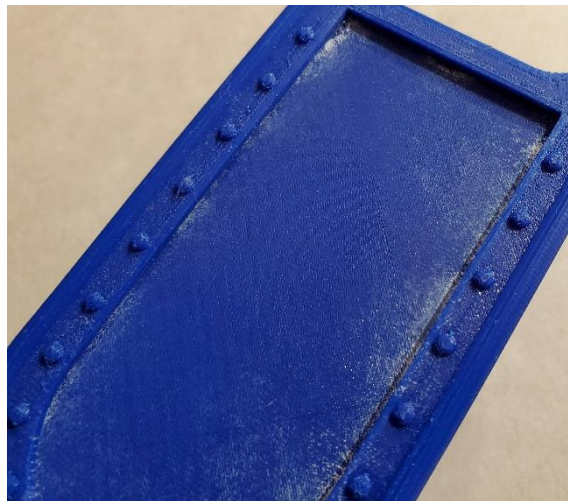
Lepení

Umožňuje spojovat širokou škálu materiálů. Využívá se pro tvorbu velkých součástí, které se nedají vytisknout v jednom kuse. Dále se využívá na spojování různorodých materiálů.[48]

Lepidla využívaná pro lepení 3D tištěných součástí se dělí na následující kategorie:[48]

Kyanoakryláty:

Fungují na bázi ethyl-kyanakrylátu a příbuzných látek. Proces polymerizace se spouští při aktivaci s vodou, postačí vzdušná vlhkost. Lepidla na této bázi vytvrzují velmi rychle, proto jsou lidově označovány jako „vteřinové lepidlo“. Jsou vhodné pro všechny typy 3D tištěných materiálů (PLA, PETG, ASA/ABS, SLA resin, atd.). Při zasychání zanechává lepidlo na okolí spoje bělavou vrstvu a vrásčitý povrch viz obr. 20. Kyanoakryláty vykazují velmi vysokou pevnost při namáhání tahem, nicméně spoj je křehký a při namáhání ohybem, nebo krutem velmi lehce praská. Tepelná odolnost kyanoakrylátů je při 80°C cca 50% původní hodnoty, není tedy vhodný pro použití u tepelně namáhaných spojů.[48]



Obr. 27 Bělavá vrstva po lepení Kyanoakrylátem [54].

Rozpouštědlová lepidla:

Rozpouštědlová lepidla fungují na principu naleptání součástí, které po odpaření rozpouštědla zůstanou spojeny (svařeny). Doba vytvrzování je delší, je tedy možná manipulace hned po lepení pro přesné ustavení dílu. Nevýhodou je naleptání dílů, které mají tendenci se po přitlačení lehce propadat. Lepidla jsou vhodná na většinu běžně využívaných materiálů s výjimkou PET-G a částečně ASA. Některá rozpouštědlová lepidla se vyznačují svou flexibilitou a jsou tedy vhodné i na pružně namáhané spoje, případně lepení flexibilních materiálů TPE, TPU.[48]

Dvojsložková lepidla

Skládají se ze dvou oddělených složek (pryskyřice a tvrdidlo). Po smíchání obou složek se aktivuje řetězová polymerace. Epoxidy se široce využívají i při postprocessingu jako tmel pro vyplnění spár. Doba vytvrzování závisí na typu lepidla a pohybuje se mezi 90 sekundami a 12 hodinami. Epoxidy se vyznačují svou transparentností a využívají se u spojů, kde je kladen důraz na estetičnost. Lepidla je možné využít na většinu běžně využívaných materiálů. [48]

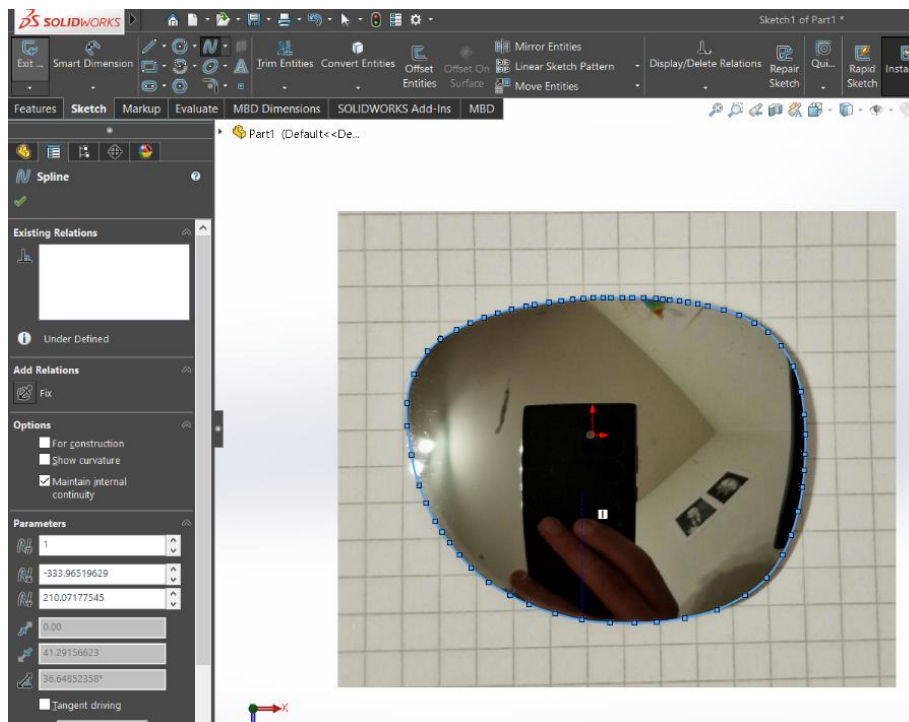
3 VÝROBA SOUČÁSTÍ SLUNEČNÍCH BRÝLÍ

Cílem této práce je výroba slunečních brýlí s mechanickými vlastnostmi obdobnými jako u běžně dostupných sériově vyráběných slunečních brýlí podobné kategorie.

3.1 Tvorba 3D modelu slunečních brýlí

3.1.1 Skenování sklíčka brýlí

Jelikož jsou sklíčka brýlí dodávány externím dodavatelem již ve finálním tvaru a rozměru, pro vytvoření obrouček slunečních brýlí bylo zapotřebí nejprve naskenovat rozměry a tvar sklíček, které se následně promítly do modelu obrouček. K zachycení tvaru sklíčka byl použit fotoaparát mobilního telefonu a k určení rozměrů posloužil čtverečkový papír jako podklad pod sklíčkem. Fotografie byla následně přenesena do programu Solidworks 2020, zvětšena na optimální velikost podle rozměru sklíčka. Kontura sklíčka byla obkreslena spline křivkami a vznikl obrys sklíčka v reálné velikosti. Následně byl na základě obrysu sklíček vytvořen 3D model obrouček brýlí.



Obr. 28 Screenshot sklíčka z programu Solidworks 2020.

3.1.2 Tvar obrouček

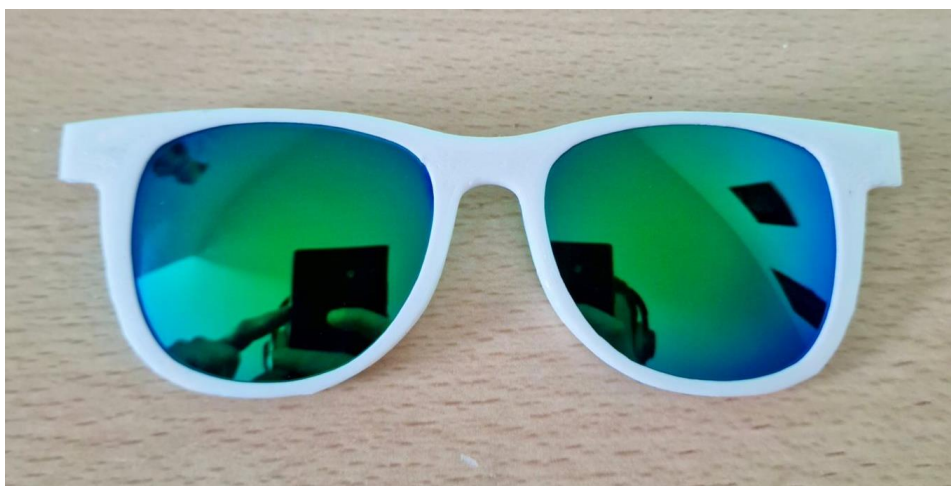
Rozměry a tvar obrouček jsou převzaty z geometrie běžně dostupných slunečních brýlí podobné kategorie zakoupených ze stránky Aliexpress.com. Některé části jako třeba panty jsou upraveny z důvodu nižší pevnosti materiálu PLA oproti materiálu, ze kterého jsou vyrobeny klasické sluneční brýle. Obroučky byly vytvořeny podle výrobcem daného tvaru sklíčka viz kapitola 3.1.1. Záručně pro sklíčka jsou navrženy tak, aby se do obrouček daly sklíčka zacvaknout i bez použití speciálního zařízení. Panty brýlí jsou součástí obrouček. Tvar obrouček ukazuje obrázek 22.



Obr. 29 Screenshot modelu obrouček z programu Solidworks 2020

Lícování sklíček v obroučkách

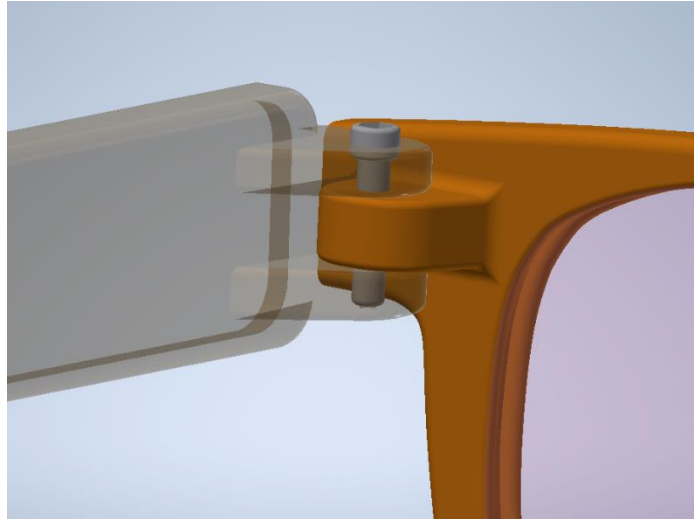
Jelikož tiskárna tiskne s přesností 0.2 až 0.4mm, bylo třeba tuto skutečnost brát v potaz a model optimalizovat dle skutečných rozměrů výtisku. Pro tuto optimalizaci bylo zapotřebí vytisknout testovací model, změřit skutečné rozměry, na základě kterých byl optimalizován model tak, aby sklíčka v obroučkách přesně lícovaly.



Obr. 30 Screenshot modelu obrouček z programu Solidworks 2020

3.1.3 Návrh pantů slunečních brýlí

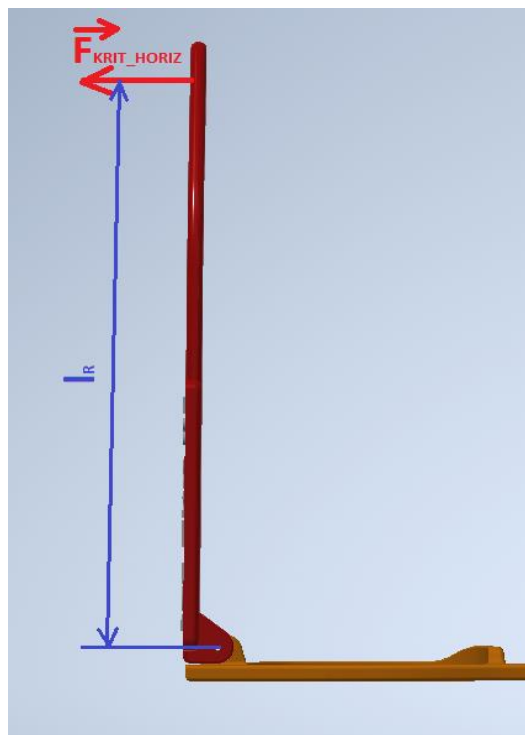
Pro jednoduchost výrobního procesu byla zvolena verze pantu, která je součástí paliček a obrouček brýlí. Odpadá tak nutnost do brýlí vtavovat případně vlepovat kovové panty. Při výpočtu rozměrů pantů byly použity hodnoty z kapitoly 3.1.4, ve které proběhlo experimentální změření pevnosti pantů u běžných slunečních brýlí a při tvorbě modelu bylo cíleno na dosažení podobných hodnot.



Obr. 31 Screenshot modelu pantu z programu Solidworks 2020

Zatížení pantu v horizontální rovině – tah

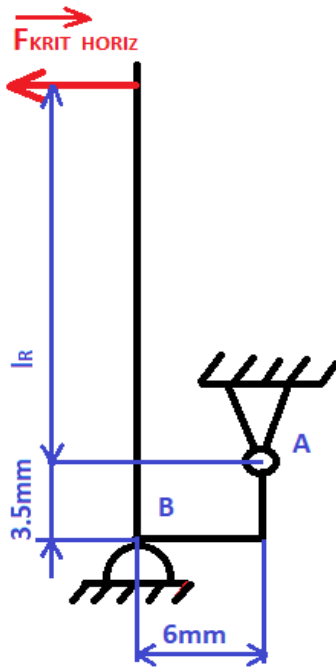
Zatížení pantu v horizontální rovině ukazuje schéma na obrázku. Umístění zatěžující síly bylo zvoleno ve stejné vzdálenosti $l_R = 124.8mm$, jako u brýlí použitých pro měření pevnosti pantu viz kapitola 3.1.4.



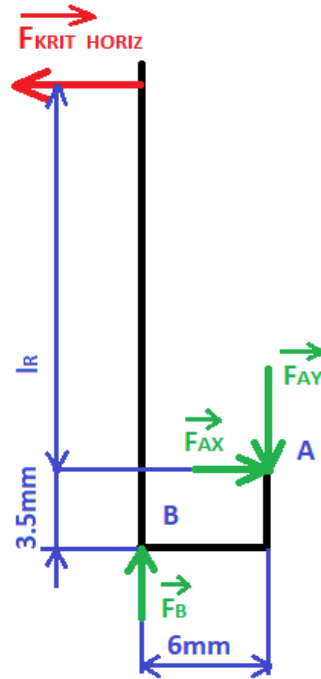
Obr. 32 Schéma zatížení v horizontálním směru

Náhradní schéma a uvolnění vazeb

Pro výpočet statických účinků v pantu bylo vytvořeno zjednodušené náhradní schéma viz obr. 33. Pant byl nahrazen rotační vazbou a opěrný bod paličky podporou. Rozměry odpovídají skutečným hodnotám na modelu brýlí. Bylo provedeno uvolnění viz obr. 34 a výpočet sil F_{AX} a F_{AY} , které budou sloužit pro výpočet rozměrů pantu.



Obr. 33 Náhradní schéma zatížení



Obr. 34 Schéma uvolnění vazeb

Výpočet sil v pantu:

Kde $l_R[m]$ je délka ramena paličky

$F_{KRIT_HORIZ} = 5.7 \text{ N}$ (viz kapitola 3.1.4)

$l_R = 124.8 \text{ mm}$

$$\Sigma F_X = 0: \quad F_{KRIT_HORIZ} - F_{AX} = 0 \Rightarrow F_{AX} = F_{KRIT_HORIZ}$$

$$\Sigma F_Y = 0: \quad F_B - F_{AY} = 0 \Rightarrow F_B = F_{AY}$$

$$\Sigma M_B = 0: \quad F_{KRIT_HORIZ} \times l_R - F_{AY} \times 0.006 - F_{AX} \times 0.0035 = 0$$

$$F_{AY} = \frac{F_{KRIT_HORIZ} \times l_R - F_{KRIT_HORIZ} \times 0.0035}{0.0035}$$

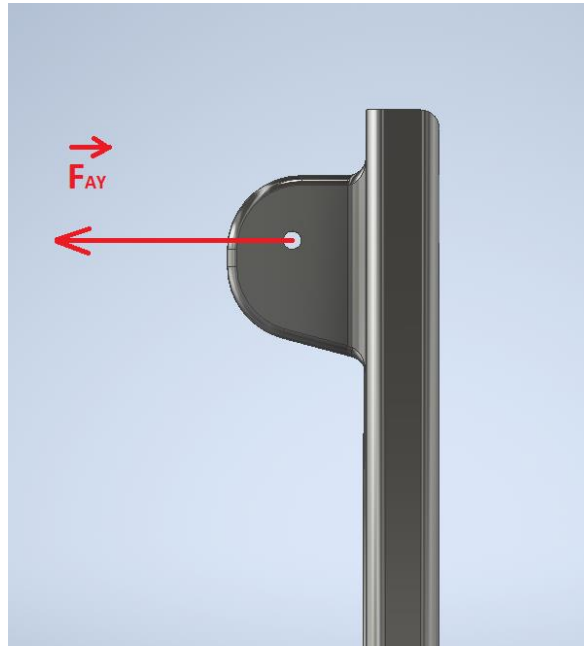
$$F_{AY} = \frac{5.7 \times 0.1248 - 5.7 \times 0.0035}{0.0035}$$

$$F_{AY} = 197.546 \text{ N}$$

$$F_{AX} = F_{KRIT_HORIZ} = 5.7 \text{ N}$$

Výpočet plochy pantu u obrouček

Obroučky brýlí budou při tisku položeny na tiskové podložce rovnoběžně s podložkou viz kapitola z důvodu rychlosti tisku a maximálnímu důrazu na estetičnost modelu. Pant bude tedy namáhán kolmo ke směru vrstev tisku, ve kterém materiál vykazuje nejnížší pevnost viz kapitola 3.2, kde byla změřena pevnost daného materiálu tahovou zkouškou ve dvou kolmých rovinách tisku. Z výpočtu vyplyne minimální možná plocha pantu v rovině, kde je umístěn šroub, tak aby při zatížení danou silou F_{AY} (viz obr. 35) pant odolal.



Obr. 35 Schéma zatížení pantu

R_{mK} [Mpa] – Mez pevnosti daného materiálu v ose kolmé na rovinu tisku

$R_{mK} = 2 \text{ Mpa}$

$\sigma_{K1} \leq R_{mK}$

Vzorec pro výpočet pevnosti v tahu:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$\sigma_{K1} = \frac{F_{AY}}{S_{P1}}$$

Vyjádření plochy S_{P1} ze vzorce:

Kde σ_{K1} [MPa] – Průměrná hodnota pevnosti naměřená v kapitole 3.2 viz tabulka 1.

$\sigma_{K1} = 14.159 \text{ MPa}$

$$S_{P1} = \frac{F_{AY}}{\sigma_{K1}}$$

$$S_{P1} = \frac{197.546}{14.159 \times 10^6}$$

$$S_{P1} = 1.395 \times 10^{-5} \text{ m}^2 = 13.95 \text{ mm}^2$$

Jelikož se hodnoty měření lišily od průměrné hodnoty σ_{K1} až o 15%, byl zaveden součinitel bezpečnosti $k=1.5$ [-].

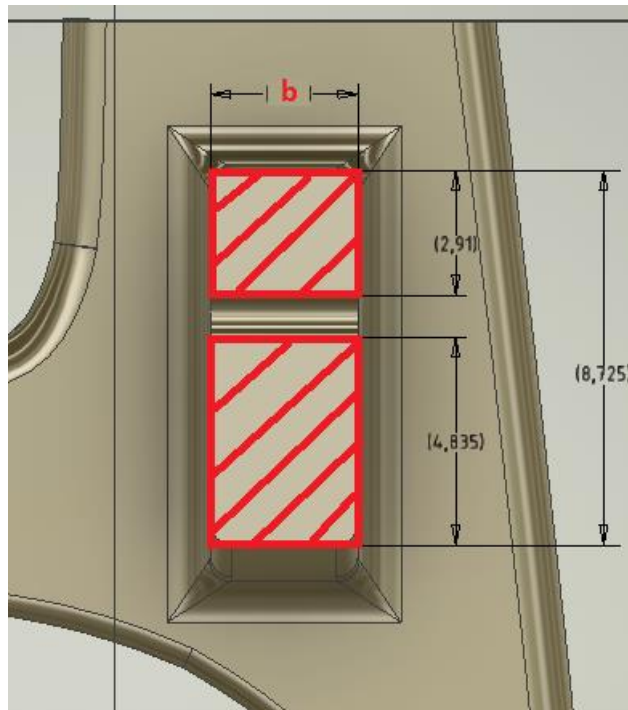
Výsledná minimální plocha S_{P1K} [mm^2] se potom vypočte jako součin plochy S_{P1} a součinitele bezpečnosti k .

$$\begin{aligned} S_{P1K} &= S_{P1} \times k \\ S_{P1K} &= 13.95 \times 1.5 \\ S_{P1K} &= 20.925 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Výpočet rozměru pantu

Na obrázku 36. je znázorněna plocha pantu v řezu rovinou osy šroubu. Zde je místo největšího napětí. Hledaným parametrem pro rozměry pantu bude rozměr b . Ostatní rozměry jsou dané tvarem obrouček a již se nebudou měnit. Výpočet určí minimální hodnotu rozměru b , tak aby pant při zatížení tahovou silou F_{AY} vydržel.

$$h = 2.91 + 4.835 = 7.745 \text{ mm}$$



Obr. 36 Řez pantem v rovině šroubu

Vzorec pro výpočet plochy pantu:

$$S_{P1K} = b \times h$$

Vyjádření rozměru b :

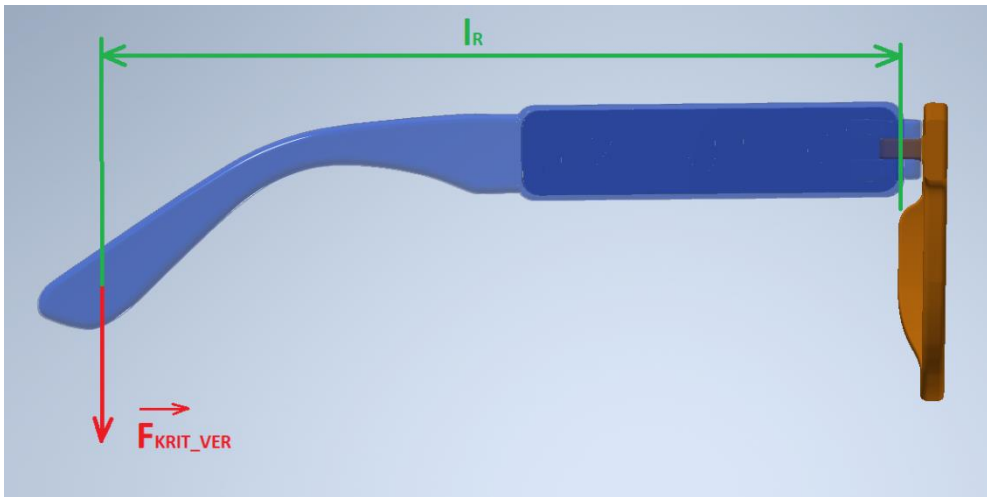
$$\begin{aligned} b &= \frac{S_{P1K}}{h} \\ b &= \frac{20.925}{7.745} = 2.702 \text{ mm} \end{aligned}$$

Skutečný rozměr b_{skut} musí být větší nebo roven vypočítanému rozměru b , aby pant vydržel zatížení.

$$b_{skut} \geq b$$

Zatížení pantu ve vertikální rovině – ohyb

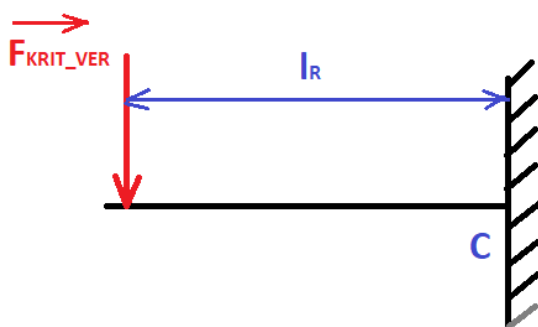
V druhé části experimentu viz kapitola 3.1.4 byl pant brýlí zatížen ve vertikální rovině. Schématické zatížení ukazuje obrázek 37. Při experimentu se pant ulomil v místě šroubu, kde je vlivem díry pro šroub zmenšená plocha pantu.



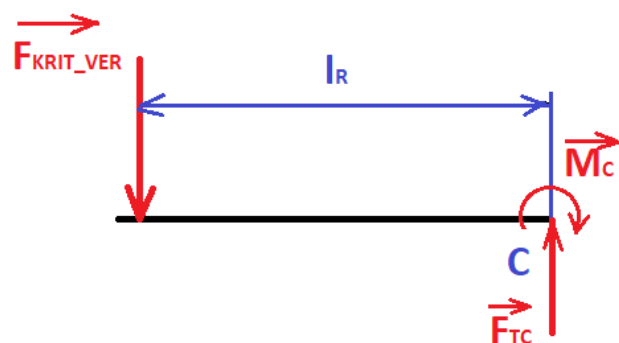
Obr. 37 Schéma zatížení ve vertikálním směru

Náhradní schéma a uvolnění vazeb

Pro výpočet statických účinků v pantu bylo vytvořeno zjednodušené náhradní schéma viz obrázek 38. Pant byl nahrazen vetknutou vazbou. Rozměry odpovídají skutečným hodnotám na modelu brýlí. Bylo provedeno uvolnění viz obrázek 39, a výpočet momentu M_C a síly F_{TC} které budou dále sloužit pro výpočet rozměrů pantu.



Obr. 38 Náhradní schéma zatížení



Obr. 39 Schéma uvolnění vazeb

Výpočet sil v pantu:

Kde $l_R [m]$ je délka ramena paličky

$$F_{KRIT_VER} = 7.269 \text{ N (viz kapitola 3.1.4)}$$

$$l_R = 124.8 \text{ mm}$$

$$\Sigma F_Y = 0: \quad F_{KRIT_VER} - F_{TC} = 0 \Rightarrow F_{TC} = F_{KRIT_VER}$$

$$\Sigma M_C = 0: \quad F_{KRIT_HORIZ} \times l_R - M_C = 0 \Rightarrow M_C = F_{KRIT_HORIZ} \times l_R$$

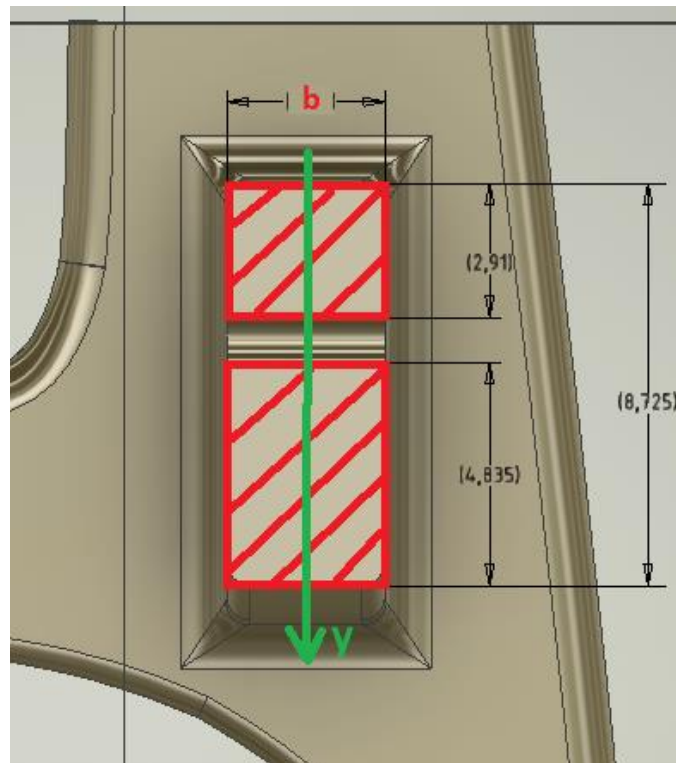
$$M_C = 7.269 \times 0.1248$$

$$M_C = 0.907 \text{ N} \times \text{m}^{-1}$$

Výsledné zatížení je kombinací smyku a ohybu. Smyková síla F_{TC} má na konečný výsledek velmi malý vliv, její působení tedy nebude bráno v potaz pro zjednodušení výpočtu.

Výpočet rozměru pantu

Na obrázku 40. je znázorněna plocha pantu v řezu rovinou osy šroubu. Zde je místo největšího napětí. Hledaným parametrem pro rozměry pantu bude rozměr b . Ostatní rozměry jsou dané tvarem obrouček a již se nebudou měnit. Výpočet určí minimální hodnotu rozměru b , tak aby pant při zatížení ohybem okolo osy y vydržel.



Obr. 40 Řez pantem v rovině šroubu

Výpočet napětí v ohybu

Kde:

σ_{OY} [MPa] – napětí v ohybu okolo osy y

σ_{dov} [MPa] – dovolené napětí

$$\sigma_{dov} = 14.159 \text{ MPa}$$

$M_O [N \times m^{-1}]$ – Ohybový moment

$$M_O = M_C = 0.907 N \times m^{-1}$$

$W_{OY} [mm^3]$ – Modul průřezu v ohybu

$h [mm]$ – délka plochy pantu

$b [mm]$ – šířka plochy pantu

$$h = 2.91 + 4.835 = 7.745 \text{ mm}$$

Rovnice napětí v ohybu:

$$\sigma_{OY} = \frac{M_O}{W_{OY}} \leq \sigma_{dov}$$

Rovnice modulu průřezu v ohybu pro obdelníkový průřez:

$$W_{OY} = \frac{h \times b^2}{6}$$

Upravená rovnice napětí v ohybu:

$$\sigma_{OY} = \frac{M_O}{\frac{h \times b^2}{6}}$$

Vyjádření rozměru b z rovnice:

$$b \geq \sqrt{\frac{\frac{M_O}{\sigma_{OY} \times 6}}{h}}$$

$$b \geq \sqrt{\frac{\frac{0.907}{14.159 \times 10^6 \times 6}}{0.007745}}$$

$$b \geq 1.174 \times 10^{-3} m = 1.174 \text{ mm}$$

Při započítání součinitele bezpečnosti bude skutečný rozměr b_{skut} :

$$\begin{aligned} b_{skut} &\geq k \times b \\ b_{skut} &\geq 1.5 \times 1.174 \\ b_{skut} &\geq 1.761 \text{ mm} \end{aligned}$$

Volba rozměru b_{skut} :

Rozměr b_{skut} vyšel menší než u výpočtu zatížení tahem, bude tedy volen dle hodnoty při zatížení tahem.

$$b_{skut} = 4 \text{ mm}$$

3.1.4 Experimentální změření pevnosti pantu slunečních brýlí

Při experimentu byly podrobeny sluneční brýle podobné konstrukce, zakoupené z Číny z portálu Aliexpress.com, pevnostní zkoušce tahovou silou vyvozenou na paličku ve dvou osách ohybu. Experiment simuluje zatížení na kritické a nejvíce namáhané místo brýlí, tedy pant. Jako medium pro vyvození síly byl použit z důvodu cenových úspor klasický křemičitý písek zvážený na přesné digitální váze a sypaný do kyblíku zavěšeného na paličce brýlí. Brýle byly upnuty ve speciálně zkonstruovaném přípravku, který brýle pevně upevnil ke stolu. Panty brýlí byly zatěžovány až do ulomení a byla stanovena přesná hmotnost zátěže v dobu ulomení, z níž byla vypočítána zatěžující kritická síla, která bude dále využita při konstrukci pantů 3D tištěných brýlí.



Obr. 41 Zatížení ve vertikální rovině



Obr. 42 Zatížení v horizontální rovině

Kritická hmotnost změřená při zatížení ve vertikální rovině – 741 g

Kritická hmotnost změřená při zatížení v horizontální rovině – 581 g

Délka ramena (paličky brýlí) při zatížení – 124,8mm

Výpočet kritické zatěžující síly ve vertikální rovině:

Kde:

F_{KRIT_VERT} [N] – Kritická hmotnost změřená při zatížení ve vertikální rovině

m_{KRIT_VERT} [kg] – kritická hmotnost změřená při zatížení ve vertikální rovině

$g[m \times s^{-2}]$ – tíhové zrychlení

$$g = 9.81 m \times s^{-2}$$

$$F_{KRIT_VERT} = m_{KRIT_VERT} \times g$$

$$F_{KRIT_VERT} = 0.741 \times 9.81$$

$$F_{KRIT_VERT} = 7.269 \text{ N}$$

Výpočet kritické zatěžující síly v horizontální rovině:

Kde:

F_{KRIT_HORIZ} [N] – Kritická síla změřená při zatížení v horizontální rovině

m_{KRIT_HORIZ} [kg] – kritická hmotnost změřená při zatížení v horizontální rovině

$$F_{KRIT_HORIZ} = m_{KRIT_VERT} \times g$$

$$F_{KRIT_HORIZ} = 0.581 \times 9.81$$

$$F_{KRIT_HORIZ} = 5.7 \text{ N}$$

Kritické místo ulomení

Kritickým místem ulomení bylo při experimentu místo v pantu kde je umístěn šroubek. Místo po ulomení ukazuje obrázek 43.



Obr. 43 Problém se změnou filamenty

Výsledky experimentu

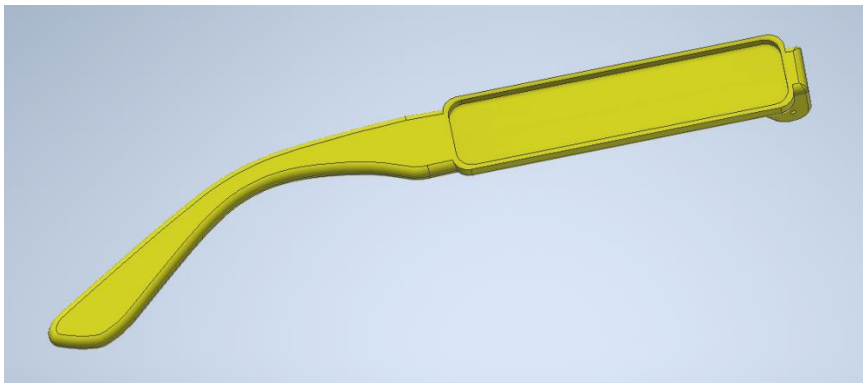
Experiment ověřil pevnost slunečních brýlí zakoupených z portálu Aliexpress, se kterými budou výsledné 3D tištěné brýle porovnávány v ohledu mechanických vlastností.

Naměřené hodnoty experimentu jsou 7.269 N ve vertikální rovině a 5.7 N v horizontální rovině.

Hodnoty jsou využity v kapitolách 3.1.3 a 3.3

3.1.5 Návrh paliček se štítky

Paličky slunečních brýlí budou obsahovat štítky s volitelným nápisem do 8 znaků, který bude vlepený do rámečku brýlí. Štítek bude tisknutý zvlášť zejména kvůli předzásobení samotnými paličkami brýlí a štítek bude tisknut až na základě specifické objednávky zákazníkem, což zkrátí dobu kompletace brýlí a umožní rychlejší expedici produktu k zákazníkovi. Lepidlo bude zvoleno kyanoakrylátové z důvodu rychlého vytvrzení spoje a pevného spojení viz kapitola 2.7 Lepení. Štítek bude zhotoven ze dvou různých barev materiálů. Text bude na štítek natisknut v odlišné barvě, než je barva štítku, bude tedy třeba tisk v průběhu zastavit na správné výšce vrstvy, vyměnit filament a dokončit proces tisku. K manuálnímu zastavení na správné výšce tisku a vyčištění tiskové hlavy bude vymodelován přípravek, viz kapitola 3.1.6, který vizuálně určí dobu zastavení tisku a při výměně filamentu se na něm dotiskne zbytek předchozího filamentu, aby se jím nekontaminovala nová vrstva tisku.



Obr. 44 Problém se změnou filamenty

Lícování štítku v paličce

Lícování štítku v paličce bylo nastaveno tak, aby štítek byl vlisován s lehkým přesahem, aby štítek držel i v případě selhání lepidla. Jelikož tiskárna tiskne s přesností 0.2-0.4 mm bylo zapotřebí nejprve vytisknout model paličky, změřit skutečný rozměr otvoru pro štítek a následně na základě skutečného rozměru optimalizovat model štítku. Štítek byl vytisknut a na základě změření skutečného rozměru štítku byl upraven rozměr v modelu, tak aby štítek lícoval s lehkým přesahem. Výsledkem měření bylo, že tiskárna tiskne rozměr délky otvoru pro štítek menší o 0,19 mm menší, než je v modelu.



Obr. 45 Problém se změnou filamentu

3.1.6 Dvoubarevný tisk štítku

Pro dvoubarevný tisk štítku u zvolené tiskárny Anycubic I3 Mega s jedním extruderem je třeba pozastavit tisk v průběhu na správné vrstvě tisku, vyměnit filament a dotisknout text na štítku.

Problém se změnou barvy filamentu

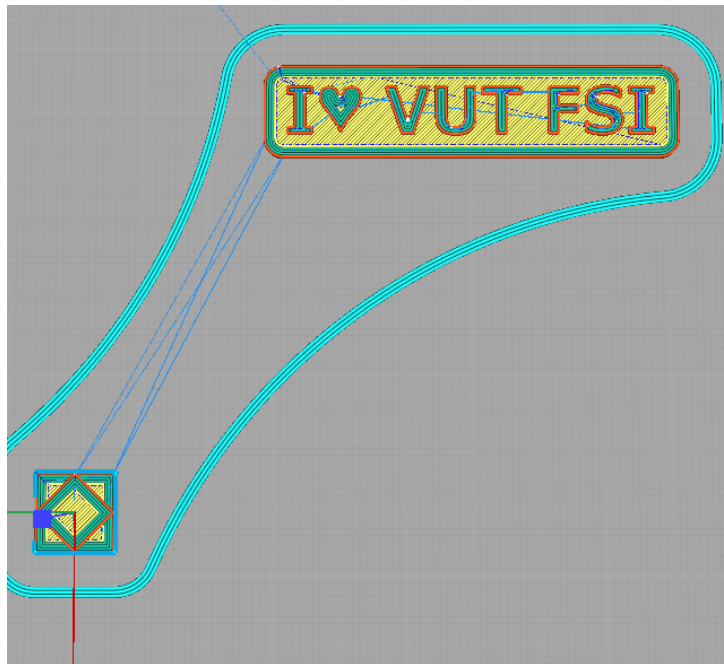
Po výměně filamentu zůstane objem tiskové hlavy naplněný předchozím filamentem a při tisku textu se část předchozí barvy přenesne na novou vrstvu, viz obrázek níže. Aby k tomuto jevu nedocházelo, je třeba před tiskem vyčistit tiskovou hlavu. Pro automatizování procesu bude k tomuto účelu sloužit přípravek, který se vytiskne spolu se štítkem a při výměně filamentu se zbytek předchozího filamentu dotiskne na vrstvu tohoto přípravku. Přípravek bude zároveň sloužit jako optický ukazatel, kdy má být tisk pozastaven.



Obr. 46 Problém se změnou filamenty

Konstrukce modelu pro změnu barvy tisku

Funkce modelu spočívá ve změně tvaru tisku v rovině předešlé tisku textu díky čemuž lze snadno indikovat kdy má být tiskárna manuálně pozastavena tak, aby byl extruder mimo tiskovou oblast a nenarušil štítek. Po opětovném spuštění se na modelu očistí tisková hlava od předešlého materiálu. Výsledkem by měl být tisk textu na štítku ve vysoké kvalitě.



Obr. 47 Řešení změny barvy z programu Ultimaker Cura 5.2.1

Při tištění štítku spolu s přípravkem bylo mnohem snazší zastavit tisk během procesu, materiál vytékající z extruderu nevytekl na štítek a nepoškodil vrstvu a zbylý materiál v extruderu se dotiskl na vrstvě přípravku, takže nápis nebyl kontaminovaný předchozí barvou filamentu. Výsledek tisku s přípravkem ukazuje obrázek 48.



Obr. 48 Řešení změny barvy z programu Ultimaker Cura 5.2.1

3.2 Experimentální změření pevnosti materiálu

3.2.1 Tahová zkouška

Cílem experimentu je zjistit, zda se u zvoleného materiálu PLA+ od výrobce Gembird zvýší pevnost při žihání na 70°C, 90°C A 120°C. Hlavním faktorem je zjistit, zda se zvýší pevnost v ose kolmé na rovinu tisku, což by mělo pozitivní vliv na pevnost pantů slunečních brýlí. Dalším faktorem je zjistit reálnou pevnost zvoleného materiálu při tisku malé plochy zatěžované kolmo na rovinu tisku. Hodnota pevnosti bude využita při výpočtu rozměrů pantu slunečních brýlí viz kapitola 3.1.3.

3.2.2 Příprava vzorku pro tahovou zkoušku

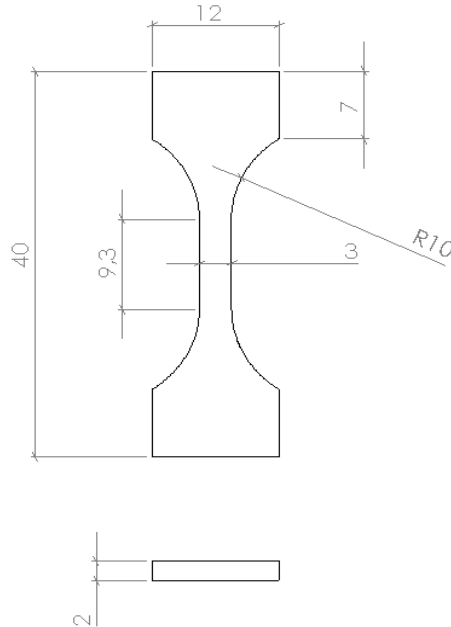
Tahová zkouška byla provedena na malém experimentálním zařízení fungujícím na Arduino viz obrázek 49. Tato trhačka je vhodná pouze pro specifické nenormalizované vzorky malých průřezů a je schopna vyvinout maximální sílu 500 N. Pro tuto aplikaci je zařízení naprosto dostačující, jelikož je třeba ověřit právě pevnost výtisku v místě s malým průřezem, kde je pevnost velmi nestálá.



Obr. 49 Experimentální trhací zařízení

3.2.3 Vzorky pro tahovou zkoušku

Průřez vzorků byl volen podle materiálové charakteristiky dané výrobcem tak, aby při experimentu nepřekročila tahová síla maximální možnou hodnotu vyvozenou zařízením. Průřez vzorku byl volen 3x2mm viz obrázek 50.



Obr. 50 Vzorek pro tahovou zkoušku

Výpočet maximální plochy průřezu vzorku

Distributor materiálu udává pevnost v tahu až 75 MPa, maximální síla vyvozená trhacím zařízením je 500 N.

Vzorec pro výpočet napětí:

$$\sigma = \frac{F_{TMAX}}{S_{VZMAX}}$$

Kde:

σ [MPa] – napětí

R_m [MPa] - mez pevnosti v tahu

$R_m = 75$ MPa

F_{TMAX} [N] - maximální síla vyvozená trhacím zařízením

$F_{TMAX} = 500$ N

S_{VZMAX} [mm²] - maximální možný průřez vzorku

Vyjádření průřezu S_{VZMAX} ze vzorce:

$$S_{VZMAX} = \frac{F_{TMAX}}{\sigma}$$

$$S_{VZMAX} = \frac{500}{75}$$

$$S_{VZMAX} = 6.67 \text{ mm}^2$$

Volba výsledného průřezu:

Obrázek 51. ukazuje rozměry a, b.

Vzorec pro výpočet plochy průřezu vzorku:

Kde:

S_{VZ} [mm²] - plocha průřezu vzorku

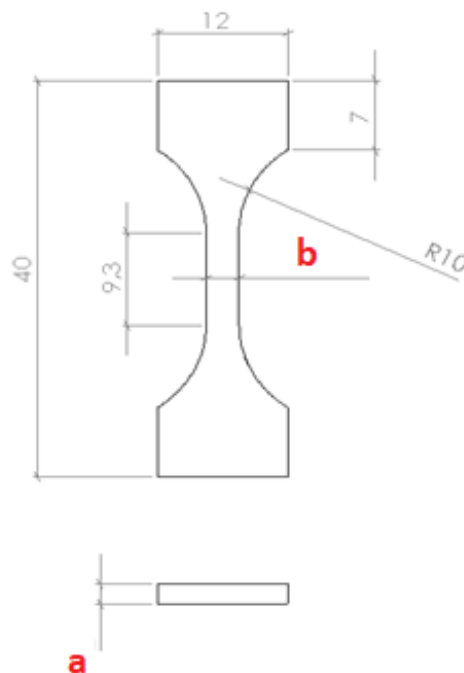
Rozměr a je volen 2mm

Rozměr b je volen 3mm

$$S_{VZ} \leq S_{VZMAX}$$

$$S_{VZ} = a \times b$$

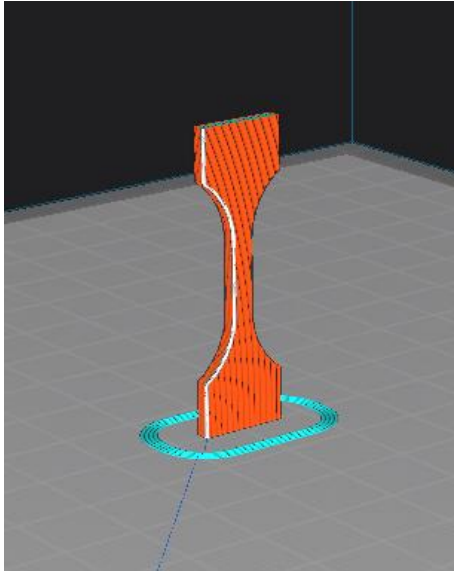
$$S_{VZ} = 2 \times 3 = 6 \text{ mm}^2$$



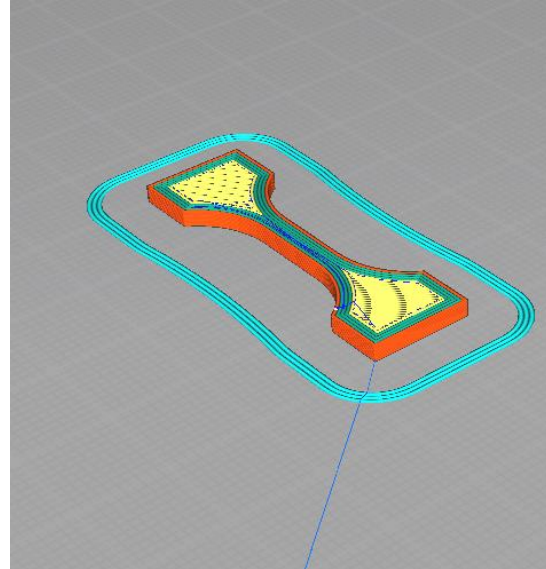
Obr. 51 Rozměry průřezu vzorku

3.2.4 Tisk vzorků

Vzorky byly vytištěny se stejnými parametry jako u modelu slunečních brýlí. Výška tisku byla volena 0.2mm, teplota extruderu 210°C, teplota podložky 30°C a rychlost tisku 50mm/s. Orientace na tiskové podložce byla volena ve dvou kolmých rovinách viz obrázek 52. a obrázek 53.



Obr. 52 Tisk vzorku kolmo k podložce



Obr. 53 Tisk vzorku rovnoběžně s podložkou

3.2.5 Tepelné zpracování vzorků – žihání v horkovzdušné troubě

Celkem bylo připraveno 30 vzorků. Část byla tepelně zpracována v horkovzdušné troubě na teplotu 70°C, 100°C a 120°C po dobu 30 minut. Při teplotě nad 120°C docházelo k výrazným změnám tvaru a vzorek se začínal kroutit a roztékat viz obrázek 54.



Obr. 54 Vzorek žiháný teplotou 130°C po dobu 30 minut

3.2.6 Naměřené hodnoty

Při každém měření bylo použito 5 vzorků pro eliminaci chybového měření. Naměřené hodnoty ukazují tabulky Tab. 1-5.

Výpočet zatížení σ [MPa]

$$\sigma_{MAX} = \frac{F_{MAX}}{S}$$

Průřez vzorku S [mm^2]

$$S = 3 \times 2 = 6 \text{ mm}^2$$

Tab. 1 Tisk kolmo k podložce, nežiháno

Číslo měření	Zatížení F_{MAX} [N]	Zatížení σ_{MAX} [MPa]
1	90.448	15.075
2	72.286	12.048
3	84.224	14.037
4	88.981	14.830
5	88.825	14.804
Průměr	84.953	14.159

Tab. 2 Tisk kolmo k podložce, žiháno 70 °C, 30 minut

Číslo měření	Zatížení F_{MAX} [N]	Zatížení σ_{MAX} [MPa]
1	49.524	8.254
2	43.631	7.272
3	50.481	8.414
4	67.758	11.293
5	63.202	10.534
Průměr	54.919	9.153

Tab. 3 Tisk kolmo k podložce, žiháno 100 °C, 30 minut

Číslo měření	Zatížení F_{MAX} [N]	Zatížení σ_{MAX} [MPa]
1	40.550	6.758
2	48.561	8.094
3	42.308	7.051
4	55.309	9.218
5	50.154	8.359
Průměr	47.3764	7.896

Tab. 4 Tisk kolmo k podložce, žiháno 120 °C, 30 minut

Číslo měření	Zatížení F_{MAX} [N]	Zatížení σ_{MAX} [MPa]
1	21.506	3.584
2	42.712	7.119
3	36.243	6.041
4	38.292	6.382
5	54.839	9.140
Průměr	40.118	6.453

Tab. 5 Tisk rovnoběžně s podložkou, nežiháno

Číslo měření	Zatížení F_{MAX} [N]	Zatížení σ_{MAX} [MPa]
1	280.285	46.714
2	253.828	42.305
3	281.068	46.845
4	292.045	48.674
5	301.508	50.251
Průměr	281.747	46.958

Tab. 6 Tisk rovnoběžně s podložkou, žiháno 100 °C, 30 minut

Číslo měření	Zatížení F_{MAX} [N]	Zatížení σ_{MAX} [MPa]
1	289.660	48.277
2	314.103	52.351
3	260.009	43.335
4	303.304	50.551
5	297.064	49.511
Průměr	292.828	48.805

3.2.7 Zhodnocení experimentu

Z výsledků experimentu vyplývá, že při žihání zvoleného materiálu PLA+ od výrobce Gembird, tisknutého kolmo k podložce, nedojde k zlepšení pevnosti v tahu. Naopak experiment prokázal snížení pevnosti v tahu s teplotou žihání. Dále je z experimentu patrná velká nestálost vlastností tisknutého materiálu zejména při tisku kolmo k podložce, která se pohybovala v rozmezí až 20%.

Z experimentu byly stanoveny mechanické vlastnosti daného materiálu, které byly využity při pevnostních výpočtech pantu a při simulaci MKP. Mechanické vlastnosti naměřené při experimentu jsou podstatně nižší, než udává výrobce.

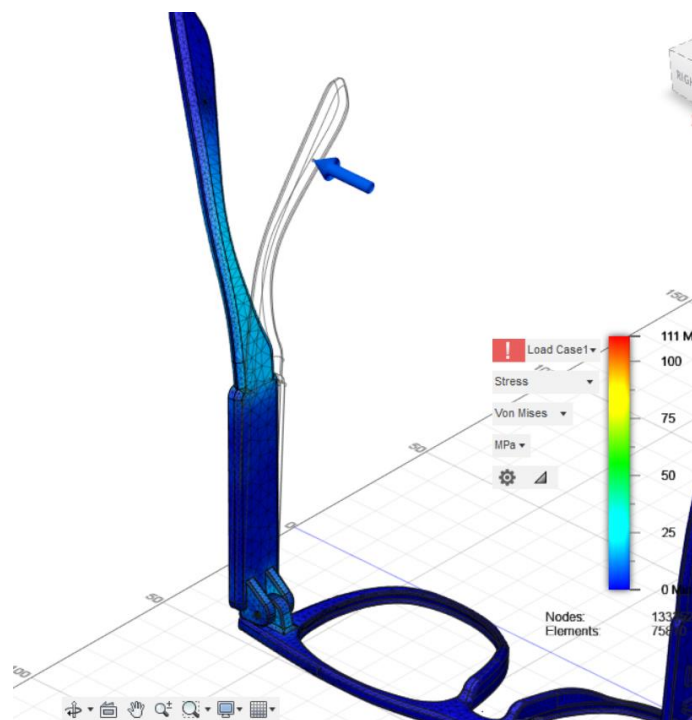
3.3 Ověření pevnosti metodou MKP

Výsledný model s upravenou velikostí pantu byl podroben testu zatížení v softwaru Autodesk Fusion 360, aby se ověřilo, zda v pantu nevzniká kritické napětí. Simulace byla provedena ve dvou různých směrech, stejně jako experiment se změřením pevnosti pantu viz kapitola 3.1.3.

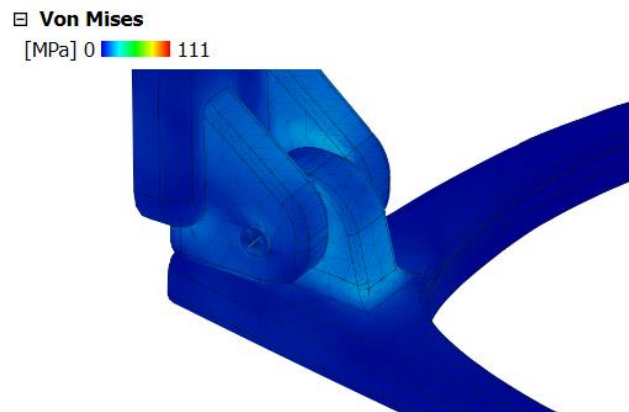
Zatížení v horizontální rovině

Palička brýlí byla v simulaci zatížena statickou silou o stejné velikosti jako byla únosnost pantu u brýlí zakoupených z portálu Aliexpress. Přední strana obrouček byla nastavena jako pevný bod což simuluje upnutí obrouček do svěrky jako tomu bylo u experimentálního měření únosnosti pantů v kapitole 3.1.4.

Obrázek 55. ukazuje rozložení napětí v pantu v kritických místech. Hodnoty nepřekračují naměřenou mez pevnosti materiálu. Model je tedy v pořádku.

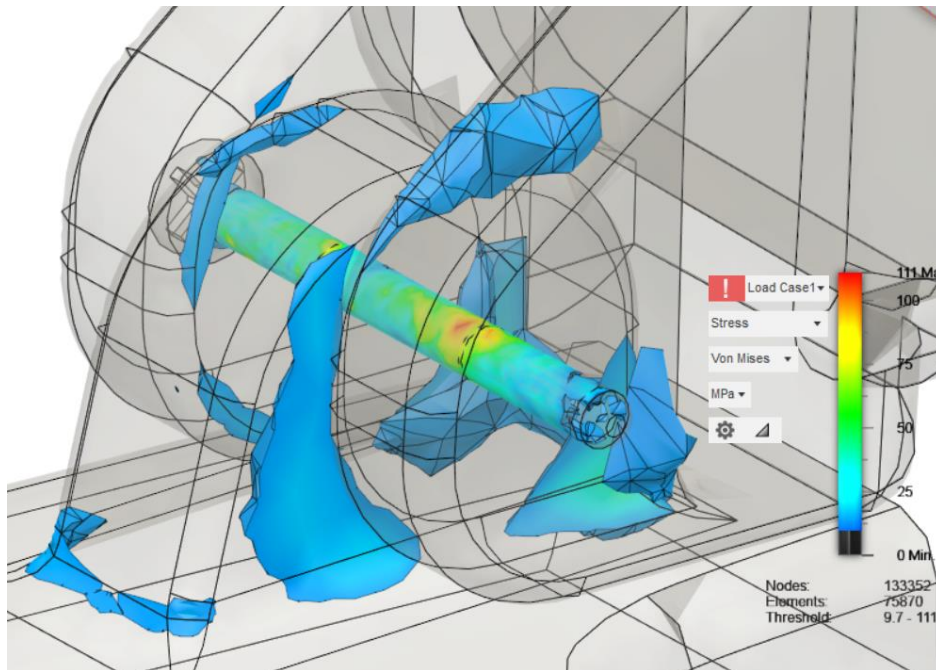


Obr. 55 Vzorek žíhaný teplotou 130°C po dobu 30 minut



Obr. 56 Vzorek žíhaný teplotou 130°C po dobu 30 minut

Obrázek 57. zobrazuje kritická místa napětí v modelu pantu. Kritické napětí je zejména ve šroubu vlivem ohybu, nicméně šroub dosahuje mnohem vyšší pevnosti než okolní plastový materiál



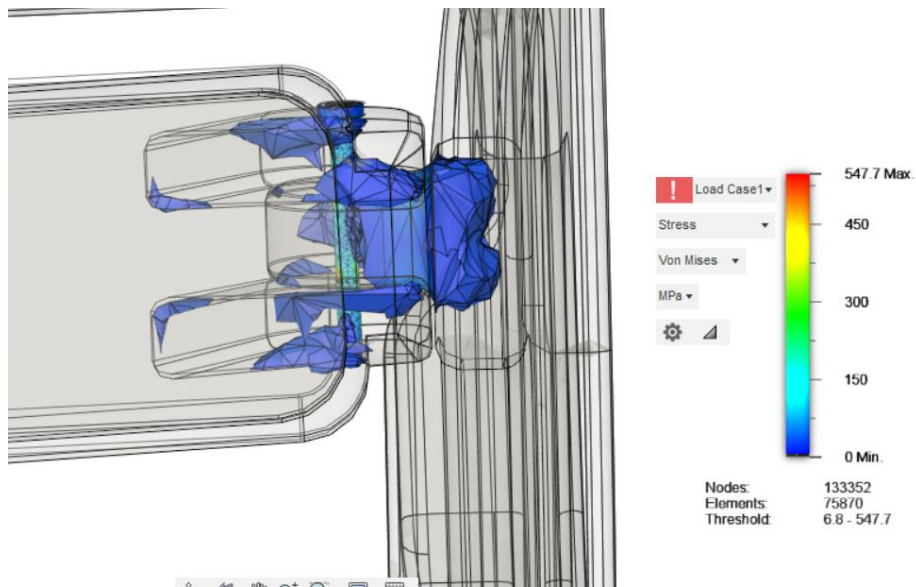
Obr. 57 Vzorek žíhaný teplotou 130°C po dobu 30 minut

Zatížení ve vertikální rovině

Obrázek 58. ukazuje zatížení paličky statickou silou stejně jako u experimentu v kapitole xx



Obr. 58 Vzorek žíhaný teplotou 130°C po dobu 30 minut



Obr. 59 Vzorek žíhaný teplotou 130°C po dobu 30 minut

Zhodnocení MKP

Metoda MKP prověřila kritická místa v pantech slunečních brýlí po optimalizaci. Panty jsou v pořádku a nevzniká v nich rizikové napětí.

3.4 Výroba modelu

3.4.1 Tiskárna Anycubic I3 Mega

Pro výrobu všech součástí byla použita tiskárna od společnosti Anycubic viz obrázek 60. Jednalo se o model I3 Mega s velikostí tiskové plochy 210 x 210 x 205 mm. Tiskárna disponuje velmi robustní konstrukcí, vyhřívanou podložkou s automatickým odlepením modelu po vychladnutí a extruderem s nepřímým vedením filamentu umožňujícím tisk vysokou tiskovou rychlostí až 60mm/s (v praxi zvládá u větších modelů i 90mm/s). Tiskárna zvládá tisk termoplastů do teploty 260°C, není tedy vhodná pro tisk materiálů typu polycarbonát, nebo ABS+. Nevýhodou nepřímého vedení filamentu je poměrně velké stringování při tisku Nylonu či PETG, proto je vhodné tisknout ideálně z materiálu PLA. U materiálu PLA dosahuje velmi dobrých tiskových vlastností, vysoké přesnosti a minima poruch. Velkou výhodou je nízká pořizovací cena (6500 Kč) a přehledný displej, na kterém je možnost pozorovat například výšku tiskové vrstvy a pozastavit tisk pro výměnu barvy filamentu. Další nevýhodou tiskárny je zasekávající se senzor konce filamentu, který byl pro svou velkou poruchovost odstraněn.

Pro tiskárnu byl vyroben temperovaný box fungující na bázi ventilátoru z PC ovládaného přes termorezistor za pomoci Arduina, takže tiskárna dosahuje lepší spékavosti vrstev než běžný model bez boxu a je možné tisknout i materiál ABS.

Tiskárna byla oproti původní verzi opatřena adhezní vrstvou podložky z tiskárny Ender kvůli občasnému odlepování modelu z původní podložky a tedy nedostatečné spolehlivosti tisku.

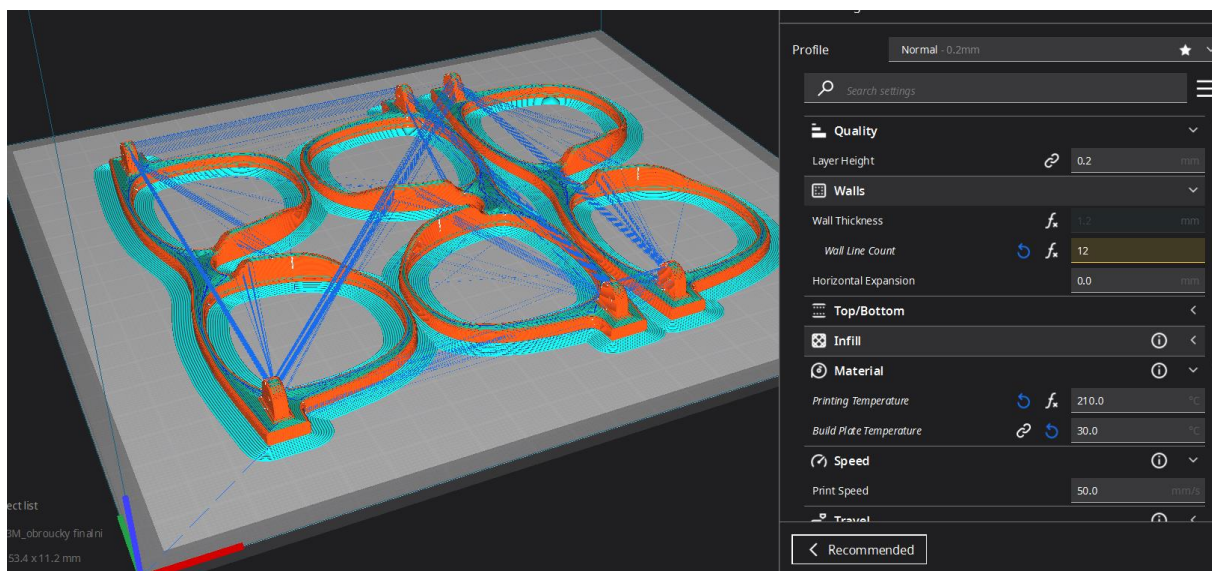


Obr. 60 3D tiskárna Anycubic I3 Mega

3.4.2 Příprava programů pro 3D tisk

Model vytvořený v programu Solidworks 2020 byl vyexportován do formátu STL a otevřen programem Ultimaker Cura, který soubor dále převedl do formátu gcode čitelného 3D tiskárnou. V programu Cura lze nastavit širokou škálu parametrů, které při správném nastavení zajistí optimální a bezproblémový tisk v dostatečné kvalitě a rychlosti. Kromě parametrů typu teplota, rychlost nebo hustota výplně se v programu nastavuje rozmístění modelů na podložce, podpory u volně ložených ploch a typy pomocných prvků pro adhezi k podložce. Typ adheze k podložce byl po několika testech zvolen jako „skirt“, který dosahuje nejlepší kvality čelní plochy obrouček. Nevýhodou je nutnost odstranění prvku adheze z hotového modelu za pomoci bříty žiletky.

Obrázek xx ukazuje rozmístění modelů obrouček na podložce a tiskové parametry zvolené podle doporučených hodnot výrobce materiálu a experimentálního zkoušení přesnosti tisku při různých podmínkách na testovacích modelech viz kapitola 3.4.3

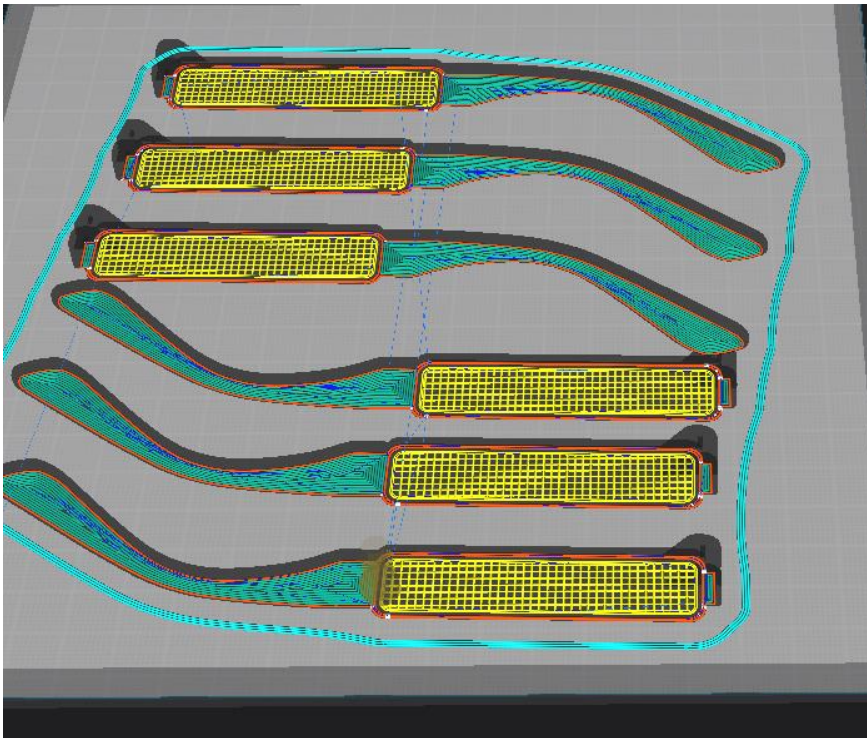


Obr. 61 Rozmístění modelů na tiskové podložce

Orientace modelů na tiskové desce

Všechny modely byly na podložku umístěny tak, aby docházelo k nejmenšímu možnému využití podporového materiálu a k maximálnímu důrazu na estetičnost pohledových ploch. Proto obroučky i paličky brýlí byly na položku umístěny pohledovou stranou směrem dolů. Na komponenty se obtiskne textura podložky a vytvoří vizuálně líbivý povrch. U paliček bylo třeba využít podporový materiál v místech umístění štítků, nicméně místo, kde se podporový materiál nachází a odkud bude vylomen, což způsobí nehezky povrch nacházející se pod nalepeným štítkem, takže nebude na hotových brýlích viditelné.

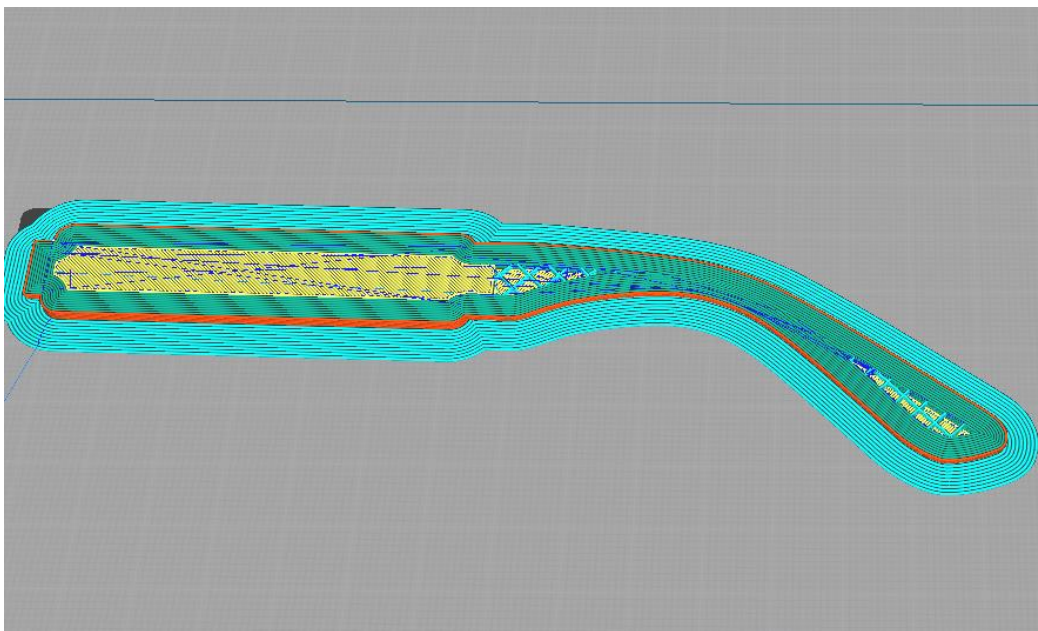
Oblast podporového materiálu byla konfigurována tak, aby podporový materiál šlo snadno vylámat za pomoci plochého šroubováku a na místo přesně vlepít štítek s textem. Oblast podporového materiálu je vyobrazena na obrázku 62.



Obr. 62 Zobrazení materiálu podpor

Výplň (infill)

Pro urychlení tisku byla volena výplň typu mřížka na paličce v místech, kde nedochází k výraznému namáhání součásti, neovlivní tedy výslednou pevnost součásti a ušetří materiál a dobu tisku. Hustota výplně byla zvolena 25%. Pro nastavení výplně byl upravován parametr „wall thickness“ na výslednou hodnotu 4mm. Výplň modelu vyobrazuje obrázek 63.



Obr. 63 Zobrazení materiálu podpor

3.4.3 Příprava tiskárny před tiskem

Kalibrace podložky

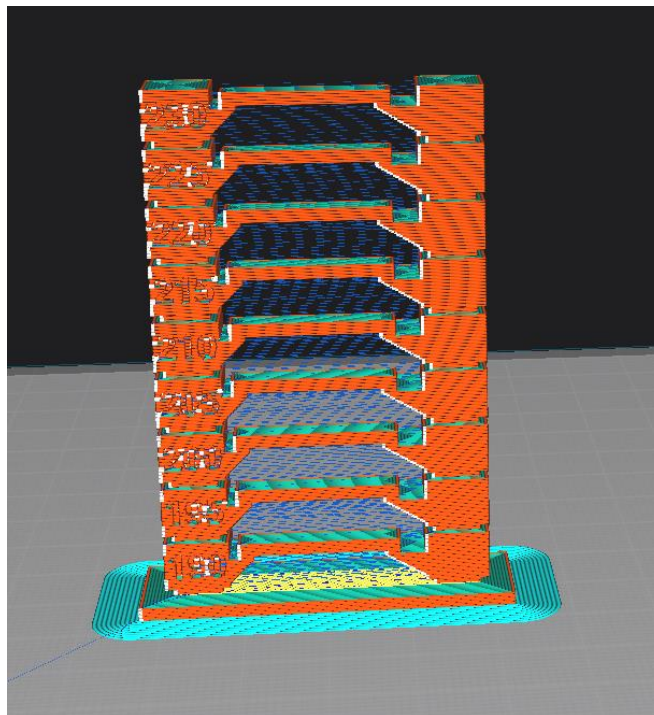
3D tisk je velmi náchylný na jakékoliv nedokonalosti a výsledek tisku je velmi nestálý. Naprosto zásadní je mít dobře kalibrovanou podložku což se u tiskárny Anycubic provádí pomocí čtyř stavěcích šroubů na tiskové podložce a listu papíru, jenž se vloží při nulové poloze osy Z mezi trysku a tiskovou desku. Mezera mezi tryskou a tiskovou deskou by měla být dle parametrů dodaných výrobcem 0.1 mm, což odpovídá tloušťce klasického kancelářského papíru. Papír by se měl mezi tryskou a podložkou volně pohybovat. Je důležité, aby při kalibraci byl nahlátný extruder, jinak by mohl výsledek znečistit filament zatvrdlý na špičce trysky.

Odmaštění tiskové desky

Před každým tiskem musí být tisková podložka zbavena zbytků filamentu z předchozího tisku a po nějaké době vždy odmaštěna ideálně Ethanolem nebo Propylalkoholem, aby nedocházelo k olepování modelů. U větších modelů a při zaplnění celé tiskové plochy dochází vlivem tepelného smrštění k pnutí mezi první vrstvou tisku a podložkou. Při nedostatečném odmaštění podložky dochází k odlepování rohů výtisku a může dojít i k úplnému odlepení modelu a případně poškození a zalepení extruderu. Adhezi modelu s tenkou stěnou (zejména u obrouček brýlí) zajistí prvek „skirt“ již zmiňovaný v předchozí kapitole.

Kalibrace optimální teploty tisku

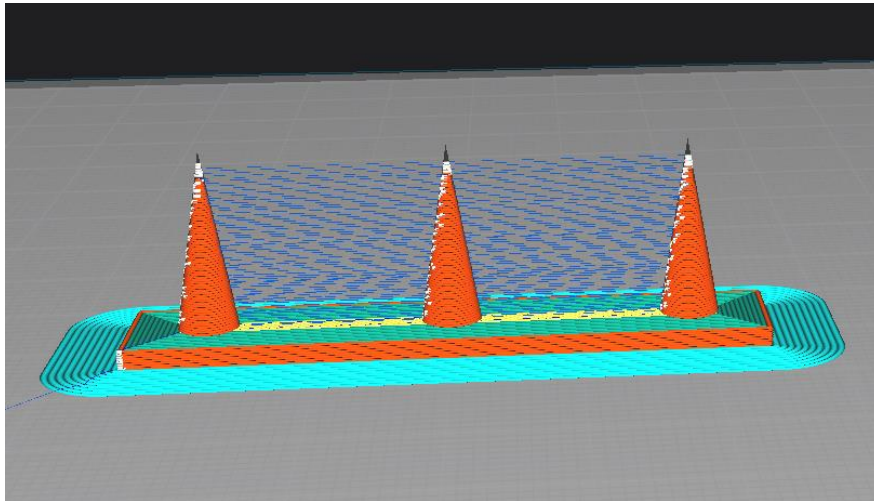
Volba optimální teploty pro daný materiál a tiskárnu byla provedena za pomoci experimentálního modelu tiskové věže viz obrázek xx. Princip spočívá v zápisu různých teplot pro každou z bloku věže přímo do gkodu a po vytisknutí věže se opticky posoudí, která vrstva dosahuje nejlepší kvality tisku. Při tisku dosahoval nejlepšího výsledku blok s teplotou tisku 210 °C, proto byla tato teplota použita i pro tisk brýlí.



Obr. 64 Zobrazení materiálu podpor

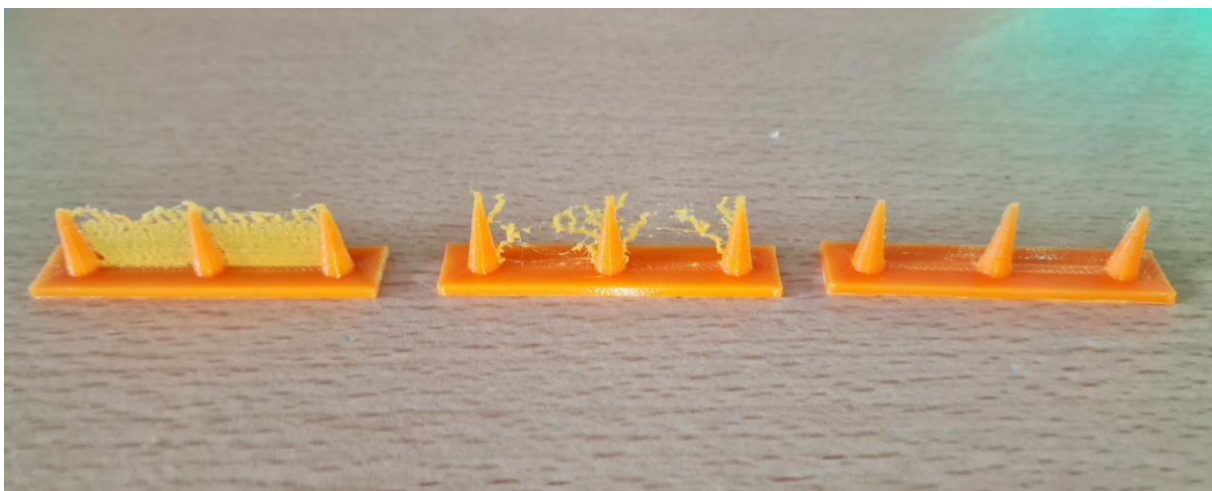
Kalibrace retrakce

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.4.1, tiskárna s nepřímým vedením filamentu je velmi náchylná na stringování což je v podstatě natahování vláken roztaveného materiálu při přejíždění extruderu mezi volnými místy na modelu. Parametr, který nejvíce ovlivňuje stringování je retrakce. Jedná se o opačný chod podávacího motorku, který vtáhne materiál zpět do trysky. Pro správné nastavení retrakce slouží experimentální model s hroty viz obrázek 65. Retrakce je volena po procentech hodnot a následně je tištěn model do té doby, dokud nezmizí stringování.



Obr. 65 Stringovací model

Bylo nastaveno několik hodnot retrakce a u každé byl vytištěn model viz obrázek 66. ukazující testovací výtisky. Výtisk vlevo měl nastavenou retrakci 0, model vpravo měl nastavené ideální hodnoty retrakce.



Obr. 66 Vytištěné stringovací modely

3.4.4 Postprocessing

Z modelů bylo třeba odstranit veškerý adhezní materiál za pomoci bříty žiletky, podpory a všechny komponenty lehce obrousit smirkovým papírem drsnosti 200 a následně 1000, aby byly modely zbaveny ostrých míst a ořepů. Dále bylo třeba dotvarovat za použití horkovzdušné pistole konce paliček a obroučky. Tvarování při zahřátí bylo zvoleno z důvodu nutnosti využít velké množství podpor při tisku zakřivených obrouček a paliček, což by zvýšilo náklady na materiál, ale hlavně zhoršilo kvalitu pohledových ploch na velice špatnou úroveň. V praxi bývají modely obdobných parametrů často tvarovány za pomoci nahřátí.

Odstranění podpor

Podporový materiál bylo třeba odstranit u paliček. Podpory bylo možné lehce vylámat plochým šroubovákem viz obrázek 67. Po vylámaní podpor vznikl nehezky povrch, který bude ale zakrytý nalepených štítkem s textem a nepůjde vidět.



Obr. 67 Vytištěné stringovací modely

Tvarování obrouček a paliček horkovzdušnou pistolí

Obroučky a paličky jsou tištěny v rovném stavu z důvodu udržení vizuálně kvalitních pohledových ploch a úspory času a materiálů při tisku. Po vytištění bylo třeba komponenty dotvarovat. Pro optimalizaci času lidské práce na postprocessing a opakovatelnosti výroby byly zkonstruovány jednoduché přípravky.

Přípravek je tvořen pásem plechu, který je ohnutý do tvaru původních obrouček. Na plech byly obkresleny obroučky a nalepeny aretace pro přesné umístění výtisku obrouček.

Po umístění obrouček je model pomalu zahříván za pomoci horkovzdušné pistole dokud nedosedne na přípravek. Po ochladnutí je model připravený na kopletaci. Přípravek před tvářením vyobrazuje obrázek xx. Komponentu v přípravku po tváření vyobrazuje obrázek 68.



Obr. 68 Vytištěné stringovací modely



Obr. 69 Vytištěné stringovací modely

Obdobným způsobem bylo postupováno i u paliček. Levá a pravá palička jsou odlišné, proto bylo třeba vytvořit na přípravku dosedací plochy pro dva modely viz obrázek 70. Ohyb u paličky je větší než u obrouček, bylo tedy třeba paličku na přípravku v průběhu tvarování přidržovat.



Obr. 70 Vytisknuté stringovací modely
Výsledný ohyb je zobrazen na obrázku 71.



Obr. 71 Vytisknuté stringovací modely

Vrtání děr pro šroubky

Díry pro šroubky byly již v modelu, nicméně metodou 3D tisku není možné vytisknout přesně takto malé díry, proto bylo zapotřebí otvory převrtat na požadovaný rozměr a vytvořit zapuštění pro hlavy šroubů viz obrázek 72.

Šroub má průměr 1mm, byl volen vrták o stejném průměru a pro zapuštění pro hlavu šroubu byl volen vrták s průměrem 3mm. Spodní část pantu paličky, do které si šroub při zašroubování vyřeže závit, byla vrtána vrtákem o průměru 0.5mm.



Obr. 72 Vytištěné stringovací modely

Lepení štítků

Štítky byly do paliček vlepny za pomoci kyanoakrylátového sekundového lepidla značky Loctite a následně bylo třeba nechat lepidlo několik hodin vytvrdnout, aby se lepidlem nekontaminovaly sklíčka při kompletaci.

Instalace sklíček

Sklíčka byly do obrouček jednoduše zacvaknuty. Obroučky jsou dostatečně flexibilní, aby do nich sklíčka lehce zapadly.

Brýle po kompletaci

Hotový model bylo třeba očistit, rozhýbat panty a nastavit momenty utažení na obou pantech tek, aby měly stejně hladký chod. Hotový produkt ukazuje obrázek Obr. 73.



Obr. 73 Hotový produkt 3D tištěné sluneční brýle

3.5 Technicko ekonomické zhodnocení

Pro zjištění celkové ceny byla vytvořena rovnice obsahující součet celkových nákladů na jednotlivé položky.

$$N_C = N_T + N_M + N_{PP} + N_{CLP} + N_Z$$

Kde:

N_C [Kč] – Celkové náklady

N_T [Kč] – Náklady na provoz tiskárny

N_M [Kč] – Náklady na spotřebovaný materiál

N_{PP} [Kč] – Náklady na post processing

N_{CLP} [Kč] – Náklady na cenu lidské práce

N_Z [Kč] – Zbylé náklady

Náklady na provoz tiskárny

Náklady na provoz tiskárny obsahují spotřebovanou energii a náklad na lidskou obsluhu. Tiskárna Anycubic I3 Mega má spotřebu dle parametrů výrobce okolo 100-300W za hodinu tisku. Cena elektrické energie je v místě tisku 5Kč/kWh. Lze tedy očekávat průměrnou spotřebu okolo 2 Kč za hodinu tisku.

Rovnice pro výpočet nákladů na provoz tiskárny bude vypadat následovně:

$$N_T = S_{ET} \times C_E \times D_T$$

$$N_T = 200 \times 0.005 \times 3.17$$

$$N_T = 3.17 \text{ Kč}$$

Kde:

S_{ET} [W] – Spotřeba energie tiskárny

$$S_{ET} = 200W$$

C_E [$\frac{\text{Kč}}{\text{kWh}}$] – Cena elektrické energie

$$C_E = 5 \left[\frac{\text{Kč}}{\text{kWh}} \right]$$

D_T [h] – doba tisku

Náklady na materiál

Cena za filament Gembird PLA+ je 579 Kč za 330m (1kg) což je 1.75 Kč za metr. Program Ultimaker Cura je schopen ukázat spotřebu materiálu v metrech pro každou tisknutou komponentu. Náklady na spotřebovaný materiál se vypočtou dle následujícího vztahu:

$$N_M = C_F \times S_F$$

$$N_M = 1.75 \times 8.8$$

$$N_M = 15.4 \text{ Kč}$$

Kde:

$C_F \left[\frac{\text{Kč}}{\text{m}} \right]$ – Cena filamentu za metr

$$C_F = 1.75 \frac{\text{Kč}}{\text{m}}$$

$S_F [\text{m}]$ – Spotřebovaný filament

Náklady na lidskou obsluhu

Cena za lidskou obsluhu byla volena na 250 Kč za hodinu. Hodnoty doby obsluhy jsou uvažovány při tisku zaplněné podložky tiskárny více komponentami, což zefektivní celý proces a zejména dobu obsluhy, která hraje ve výsledné ceně největší roli.

Vzorec pro výpočet nákladů na obsluhu bude vypadat následovně:

$$N_{CLP} = C_{LP} \times D_O$$

$$N_{CLP} = 250 \times 0.37$$

$$N_{CLP} = 91.67 \text{ Kč}$$

Kde:

$C_{LP} \left[\frac{\text{Kč}}{\text{h}} \right]$ – Cena lidské práce

$$C_{LP} = 250 \frac{\text{Kč}}{\text{h}}$$

$D_O [\text{h}]$ – Doba obsluhy

Náklady na postprocessing

Rovnice na výpočet nákladů na postprocessing bude vypadat následovně:

$$N_{PP} = C_{LP} \times D_{PP}$$

$$N_{PP} = 250 \times 0.27$$

$$N_{PP} = 67.5 \text{ Kč}$$

Tabulka 7. ukazuje dobu tisku jednotlivých komponent, dobu lidské obsluhy při tisku, spotřebovaný materiál v metrech, dobu lidské práce při postprocessingu a výslednou cenu komponenty.

Tabulka 7. Ceny komponent brýlí

Komponenta	Filament (m)	Doba tisku (min)	Doba obsluhy (min)	Postprocessing (min)	Výsledná cena (Kč)
Obroučky	2.44	40	2	4	30.61 Kč
Levá palička	2.39	59	3	5	39.48 Kč
Pravá palička	2.39	59	3	5	39.48 Kč
Levý štítek	0.79	16	7	1	35.25
Pravý štítek	0.79	16	7	1	39.25
Celkem	8.8	190	22	16	184.07

Zbylé náklady

Dále je třeba připočíst cenu za nakupovaný materiál, kterým jsou sklička brýlí za 34.01 Kč za pár, dva šroubky kupované za cenu 42 Kč za 100ks, lepidlo na štítky za 89 Kč, které vystačí na 100ks štítků, cenu spotřebované energie horkovzdušné pistole na tvarování obrouček a paliček, cenu za kompletaci brýlí a cenu příslušenství k brýlím. Horkovzdušná pistole má odběr 1000W což je v přepočtu 5Kč za hodinu. Doba tvarování obrouček a paliček pro jedny brýle je celkem 3 minuty, náklady na tvarování obrouček tedy jsou 15 Kč za spotřebu energie a 12.5 Kč náklady na obsluhu. Kompletace slunečních brýlí zabere celkem 5 minut, náklady na kompletaci vyjdou na 20.83 Kč. K brýlím bude v balení přidáno i pouzdro s nákupní cenou 38.2 Kč a čistící hadřík s cenou 4.8 Kč.

Náklady na tvarování komponent se vypočtou dle následujícího vztahu:

$$N_{TV} = (C_{LP} + S_{EHT}) \times D_{TV}$$

$$N_{TV} = (250 + 5) \times 0.05$$

$$N_{TV} = 12.75 \text{ Kč}$$

Kde:

$N_{TV} [Kč]$ – Náklady na tvarování komponent

$D_{TV} [h]$ – Doba tvarování

$S_{EHT} \left[\frac{Kč}{h} \right]$ – Spotřeba horkovzdušné pistole

Náklady na kompletaci brýlí:

$$N_{KB} = C_{LP} \times D_K$$

$$N_{KB} = 250 \times 0.083$$

$$N_{KB} = 20.75 \text{ Kč}$$

$$N_Z = \text{Cena sklíčků} + \text{cena šroubků} + \text{cena lepidla} + \text{cena pouzdra} + \text{cena hadříku} \\ + N_{TV} + N_{KB}$$

$$N_Z = 34.01 + 2 \times 0.42 + 2 \times 0.89 + 38.2 + 4.8 + 12.75 + 20.75 = 113.13 \text{ Kč}$$

Dosazení do rovnice celkových nákladů:

$$N_C = N_T + N_M + N_{PP} + N_{CLP} + N_Z$$

$$N_C = 3.17 + 15.4 + 67.5 + 91.67 + 113.3$$

$$N_C = 291.04 \text{ Kč}$$

Nákupní cena tiskárny není započítána z důvodu využití tiskárny pro více projektů současně. Je možné připočíst náklady na údržbu tiskárny. Za rok provozu tiskárny bylo třeba vyměnit jeden krokový motor za 342 Kč, hot end z důvodu opotřebení teflonové trubice za 142 Kč a 3 trysky s cenou 68 Kč za 10ks. Celkové náklady na provoz tiskárny za rok činily 504.4 Kč. Vezmeme-li v potaz roční produkci 100ks, náklady na údržbu tiskárny vyjdou v přepočtu na 5,05 Kč za jedny brýle.

Výsledné výdaje při zohlednění opotřebení tiskárny se potom vypočtou:

$$N_{VÝSLEDNÉ} = N_C + N_{UT}$$

$$N_{VÝSLEDNÉ} = 291.04 + 5.05 = 296.09 \text{ Kč}$$

Kde:

$N_{UT} \left[\frac{\text{Kč}}{\text{kus}} \right]$ – Náklady na údržbu tiskárny

$$N_{UT} = 5.05 \frac{\text{Kč}}{\text{kus}}$$

$N_{VÝSLEDNÉ} \left[\frac{\text{Kč}}{\text{kus}} \right]$ – Výsledné náklady po započítání údržby tiskárny

Do výpočtu nebyla zahrnuta cena na vývoj produktu, jelikož byl tento vývoj součástí studijních účelů. Cena za vývoj by velmi ovlivnila výslednou cenu produktu, vezmeme-li v potaz produkci do 100 kusů za rok a desítky hodin práce investované do vývoje produktu.

ZÁVĚR

Výsledkem diplomové práce je funkční prototyp slunečních brýlí, se štítky s volitelným nápisem, připravený pro malosériovou výrobu. Vlastnosti modelu byly optimalizovány za pomoci výpočtů a ověřeny MKP. Prototyp dosahuje dostatečné pevnosti převyšující pevnost běžných slunečních brýlí použitých při experimentálním měření pevnosti. Dále byl proveden experiment se žiháním materiálu PLA+ od výrobce Gembird, který vyvrátil zlepšení pevnosti v tahu po žihání materiálu tisknutého kolmo k tiskové podložce. Pevnost v tahu se naopak po žihání zhoršila, takže metoda nebyla u modelu využita. Bylo provedeno technicko ekonomické zhodnocení a stanoveny náklady na výrobu slunečních brýlí. Největším nákladem na výrobu slunečních brýlí je lidská práce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Parts-of-eyeglass-frames. *Heffingtons* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://heffingtons.com/parts-of-eyeglass-frames/>
2. Parts-of-Eyeglass-Frame. In: *Heffingtons* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://heffingtons.com/wp-content/uploads/2020/02/Diagram-of-Eyeglasses-Parts-of-Eyeglass-Frame-768x513.jpg.webp>
3. Sunglasses. *Visioncenter* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.visioncenter.org/sunglasses/>
4. Wayfarers-.jpg. In: *Visioncenter* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.visioncenter.org/wp-content/uploads/2023/01/Wayfarers-.jpg>
5. Aviators-.jpg. In: *Visioncenter* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.visioncenter.org/wp-content/uploads/2023/01/Aviators-.jpg>
6. Browline-Sunglasses-.jpg. In: *Visioncenter* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.visioncenter.org/wp-content/uploads/2023/01/Browline-Sunglasses-.jpg>
7. Square-Sunglasses-.jpg. In: *Visioncenter* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.visioncenter.org/wp-content/uploads/2023/01/Square-Sunglasses-.jpg>
8. Round-Sunglasses-.jpg. In: *Visioncenter* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.visioncenter.org/wp-content/uploads/2023/01/Round-Sunglasses-.jpg>
9. Wrap-Around-Sunglasses-.jpg. In: *Visioncenter* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.visioncenter.org/wp-content/uploads/2023/01/Wrap-Around-Sunglasses-.jpg>
10. Shield-Sunglasses-.jpg. In: *Visioncenter* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.visioncenter.org/wp-content/uploads/2023/01/Shield-Sunglasses-.jpg>
11. *How Sunglasses Are Made: History and Production* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.tomorrowstoday.com/2020/07/29/how-sunglasses-are-made-history-and-production/>
12. *How are glasses made?* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.bantonframeworks.co.uk/blogs/guides/how-glasses-are-made>
13. *3D-Printed Eyewear* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/industries/3d-printed-eyewear>
14. *3D Printed sunglasses* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/best-3d-printed-sunglasses/>
15. Multi-jet modeling (MJM). *Gwp-ag* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.gwp-ag.com/services/prototyping/rapid-prototyping/multijet-modeling/529.Multi-jet-modeling-MJM.html>
16. MJM 1024x281.png. In: *3dtisk-online.cz* [online]. [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/wp-content/uploads/2019/02/MJM-1024x281.png>
17. *3D Printed sunglasses* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
18. GIBSON, Ian, David W. ROSEN and Brent STUCKER. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, 2010. P. 459. ISBN 14-419-1120-0.
19. *Lamination object manufacturing* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

20. SLA. In: *3dtisk-online.cz* [online]. [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/wp-content/uploads/2019/02/SLA-1024x280.png>
21. *FFF vs FDM: Difference and Best Printers* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://top3dshop.com/blog/fff-vs-fdm-difference-and-best-printers>
22. *FDM* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/wp-content/uploads/2019/02/FDM-1024x279.png>
23. *Fused-deposition-modeling-fdm* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
24. *FDM*. In: *3dtisk-online.cz* [online]. [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/wp-content/uploads/2019/02/FDM-1024x279.png>
25. *3dees.cz* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://www.3dees.cz/3d-tisk-hp-seriova-vyroba?gclid=CjwKCAjwYKjBhB5EiwAiFdSfgfRx6sGrD8qvRJkc-uTkjYTHhL9TZGCTD6FPkzI3FXDYolbiQrpxxoCPFoQAvD_BwE
26. *MJF Process*. In: *Facfox.com* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://facfox.com/wp-content/uploads/MJF-Process.jpg>
27. *Fused-deposition-modeling-fdm* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
28. *Printer frame* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://ae01.alicdn.com/kf/H878ff1f872ac46e88d6f0def826e3c319/3D-Printer-BLV-MGN-12-Printer-Frame-2020-2040-Build-Size-200X200X350MM.jpg_Q90.jpg_.webp
29. *Helios 200 heat bed* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.panucatt.com/product_p/hbp200.htm
30. *Hotend* [online]. In: . [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://filament2print.com/img/cms/blog/94/hotend%20en.jpg>
31. *Direct-Drive-Bowden-Extruder-Assembly* [online]. In: . [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/wp-content/uploads/2022/07/Direct-Drive-Bowden-Extruder-Assembly.jpg>
32. *Printcase* [online]. In: . [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.alveo3d.com/wp-content/uploads/2022/06/printer-case-800-full.jpg>
33. *3D printing technology – Delta versus Cartesian* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://tractus3d.com/knowledge/learn-3d-printing/3d-printing-technology-delta-versus-cartesian/>
34. *Altair3* [online]. In: . [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.printspace3d.com/wp-content/uploads/2017/01/Altair3_NoDoor_MediaPage_WEB.jpg
35. *All About Wood 3D Printing Filament: Materials, Properties, Definition* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/wood-3d-printing-filament/>
36. *PLA Plastic/Material – The Ultimate Guide*. *All3dp* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-pla-plastic-material-properties/>
37. *Prusament PETG*. *Prusament* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>
38. *Abs-filament-brands-compared*. *All3dp* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/abs-filament-brands-compared/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

39. Asa-filament-explained-and-compared. *All3dp* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/asa-filament-explained-and-compared/>
40. Nylon-3d-printing-how-to-get-nylon-3d-printed. *All3dp* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/nylon-3d-printing-how-to-get-nylon-3d-printed/>
41. Best-3d-slicer-software-3d-printer. *All3dp* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-3d-slicer-software-3d-printer/>
42. Anatomy-of-a-3d-printer. *Matterhackers* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/articles/anatomy-of-a-3d-printer>
43. 3d_printer_nozzle_guide. In: *Top3dshop.com* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://top3dshop.com/image/catalog/blog/review_2/3d_printer_nozzle_guide/image_5.jpg
44. Vse-o-tryskach-s-ruzny-m-prumerem. *Josefprusa* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruzny-m-prumerem/>
45. 3d-printer-layer-height-how-much-does-it-matter. *All3dp* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-layer-height-how-much-does-it-matter/>
46. Layer_height. In: *Josefprusa* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://josefprusa.cz/wp-content/uploads/2018/05/layer_height_cz-1024x281.jpg
47. Introduction-fff-technology-3d-printing-important-parameters. *Bcn3d* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.bcn3d.com/introduction-fff-technology-3d-printing-important-parameters/>
48. Fdm 3d printing post processing. *All3dp* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fdm-3d-printing-post-processing-an-overview-for-beginners/>
49. Infill_density. *Static.cytron* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://static.cytron.io/image/tutorial/a-simple-guide-to-infill-in-3d-printing/infill_density.png
50. Rectilinear. *Help.prusa3d* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/wp-content/uploads/2021/01/rectilinear_final-2048x1536.jpg
51. Plastefinal. In: *Help.prusa3d* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/wp-content/uploads/2021/01/plastefinal-2048x1536.jpg>
52. P1644551. In: *Blog.prusa3d* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://blog.prusa3d.com/wp-content/uploads/2020/05/P1644551-1536x864.jpg>
53. How to improve your 3D prints with annealing. *Blog.prusa3d* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/how-to-improve-your-3d-prints-with-annealing_31088/
54. Cw1pu. In: *3dprinting.stackexchange* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://i.stack.imgur.com/cw1pu.jpg>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
b	šířka plochy pantu	[mm]
b_{skut}	skutečná šířka plochy pantu	[mm]
C_E	cena elektrické energie	$[\frac{Kč}{kWh}]$
C_F	cena filamentu za metr	$[\frac{Kč}{m}]$
D_O	doba obsluhy	[h]
D_T	doba tisku	[h]
D_{TV}	doba tvarování	[h]
F	obecná síla	[N]
F_{AX}	síla v ose x	[N]
F_{AY}	síla v ose y	[N]
F_B	síla v bodě B	[N]
F_{KRIT_HORIZ}	kritická síla změřená při zatížení v horizontální rovině	[N]
F_{KRIT_VER}	kritická hmotnost změřená při zatížení ve vertikální rovině	[N]
F_{TMAX}	maximální síla vyvozená trhacím zařízením	[N]
g	tíhové zrychlení	$[m \times s^{-2}]$
k	Součinitel bezpečnosti	[-]
l_R	Délka ramena paličky	[m]
M_C	Moment k bodu C	$[N \times m^{-1}]$
$m_{KRIT-VERT}$	kritická hmotnost změřená při zatížení ve vertikální rovině	[kg]
$m_{KRIT-HOR}$	kritická hmotnost změřená při zatížení v horizontální rovině	[kg]
N_C	Celkové náklady	[Kč]
N_{CLP}	Náklady na cenu lidské práce	[Kč]
N_M	Náklady na materiál	[Kč]
N_T	Náklady na provoz tiskárny	[Kč]
N_Z	Zbylé náklady	[Kč]
R_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
S	Obecná plocha	$[mm^2]$
S_{P1K}	Výsledná minimální plocha pantu	$[mm^2]$
S_{P1}	Plocha pantu	$[mm^2]$
S_{VZ}	Průřez vzorku	$[mm^2]$
S_{VZMAX}	maximální možný průřez vzorku	$[mm^2]$
S_{ET}	Spotřeba energie tiskárny	[W]
W_{OY}	Modul průřezu v ohybu	$[mm^3]$
σ	Obecné napětí	[Pa]
σ_{K1}	Průměrná hodnota pevnosti	[MPa]
σ_{dov}	Dovolené napětí	[MPa]
σ_{OY}	napětí v ohybu okolo osy y	[MPa]

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky

Označení	Legenda
STL	Přípona souboru modelu
