



Bakalářská práce

Hlava 3D tiskárny pro tisk skleněných objektů z optických vláken

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Michal Pospíšil

Vedoucí práce:

Ing. Michal Starý, Ph.D.

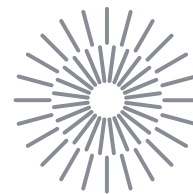
Katedra sklářských strojů a robotiky

Konzultant práce:

doc. Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.

Katedra sklářských strojů a robotiky

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

Hlava 3D tiskárny pro tisk skleněných objektů z optických vláken

<i>Jméno a příjmení:</i>	Michal Pospíšil
<i>Osobní číslo:</i>	S19000101
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra sklářských strojů a robotiky
<i>Akademický rok:</i>	2021/2022

Zásady pro vypracování:

3D tisk, jehož základní principy jsou již delší dobu známy, je v současné době předmětem intenzivního vývoje nových aplikací a nových materiálů pro tuto aditivní technologii. Jedním ze zkoumaných materiálů je sklo, ale výzkum zatím nepřináší univerzální a průmyslově použitelné řešení. V současné době je v rámci základního výzkumu na katedře zkoumána technologie 3D tisku skla založená na principu řízené depozice energie (directed energy deposition, DED). Technologie řízené depozice energie vytváří součásti přímým natavením materiálů na výrobek vrstvu po vrstvě. Cílem práce je vyvinout hlavu 3D tiskárny, která dopraví natavovaný materiál (skleněná optická vlákna) do místa působení CO₂ laseru. Hlava musí umožnit přísun minimálně 2 vláken do požadovaného místa působení laseru. Hlava také musí umožnit dopravení vláken různých průměrů a to s odchylkou místa depozice od požadovaného místa max. +/-0,2 mm.

Úkolem Vaší BP bude:

1. Provést rešerši možností provedení hlavy pro 3D tisk technologií řízené depozice energie.
2. Návrh koncepce hlavy 3D tiskárny formou několika variant řešení, provést potřebné experimenty k ověření navrženého principu a pomocí rozhodovací analýzy vybrat řešení vhodné pro realizaci.
3. Konstrukční řešení funkčního vzorku hlavy, která bude flexibilní a cenově dostupná.
4. Provést komplexní zhodnocení zařízení a rámcový návrh dalšího postupu prací.

Rozsah grafických prací: výkresová dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 30 – 40 stran textu
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] HEN Z., Z. LI, J. LI, Ch. LIU, Ch. LAO, Y. FU, Ch.LIU, Y. LI, P. WANG a Y. HE. 3D printing of ceramics: A review. Journal of the European Ceramic Society. 2019;39(4) : 661–687.
[2] HOTAŘ V., M. STARÁ, V. MAKOVÁ. Present state of 3D printing from glass. Přípravovaný text rešerše 3D tisku ze skla k vydání.
[3] GILBERT L. J. Design and fabrication of a system for the additive manufacturing of transparent glass, Masters Theses, MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2017.
[4] LUO J. Additive manufacturing of glass using a filament fed process, Doctoral Dissertations, MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2016.

Vedoucí práce: Ing. Michal Starý, Ph.D.
Katedra sklářských strojů a robotiky

Konzultant práce: doc. Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.
Katedra sklářských strojů a robotiky

Datum zadání práce: 22. listopadu 2021

Předpokládaný termín odevzdání: 22. května 2023

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

doc. Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 22. listopadu 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Hlava 3D tiskárny pro tisk skleněných objektů z optických vláken

Anotace

Bakalářská práce se zabývá řešením hlavy 3D tiskárny pro tisk skleněných objektů z optických vláken. Teoretická část uvádí základní poznatky z oblastí řízené energie navařování, skleněných optických vláken a CO₂ laserů. Navazující kapitola je věnována rešerši dosavadních hlav 3D tiskáren a podávacích mechanismů. Součástí rešerše je i provedení laboratorních experimentů pro ověření dosavadních výsledků natavování skleněných optických vláken CO₂ lasery. Dále je vypracováno několik návrhů, z nichž je pomocí rozhodovací analýzy vybrána vhodná varianta pro konstrukci hlavy 3D tiskárny s podavačem vláken. V technickém řešení dochází k realizaci zvoleného návrhu. Na konci práce jsou zhodnoceny technicko-ekonomické aspekty řešení.

Klíčová slova

aditivní technologie, skleněná optická vlákna, CO₂ laser, podavač vláken, hlava 3D tiskárny

3D printer head for printing glass objects from optical fibers

Annotation

The bachelor thesis deals with the design of a 3D printer head for printing glass objects from optical fibers. In the theoretical part, basic knowledge in the field of directed energy deposition, optical glass fibers and CO₂ lasers is presented. The following chapter is devoted to an overview of existing 3D printer heads and feeding mechanisms. It also includes the performance of laboratory experiments to verify the results of optical glass fiber fusion using CO₂ lasers. Furthermore, several designs are developed, from which a suitable variant of the 3D printer head design with filament feeder is selected using decision analysis. In the technical design, the selected design is implemented. At the end of the thesis, the techno-economic aspects of results are evaluated.

Key words

additive technology, optical glass fibers, CO₂ laser, filament feeder, 3D printer head

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalovi Starému, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a poskytnutí velmi cenných rad a informací při zpracování této práce.

Poděkování patří také vedení a všem pracovníkům katedry sklářských strojů a robotiky, kteří mi umožnili pracovat v prostorách laboratoří a poskytli další odborné rady.

Obsah

Úvod	9
1. Teoretická část	11
1.1 Řízená energie navařování	11
1.2 Skelná optická vlákna	13
1.3 CO ₂ laser	15
1.4 Rozbor dostupných aditivních metod výroby skla	16
2. Analýza a koncepční rozbor	19
2.1 Rešerše mechanismů technologických hlav	19
2.2 Konstrukční podmínky prostoru	21
2.3 Rešerše experimentů spojených s natavováním skelného vlákna pomocí CO ₂ laseru	25
2.4 Základní ověřovací experiment	29
2.5 Návrh řešení	36
3. Technické řešení	50
4. Technicko-ekonomické hodnocení	64
Závěr	67
Seznam literatury	69
Seznam obrázků	72
Seznam příloh:	75

Úvod

Lidé za posledních tři sta let nebyvale pokročily ve vývoji nových technologií. Tento sprint již v 18. století odstartovala první průmyslová revoluce vynálezem parních strojů. Následovala druhá a pak třetí průmyslová revoluce, kdy světlo světa spatřily první počítače. V té chvíli začalo lidstvo poprvé uvažovat o automatizaci. Od onoho momentu však uplynulo bezmála 40 let a znalosti značně pokročily i v dalších oblastech vědy a technologie, což vedlo k propojení chytrých technologií s procesem automatizace. Dnešní doba bývá označována jako čtvrtá průmyslová revoluce nebo také jako Průmysl 4.0.

Jedním z vedoucích technologií čtvrté průmyslové revoluce je aditivní výroba (AM). Velice pokročilá metoda založená na budování 3D objektů. Všeobecně je nazývána 3D tisk. AM v posledních několika desetiletích změnila způsob, jakým se hledí na výrobu tvarově složitých dílů.

Myšlenka něčeho jako je 3D tisk se objevila již ve 20. letech minulého století ve společnosti Kodama. Jejich koncept bych schopný vytisknout celý objekt z jednotlivých vrstev fotopolymerního materiálu, který následně ztvrdnul pod ultrafialovým (UV) světlem. V 80. letech téhož století podal patent na proces Stereolitografie (STL) Charles Hull, zakladatel společnost 3D Systems, jež existuje dodnes [1].

Aditivní technologie umožňují tisknout s vysokou přesností a dovolují vytvářet složité tvary bez nutnosti použití spousty drahých nástrojů, matic nebo odlévacích forem. Charakteristickým rysem 3D tisku je tisk objektu vrstvu po vrstvě. To umožňuje konstruování lehkých struktur, které by byly jinými konvenčními metodami výroby špatně realizovatelné [2]. Nemalou výhodou je určitě i množství odpadu. Během tisku se používá jen ten materiál, který je nataven, vytvrzen nebo jinak navázán do výsledné struktury. Výjimkou jsou podpůrné struktury, protože udržují stabilitu a umožňují vrstvení materiálu. Další předností je rychlost samotného procesu vzniku dílu. Díly vyrobené AM jsou vyhotoveny ve velmi krátkém čase. To umožňuje vývojovým oddělením zkoušet nové prototypy a vytvářet nové návrhy tak, aby se konečný výrobek dostal na trh co možná nejdříve.

Hlavy, jež se při těchto úkonech používají, jsou jednoduchá zařízení odpovídající daným technologiím. Tématem této experimentální práce je vyvinout hlavu 3D tiskárny pro technologii řízené depozice energie, jež dopraví skelná optická vlákna do místa expozice CO₂ laseru. Hlavy s podobnými vlastnostmi vedení vlákna do oblasti laseru jsou docela běžné. Výzvou v této práci bude vedení křehkého skelného optického vlákna, které v praxi nemá obdoby, a proto bude nutné vyvinout podavač, který to umožní.

Cílem následujících kapitol je provést rešerši stávajících řešení, navrhnout proveditelné alternativy a uskutečnit nutné experimenty k ověření navržených principů. Dále následuje konstrukční řešení funkčního vzorku hlavy, které by mělo být flexibilní a cenově dostupné. Jelikož se jedná

o experimentální práci, tak by měla být použita především zařízení nebo komponenty nacházející se ve skladu katedry, aby se dosáhlo minimalizace nákladů na výstavbu.

Poslední kapitolou je technicko-ekonomické zhodnocení, jež určí, zdali práce dosáhla požadovaných výsledků a jestli nevznikly zbytečné náklady.

Teoretická část

Aditivní výrobní technologie rozdělujeme podle metod vedoucích k formování výsledného dílu. Mezi AM patří fotopolymerizace, laminování deskového materiálu, tepelná fúze prášků, tryskání materiálu, extruze materiálu, tryskání pojiva a řízená energie navařování. Jednotlivé procesy se odlišují nejen přístupy, ale také aplikovanými materiály. Tématem této práce je technologie 3D tisku spjatá s technologií laseru, proto se následující podkapitoly zabývají řízenou energií navařování, skelnými optickými vlákny, CO₂ lasery a nakonec rozbohem dostupných aditivních technologií zaměřených na tisk skla.

1.1 Řízená energie navařování

Directed energy deposition (DED), v českém překladu řízená energie navařování, je velmi inovační AM proces. Navzdory nevýhodám způsobeným hlavně vlivem laseru se těší na akademické půdě stále větší oblibě [3]. Klasické zařízení pro metodu DED disponuje čtyř až pětiosým ramenem, které drží hlavu s podávacím zařízením drátů nebo prášků. Součástí hlavy bývá, ale nemusí být, i laser. Zatímco ve spoustě případů se pohybuje rameno a tištěný objekt zůstává ve statické poloze. Lze tento proces obrátit, aby se pohyboval objekt a laser naopak stál na místě. Volba rozpoložení stroje závisí na zvolené aplikaci. Při práci s kovovými vlákny, které vyžadují vyšší teploty pro vznik taveniny, je třeba dodat větší množství energie, což má pak dopad na potencionální velikost laseru a na konstrukční řešení stroje jako celku.

Materiál je ze zásobníku skrz hlavu přiveden na místo expozice, kde je nataven paprskem laseru. V případě technologie DED existují pouze dvě formy materiálu a to v podobě prášku nebo filamentu. Přestože metoda nabízí uplatnění polymerů, keramiky a jiných kompozitů s kovovou maticí, tak je primárně cílená na kovové prášky.

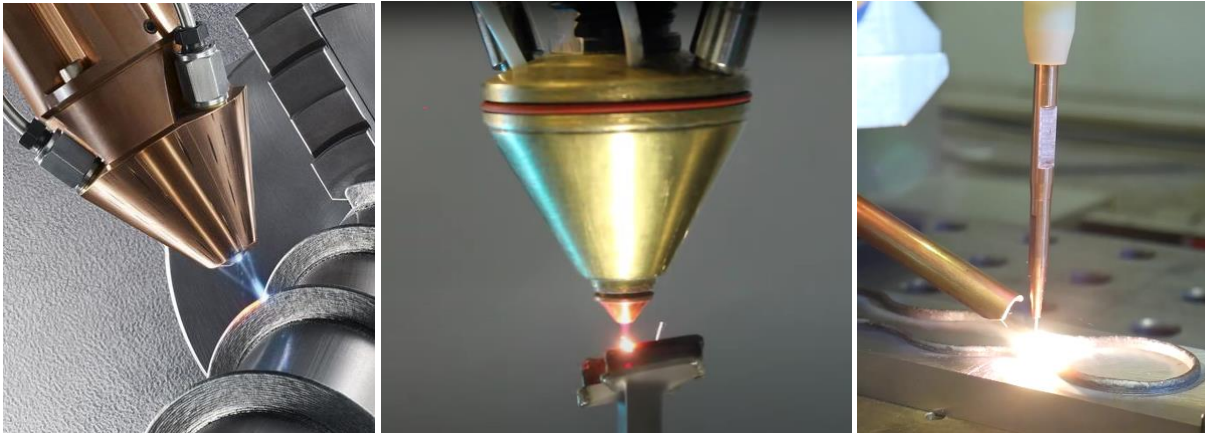
Laser based metal deposition (LBMD) je nejběžnějším systémem využívajícím kovový prášek. LBMD má hlavu pro tisk skládající se z laseru, který prochází středem hlavy. Dále se skládá také z trysek pro tok práškového materiálu a trysek pro plyn s ochranou atmosférou. Plyn má antioxidační účinky a zabraňuje přístupu vnějšího vzduchu k tavenině. Otvory pro výstup prášku a plynu zpravidla nejsou ve vertikální poloze, kinetická energie částic značně převyšuje efekt gravitace a ve výsledku tedy nezáleží na mírném sklonu trysek od vertikální osy. Díky jejich mírnému náklonu se společně s paprskem laseru střetávají v konkrétním bodě, kde vzniká tavná lázeň. Částice vlétávají do místa expozice a s působením laserového paprsku se roztaví. Paprsek má relativně malou plochu záběru, v průměru okolo 0,1–0,5 mm v závislosti na vzdálenosti od jeho ohniska. Jak se hlava postupně posouvá, tak se mění i poloha lázně a místa, jež prošla tavením, velmi rychle chladnou. Pokles teploty taveniny po vystavení okolnímu prostředí se pohybuje okolo 1000–5000 °C za sekundu [4].

Následující a velmi podobnou metodou je technologie s názvem **Laser Engineered Net Shaping** (LENS), která byla vyvinuta a následně patentována společností Optomec. Na rozdíl od LBMD se celý proces LENS odehrává v hermeticky uzavřené komoře. Komora je naplněna argonem, aby se zabránilo možnému vzniku oxidů a nitridů a tím zhoršování mechanických vlastností tištěné vrstvy. Dalším rozdílem je také laser. Pro tisk je zde připraven Nd:YAG laser, v dnešní době nejpoužívanější typ pevnolátkového laseru [5]. Jedná se o čtyřúrovňový výkonný pevnolátkový laser, jenž je založen na bázi neodymu (Nd) [6]. Analogicky je i v LENS veden prášek přímo přes hlavu do bodu společného pro tok materiálu i působení laseru.

EBAM neboli **Electron Beam Additive Manufacturing** je metodou, jež využívá podávání drátového materiálu. Technologie vyvinula společnost Scianky a stala se i její obchodní značkou. Systém Scianky dokáže natisknout, kupříkladu z titania, tantalu nebo niklu, velký počet vrstev ve velmi krátkém čase. EBAM využívá takzvaný elektronový paprsek k natavování přiváděného vlákna [7]. Elektronový paprsek je proud elektronů, který dopadem na povrch předmětu přemění svou kinetickou energii na teplo a slabé elektrické pole. Pro správné fungování paprsku je důležité, aby proces probíhal ve vakuově uzavřené komoře. Vzduch totiž obsahuje řadu různých plynů a tedy molekul, s nimiž by elektrony mohly přijít do kontaktu ještě před povrchem vlákna [8].

Wire and Laser Additive Manufacturing (WLAM), jak už název napovídá, je obdobnou aditivní technologií přímo určenou pro využití laseru a kovových drátů jako zdroj materiálu. WLAM je unikátní ve způsobu, kterým vnáší do 3D tisku myšlenku větších částic ke spojení pojivem. Metoda využívá substrátu jako pojiva pro kontinuálně podávaný materiál ve formě filamentu. Proces tisku vypadá následovně. Hlava zařízení generuje laserový paprsek, který dopadá na substrát a vytváří tavnou lázeň. Z boku je přiváděn tryskou drát, jež se smáčí v lázni z pojiva a následně roztaví. Vznikne tak metalurgická vazba drátu a pojivého substrátu. Smíšená tavná lázeň má po vzdálení laseru tendenci se chovat jako klasická kapka. A podobně jako kapka formuje na povrchu substrátu vlivem napětí kuličky.

Stroj obvykle disponuje i ochranou atmosférou a kabinou pro odvětrávání výparů vznikajících během děje. Technologie je velmi univerzální a je možné s ním vyrobit spoustu různých slitin. Substrát i filament lze zároveň nahradit rozličnými kompozitními materiály, a tak svým způsobem seskupit požadované vlastnosti. Nevýhodou WLAM je právě její jedinečnost, konkrétně pojivo ve formě substrátu. Substrát je zároveň základnou pro tisk, a proto díly vyrobené touto metodou vyžadují postprocessing nejméně ve formě oddělení výrobku od podstavy. Další úpravy závisí na volbě materiálu drátu a substrátu pojiva [9].



Obrázek 1: Vlevo je hlava LBMD od Trumpf [10], uprostřed hlava LENS od Optomec [11] a vpravo hlava pro technologii WLAM [12].

1.2 Skelná optická vlákna

Optická vlákna se v dnešní době jeví jako snadný prostředek pro přenos digitalizovaných dat na kilometry dlouhé vzdálenosti bez nutnosti dodatečného zesílení a s minimálním rozptylem. Jedná se o prostředí se dvěma různými indexy lomu, které dokonale odráží elektromagnetické vlny ve směru osy. Zdrojem elektromagnetických vln je zpravidla světlo nebo infračervené záření. Ve většině komerčně vyráběných optických vláken jsou jádra vyrobena z polymerů (např.: polymethylmetakrylátů [13]) nebo skla.

Vlastnosti skla a skelných optických vláken

Sklo je anorganický nekystalický materiál s dobrými mechanickými vlastnostmi známými především pro svou vysokou optickou průhlednost a teplotní a chemickou odolnost. Z technického hlediska nemá ani pevnou ani kapalnou formu skupenství, ačkoliv má vlastnosti obou forem [14]. Vyznačuje se také izoentropními vlastnostmi, což znamená, že struktura materiálu má stejné vlastnosti v radiálním i axiálním směru. Vzhledem k vysokému Youngovu modulu pružnosti je sklo velmi pevné. U běžných skel se nejvyšších hodnot dosahuje hlavně v oblasti pevnosti v tlaku (až okolo 1 GPa). U skelných vláken výrazně závisí na zvolené aplikaci, ale u většiny se kvůli jisté manipulaci značně zvýší i hodnota pevnosti v tahu [15]. Díky těmto rozmanitým vlastnostem jsou skla vhodná pro jádra optických vláken, které v některých vybraných případech musí odolávat extrémním podmínkám.

Skelná vlákna jsou amorfní struktury skládající se zhruba 46–75 % z oxidu křemičitého (SiO_2) [16]. K přidaným složkám mohou patřit různé oxidy železa, hliníku, vápníku nebo bóru. Vlákna jsou tedy vyráběna ze směsi křemenného písku, vápence a dalších oxidických sloučenin. Lze je libovolně modifikovat tak, aby vznikly vlastnosti odpovídající jejich určení.

Chemická struktura křemene obsahuje molekuly, jež mají tvar pravidelného čtyřstěnu. Uprostřed každé molekuly leží centrální atom křemíku, ke kterému jsou jednoduchými vazbami připojeny atomy kyslíku. Modifikaci těchto bází lze provést pomocí iontů sodíku Na^+ a vápníku Ca^{2+} .

Ionty se vážou na iontové vazby kyslíku, což vede k menším změnám viskozity skla [17]. Sodík funguje jako tavící a modifikační aditivum, jež snižuje teplotu tání a narušuje vznik krystalických zárodků. Vápník zastává stabilizační úlohu a zvyšuje chemickou odolnost [15].

Druhy skelných vláken

Nejznámějším sklem pro výrobu skelných vláken je jednoznačně E-sklo. E v názvu pochází z anglického slova electrical, jelikož má výborné izolační vlastnosti. Je možné jej označovat také jako E/CR-sklo, protože disponuje kromě izolačních atributů i odolností proti korozi. A pro svou nízkou cenu, se tak stalo preferovanou konstrukční variantou při řešení izolací [16].

Dalším druhem skelného vlákna je S-sklo a S2 sklo. S značí pevnost (strenght). S-sklo je velmi pevné, ovšem velmi drahé. Alternativním řešením je využití uhlíkových vláken, která poskytnou stejné vlastnosti za mnohem nižší cenu. [16]

C-skla jsou odolná proti korozi a jiným agresivním chemikáliím. Využívají se v laboratořích, na lodích nebo na výrobu krycích fólií [16, 18]. Podobné E-sklu jsou D-skla, kde D označuje dielektrikum. To se používá převážně pro elektrotechnické účely v zónách vysokého napětí. Existují i další skelná vlákna jako jsou například A-skla, R-skla, AR-skla a T-skla. Prakticky to jsou varianty výše zmíněných skel a pouze se jedná o jejich evropské nebo americké alternativy [19].

Výroba optických vláken

Výchozí surovinou pro výrobu skla jsou sklářské písky (tavné písky). To jsou světlé až bílé sedimentární horniny, jejichž hlavní složkou je oxid křemičitý. Čistý křemen se v přírodě nachází velice vzácně, a proto se používá pískovec. Pískovec obsahuje velké množství křemene a je jeho hlavním zdrojem. Než pískovec lze použít pro výrobu skla, musí projít řadou procesů, při kterých se zbaví kromě přebytečných usazenin také vlhkosti. Výsledkem je křemenný písek až s 99% obsahem SiO_2 [20].

Sklo vzniká, když je tavenina ochlazena dostatečně velkou rychlostí, aby nestačilo krystalizovat a nejlépe nevytvořilo žádnou krystalickou hmotu. Kontrola probíhá pod optickými nebo elektronovými mikroskopy. Vzniklé krystaly dokáží reflektovat paprsky světla, což může mít za následek špatné vedení světla optickými vlákny na delší vzdálenosti.

Autor odborné publikace Optical Fiber Communications, John M. Senior, výrobu rozděluje do dvoufázových výrobních procesů, které vedou k přípravě skelného vlákna. Procesy se skládají nejprve z přípravné části, ve které se vytváří tyč nebo předlisek z čistého skla. Materiál se tak jednoduše přichystá na vhodnou aplikaci. V druhé fázi se k formování výrobku využijí techniky tavení a tažení, jež vytvoří strukturu vlákna. Metoda tavení a tažení je nejpoužívanější metodou výroby skelného filamentu. Pro modifikaci vlastností se uplatňuje metoda depozice plynné fáze, při níž se kolem vlákna zformuje ochranný povlak ochraňující jádro před vnějšími vlivy [21].

1.3 CO₂ laser

Laser neboli zesilování světla stimulovanou emisí záření (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) na bázi oxidu uhličitého, je jedním z prvních vynalezených laserů a zároveň nejsilnějších komerčně využívaných plynových laserů. Tyto plynné lasery s kontinuální vlnou jsou díky správnému poměru výstupního výkonu a výkonu emisí, který se může pohybovat okolo 20 až 25 %, velmi efektivní. Laser vytváří paprsek elektromagnetické vlny nazývaný se infračervené záření ve vlnových délkách od 9 do 11 μm . Tento typ vlnové délky není možné vidět lidským okem, jsou totiž mnohem delší než vlny viditelného spektra. Podobnou formu záření vyzařuje například slunce [22].

C. Kumar N. Patel, vynálezce CO₂ laseru, vytvořil první prototyp už v roce 1964 ve společnosti Bell Labs [23]. K objevu ovšem nedošel náhodou. Patel chtěl dosáhnout co nejvyššího výkonu laseru. Nejprve pracoval s helium-neonovými lasery, které měly na několika metrových vzdálenostech malý výstupní výkon kolem 150 mW. Proto se rozhodl prozkoumat perspektivu laserových vlnových délek na vibračních přechodech molekul a vypočítal, že oxid uhličitý by měl vyzařovat vlnovou délku okolo 10 μm . Při prvním pokusu tak pozoroval nejvyšší kontinuální výkon, jaký byl u laserů zaznamenán. V polovině roku 1965 pak dosáhl účinnosti 10 % při stálém výkonu 200 W [24].



Obrázek 2: Fotografie hlavy gravírovacího zařízení s CO₂ laserem.

Princip laseru

Laser na plynné bázi oxidu uhličitého funguje tak, že stimuluje elektrony v molekulách plynu, které uvolňují energii ve formě světla. Laserová trubice CO₂ laseru obsahuje plynnou směs oxidu uhličitého, dusíku (N₂) a helia (He), která je uzavřena v trubici. V trubici se nacházejí také dvě zrcadla umístěná na protilehlých koncích [25, 26].

Směs plynů je uvnitř trubice buzena elektrickým výbojem s vysokým napětím, který způsobí, že molekuly dusíku a helia začnou vibrovat a srážet se s molekulami oxidu uhličitého, jež po srážce excitují do vyššího energetického stavu. Když se excitované molekuly oxidu uhličitého chtějí vrátit zpět do stavu s nižší energií, deexcitují a odevzdají okolí rozdíl energetických hladin. Deexcitace je doprovázena spontánním uvolněním fotonů v podobě světla o vlnové délce 10,6 μm [25–27].

Zrcadla na obou koncích laserové trubice vytvářejí reflektivní síť neboli optický rezonátor odrážející paprsek světla tam a zpět, kontinuálně sbírající další fotony, a tak zvyšující jeho intenzitu. Gradace energie není nekonečná, protože jedno ze zrcadel je vyrobeno jako polopropustné a po nespočtu odrazů je proud fotonů vypuštěn do prostoru. Proud fotonů je koherentní, takže veškeré vlny jsou ve stejné fázi, mají totožnou vlnovou délku a šíří se v tomtéž směru [25–27].

Laserem generovaný paprsek má velkou intenzitu a lze jej použít pro širokou škálu aplikací. Například řezání, svařování a gravírování.

1.4 Rozbor dostupných aditivních metod výroby skla

Konvenční technologie sklářského průmyslu se neustále zdokonalují. Ještě v minulém tisíciletí byla valná většina veškerého skla vyráběna ručně. Roztavil se sklářský písek, přidaly se potřebné přísady pro zlepšení vlastností a pak se manuálně tahalo a foukalo, dokud z toho nevzešlo hotové sklo. Vyráběly se tak veškeré komponenty do domu, počínaje okny a konče sklenicemi na víno.

Skla pro optické účely byly dělány podobnými způsoby. Například dobře známé optické čočky byly, před vynálezem českým profesorem Vysoké školy chemicko-technické v Praze Ottou Wichterlem, vyráběny především ze skla pro jeho optické vlastnosti a chemickou odolnost.

Průmyslová revoluce konce 18. a začátku 19. století znamenala pro průmyslovou výrobu přechod od ruční kusové výroby k manufakturní výrobě [46]. Od té doby byla snaha procesy co nejvíce zjednodušit a následně i automatizovat. Konstrukteři a technologové, potýkající se s nákresy sklářských strojů, museli čelit podobným výzvám jako dnešní 3D tisk. A to, jak zhotovit svou výrobní metodou produkt s podobnou kvalitou.

Zásadní otázkou tedy je, jestli jsou aditivní technologie schopné plně napodobit konvenční výrobní postupy a zachovat podstatné vlastnosti tisknutého skla. Mezi kritické vlastnosti, které jsou potřeba zachovat, zajisté patří vlastnosti optické.

Obecně velkým problémem by mohl být charakteristický znak aditivních technologií výroby. Kladení vrstvu po vrstvě na sebe má své výhody, díky tomu je technologie schopná formovat složité tvary, které by jinými postupy byly jen těžko realizovatelné. Ale i vrstvení skla má svých pár problémů. Když se na sebe kladou jednotlivá patra, tak vznikají nové povrchy, které jsou v kontaktu s okolím. V případě uzavřené zóny tisku není problém s nečistotou v prostředí. Té se dá lehce předejít zavedením kupříkladu vakua. Problémem jsou rozdílné teploty. Teplota již nataveného materiálu je vždy jiná než teplota teprve přichozího. Cyklus tisku není nikterak složitý. Stroj vrství materiál po cyklech a vždy se stejnou dráhou. Obráceně tomu je u frézování, kde má stroj tendenci vykonat naopak co nejkratší dráhu a začíná tam, kde přestal. Pokud by zařízení neopakovalo cyklus a začínalo tam, kde skončilo, nebyla by vrstva jedolitá a tvořila by místa s odlišnou tloušťkou. Z hlediska optiky má nanášení vrstev vliv na izoentropii objektu. Výtisk proto má kolmo na směr vrstev odlišné optické vlastnosti.

Existuje několik technologií umožňujících tisknout objekty ze skla. První je Stereolitografie (SLA). Tato metoda se zaměřuje na využití fotopolymerů a překvapivě umí pracovat i s tekutým sklem. Jako tekuté sklo je označována polymerní směs, která obsahuje zrnka skelného materiálu. Polymer je v tomto případě pouze nositelem skelné složky. Po vytvrzení pod UV světlem vznikne zelené těleso. Tak se říká zpracovanému produktu, který stále nemá vhodné materiálové složení a obsahuje i některé

přebytečné složky, jichž je nutné se v následujících krocích zbavit. Poté dojde k dalšímu tepelnému zpracování s názvem „debinding“, při kterém se odstraní polymer a vznikne hnědé těleso, což je čistý sklovitý produkt s pórovitou strukturou. Debinding probíhá v rozmezí 500 až 600 °C, dokud se neodstraní veškerý polymer. Během posledního procesu spékání dojde k zacelení pórů a zmenšení velikosti tělesa. Změna velikosti je izotropická, tudíž relativně snadno počitatelná a pohybuje se kolem 20 % v závislosti na poměru směsi polymeru a skleněného písku [29].

Další aditivní technologií je Selective laser sintering (SLS). Laserové spékání materiálu je metodou využívající velkou základnu různých druhů materiálů. Na dosažení bodu tavení SiO₂ je zapotřebí dosáhnout teplot blížících se k 1600 °C. Pro běžné 3D tiskárny využívající polymerní směsi je to prakticky nedosažitelný vrchol, jelikož teploty při tisku zřídka přesáhnou 500 °C. Příkladem je PLA, které se taví při 160 °C, dále PET-G za 140 °C nebo ABS zhruba kolem 250 °C. Existuje však modifikovaný proces high-temperature selective laser sintering (HT-SLS), který se soustředí na spékání vysokoteplotních prášků. Prášek z oxidu křemičitého se vrství na desku pohybující se směrem dolů a laser vytvrzuje vrstvu po vrstvě. Pro vyvolání vysoké teploty je zapotřebí paprsek o dostatečném výkonu, nejspíše proto se pro tuto metodu rozhodly použít CO₂ laser, který patří mezi nejvýkonnější laserová zařízení současnosti. Vlnová délka CO₂ laseru 10,6 μm neumožňuje na skle vzniku transparentních vlastností a vytištěné části se tak stávají neprůhlednými. HT-SLS disponuje stolkem se schopností zahřívání tištěné oblasti. Veškeré materiály použité při stavbě stolku a komory obsahují složky oxidu křemičitého uplatněného při procesu. Jelikož se při tavení dosahuje teplot přesahujících 1000 °C, tak komora musí být izolovaná a jednotlivé komponenty chlazeny [29].

Když bude pominuta metoda DED, tak poslední metodou 3D tisku schopnou pojmout sklo je FDM (Fused Deposition Modeling) neboli FFF (Fused Filament Fabrication). Technologie FFF disponuje obrovskou základnou materiálů, proto není překvapením, že je též způsobilá k tisku skla. Jejím zastupitelem v oblasti skla je technologie G3DP neboli Glass 3D Printing. Tuto metodu vyvinul



Obrázek 3: Výrobky zhotovené tiskárnou G3DP [30].

Massachusettský technologický institut (MIT) už v roce 2015. Cílem projektu bylo vymyslet a vybudovat tiskárnu transparentního skla [29].

Zařízení taví sklo v komorách mimo zónu tisku, což umožňuje pojmout větší množství roztaveného materiálu. Jedná se o 3 rozdílné, ale navzájem propojené pece, z nichž každá přispívá k procesu utváření skleněné hmoty. V první peci dochází k udržování náležité teploty, která odpovídá správné viskozitě pro proces tisku. V další peci jsou sledovány důležité vlastnosti skla, myšlena především jeho homogenita. Temperací roztaveného skla se dosáhne plynulému vyrovnání rozdílu teplot v celém objemu taveniny, takže tavenina bude homogenní. V neposlední řadě přeteče ještě do druhé temperační pece, kde je tavenina mírně zchlazena na teplotu 480 °C a během níž jsou uvolněna přebytečná napětí. Celý postup taveniny pecí je završen výtokem taveniny na volnou desku. G3DP má desku umožňující pohyb ve vertikální rovině a trysku pohybující se v horizontální. Vyhřívaný stolek se přizpůsobuje hladině, zatímco hlava (tryska) vytlačuje materiál a ve 2D prostoru následuje počítačem stanovenou dráhu.

Jedná se časově náročný postup, jež je způsoben jednotlivými kroky zejména gravitačním výtokem taveniny. Samotná tavenina skla má několik předností. Jednou z nich je správná viskozita, jež je pozměněna hned v první peci. Pasta má dobré vlastnosti na tečení a zároveň je dostatečně stabilní, aby se nemusely využívat podpory. Autoři této práce se tak naprosto vyhýbají velmi ošemetné možnosti vzniku podpor, která by vedla k dalším operacím v rámci postprocessingu [29].

Dalším projektem nové generace FFF skelných tiskáren byl G3DP2, také zvaný GLASS II. Ten se poprvé objevil na milánském veletrhu Design Week 2017. Tato technologie byla totiž koncipována pro architektonické účely. Měla poskytnout dostatečně stabilní tisk skla pro instalaci velkých děl ve volném prostoru. Nové řešení přineslo větší prostor pro tisk. Nejméně dvakrát se zvýšil maximální rozměr tisknutého objektu, stejně tak tisknutého množství, a dokonce 12krát se zvětšil objem zásobníku. Novinky také přinesly odlišnou myšlenku pohybu stolku. Stolek se tentokrát hýbe v horizontální i ve vertikální rovině. Dle pozorování byly upraveny jednotlivé části pecí tak, aby se co nejvíce snížilo napětí a sklo získalo lepší vlastnosti. Podobné úpravy přišly i v designu tisku, kde byla vyvinuta sada výpočetních nástrojů pro kontrolu, aby se předešlo vzniku slabých míst [29, 31].

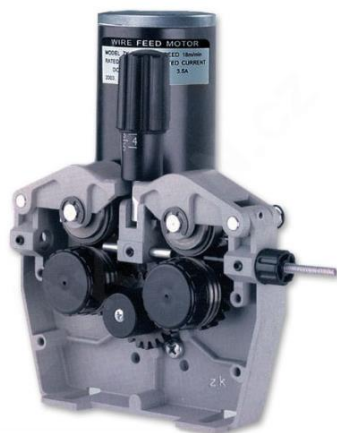
FFF, konkrétně G3DP a G3DP2 jsou prozatímními lídry v oblasti aditivních technologií výroby skla.

Analýza a koncepční rozbor

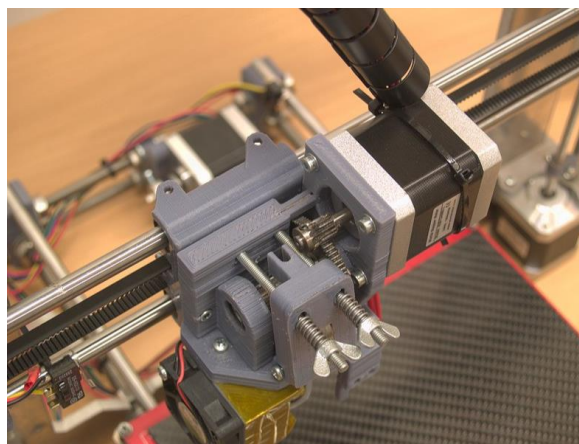
2.1 Rešerše mechanismů technologických hlav

Technologické postupy se neustále vyvíjí, takže se konstruuje nové zařízení s vyspělejšími mechanismy, jež ve spolupráci s elektrickými součástmi tvoří moderní koncepty. Ještě před dvěma sty lety, v letech druhé průmyslové revoluce, se většina konstruktérů zaměřovala na tvorbu mechanických zařízení bez možnosti elektrifikace. Přestože tyto ústrojí byla na dnešní dobu velmi jednoduchá, tak se opírala o základy vědy a techniky, jež by se dala použít i dnes.

Podavač je určen k přesunu materiálu nebo součástí z jedné operace na další, oproti dopravníku je pomalejší, protože pracuje s přesností a také je navržen tak, aby mohl zastávat více poloh. Lze jej nalézt u moderních 3D tiskáren, dále také při svařování a tkaní či drátování. Všude tam, kde je potřeba automaticky a přesně dopravit materiál do konkrétního bodu.



Obrázek 4: Podavač drátů pro svařování [32].



Obrázek 5: Podavač filamentu FFF tiskárny [33].

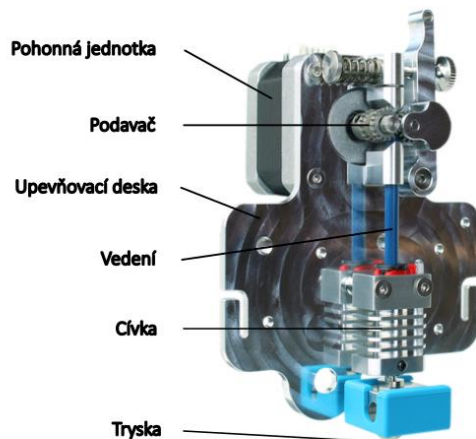
Na pravém výše položeném obrázku je zobrazena hlava zařízení s podavačem filamentu extruzní tiskárny FFF. Podavač je většinou součástí většího celku s názvem hlava. Hlava je u robotů charakterizována jako jeho součást, která obsahuje senzory, procesory a jiné komponenty, které jakkoliv umožňují robotu percipovat okolní prostor a interagovat s okolím nebo provádět jiné úkoly.

Procesory robota zpracují tyto podněty, aby mohl plnit zadané úlohy. Při převedení této myšlenky na objekt tiskárny je tak označováno zařízení, které se pohybuje v prostoru tisku a plní zadanou úlohu.

Obecně se hlavy tiskáren skládají z několika společných komponentů. Těmi jsou upevňovací deska či základna, jisté vedení a tryska. Ostatní komponenty záleží na zvolené technologii tisku. Na obrázku 6 je popsána hlava FFF tiskárny, která dále obsahuje také pohonnou jednotkou poháněný podavač, cívku a trysku.

Elektrinou poháněné podavače se používají, když proces vyžaduje přísun vybraného materiálu. Často tím bývá filament, ale může to být i prášek nebo pojivo. V obdobných procesech extruze se

spoléhá na viskozitu hmoty, která teče. Není tak zapotřebí podavač, ale je nutně zvýšen procesní čas, což má samozřejmě vliv na formování výrobku.



Obrázek 6: Popis hlavy náhodně vybraného tiskového zařízení FFF [34].

Podavač se skládá ze dvou rolen. Jedna z nich je udržována v chodu pohonnou jednotkou. Protože páka vytváří přítlak, který napomáhá přenosu momentu mezi rolnami, tak není nutné pohánět obě naráz. Ustrojí podavače je vsazeno do upevňovací desky. Ta zajišťuje prostorovou fixaci dílů hlavy při pohybu. Některé tiskařské hlavy nejsou upevněny na desce, protože nevyžadují pohyb. Mohou být tedy přimontovány přímo k základně stroje, která zůstává při procesu ve stabilní poloze. Důvodem připevnění na desku je pohyb. U technologií SLS (Selective laser sintering), FFF, DED, SLA a mnoha dalších lze aplikovat koncept pohyblivé hlavy. Hlava pomocí řídicího programu sleduje v prostoru dráhu tisku, zatímco plocha, na níž se tiskne, stojí. Pro proces se využívá rameno nesoucí hlavu, což umožňuje pohyb v osách x, y i z. Odpovídá to třem stupňům volnosti. Rozvržení pohybu tohoto formátu je nejpoužívanějším model pro stavbu tiskáren FFF, SLS a DED.

Oblíbeným a velmi uznávaným konceptem, zvláště pro metody SLA, SLS a BJ (Binder Jetting) je rozložení pohybového aparátu mezi stůl a hlavu. Všechny tři technologie fungují na principu velké vany, ve které je uložena deska s nějakým materiálem. Stůl má pouze jeden stupeň volnosti, takže se pohybuje nahoru a dolů, čímž se koriguje správná tloušťka natavované nebo tvrzené vrstvy. Zbylé dva stupně patří hlavě, jež ve 2D následuje jednotlivé vrstvy modelu předepsané programem.

Výjimkou nebývají ani stroje, jež mají 3 a více stupňů volnosti u hlavy nebo stolku. Dobrým příkladem jsou robotická ramena nesoucí svařovací hlavy, které se v automatizovaných linkách potřebují dostat do špatně přístupných míst. Je proto nutné nejen napolohovat hlavu, ale i správně nasměrovat obrobek. Ramena musejí tudíž, podobně jako lidské ruce, vzájemně spolupracovat, aby byly schopné splnit zadaný úkol. Nejenže kooperace nikdy není jednoduchá, ale aby mohla být ramena integrována do výrobních procesů, tak vyžadují správné nastavení a naprogramování, což znamená odborné proškolení pracovníků a tím se zvyšuje čas a už vzniklé vysoké pořizovací náklady. Na druhou stranu jsou schopná pracovat s vysokou přesností a rychlostí, navržená tak,

aby mohla vykonávat opakující se úkony v různých, dokonce i člověku nebezpečných, prostředích. Díky opakovatelnosti a všestrannosti bývají roboty použity jako dlouhodobé investice k nahrazení práce operátorů a jiného personálu.

Posledními díly konstrukčního řešení hlavy je vedení společně s tryskou. Systém vedení materiálu záleží vždy na zvolené technologii. Materiály vhodnými pro vedení jsou zpravidla tekutiny, pasty, prášky anebo filamenty. Tekutiny a pasty musí mít náležitou viskozitu, která dovoluje tok a nevytváří sraženiny. Nečistoty a jiné usazeniny mohou ucpat vedení a způsobit zástavu toku do místa expozice. Těmto problému se předchází výběrem trubic či odlišných vodících částí s co nejlepší úpravou vnitřního povrchu.

Vedení ústí do trysky. Tryskou se rozumí malá otvorová součást na konci vedení, která pomáhá proudit tekutině, plynu nebo jiným částicím ve stanoveném směru a jistou rychlostí. Existuje několik druhů trysek podle aplikace. Kromě klasických trysek, jež mají jen jeden výstup, jsou i takové, které svádějí dohromady více prvků. Typickým příkladem je tryska technologie LBMD se schopností svádět laserový paprsek a prášek. Postup tisku je popsán v podkapitole Řízená energie navařování s malým podnadpisem Laser based metal deposition, kde je vysvětlen i princip.

Způsob, jakým je laser a prášek sváděn do jednoho bodu by se též mohl dát aplikovat na jiné než práškové materiály, kupříkladu filamenty. Základní podmínkou procesu tavení s použitím vláken je zcela jistě vysokoenergetický laser, který generuje dostatečné množství energie k natavování. Dále také materiál, jež by neměl mít nikterak vysokou teplotu tání. Další vlastností filamentu by měla být ideální velikost. V procesu LBMD se používá prášek s velmi malými částicemi. Ty jsou pro laser doslova potravou, protože při vystavení energii paprsku se okamžitě roztaví. Klíčem je nejspíše jejich rozměr. Pokud by se to podobná ideologie aplikovala na vlákna, tak by stačilo do místa působení laseru přivádět vlákno dostatečně malých průměrů. Jehož částičky by byly navázány podobně jako korálky do tenkého provázku. Rozhodujícím faktorem pro využití takového postupu je zajisté průměr vlákna, který by nenarušil proces. Podle jeho velikosti by se mohlo stanovit technicko-ekonomické hledisko ceny a vývoje.

2.2 Konstrukční podmínky prostoru

Každé zařízení vyžaduje určitý prostor, a to ať se to týká bezpečnosti nebo práce samotného zařízení. Ve výhodě jsou jednoduchá zařízení pracující v komorách nebo jinak uzavřených prostorech, jelikož jejich rozměry odpovídají rozměrům, které je už předem stanovené. Opakem jsou ramena a hlavy ve volném prostoru, u nichž je potřeba stanovit maximální hranice pracovního prostoru pro zajištění bezpečnosti okolí.

Pracovní prostor hlavy 3D tiskárny skla bude zajisté uzavřený. Vychází se hlavně z konceptů podobných aditivních technologií výroby a požadavků na provoz laserového paprsku. Základem celého

zařízení tiskárny bude pravděpodobně kostra z hliníkových profilů s drážkami na vodící kameny. Výhodou těchto profilových koster je jednoduchost a cena. Drážky na kameny umožňují snadné, pevné spojení, zatímco hliníkový materiál je dobře tvářitelný a snadno se dá uzpůsobit požadované velikosti. Velikosti drážek jsou standardizované, takže i když se vybere jakýkoliv z různých druhů a tvarů profilů, tak je jisté, že je lze vzájemně spojit.

Rozměry prostoru budou odpovídat množství potřebných součástí. Součástmi potřebnými k provozu 3D tiskárny na principu Directed energy deposition jsou: laser, hlava, polohovací systém a stůl. Laser se skládá z iniciační trubice a komponentů pro nasměrování paprsku. Jelikož se jedná o CO₂ laser vyššího výkonu, nebude možné laser umístit přímo do ní. Součástí laseru je i laserová trubička, která slouží jako zdroj fotonového paprsku. Její rozměry jsou poměrně velké (zhruba 300–600 mm), tudíž jí nelze přímo umístit do hlavy, tak aby vedla paprsek. V tomto případě již není důležité řešit laser jako součást hlavy, ovšem je třeba uvažovat nad jeho pozicí, kvůli poloze podávacího zařízení a jeho možné modifikaci v rámci celku.

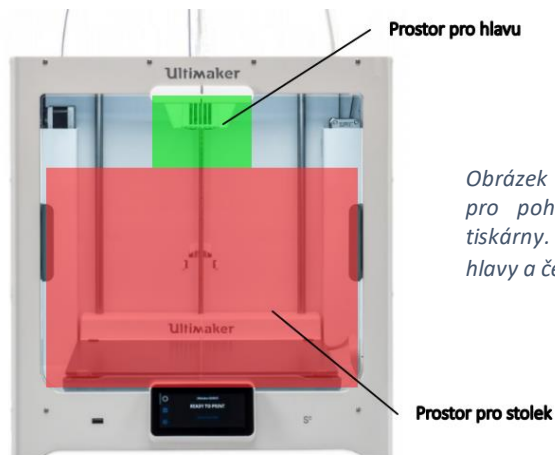
U konvenčně vyráběných gravírovacích laserových strojů se laser většinou umísťuje dozadu, tedy za plotter. Ze zadní strany zařízení je jednodušší směřovat většinu kabelového vedení a samozřejmě i chlazení laseru. Chlazení pro svůj chod potřebuje dostatek vody, takže by mělo být připojeno k stálému vodnímu zdroji.

Dle pozorování ostatních DED tiskáren bude vhodné jej situovat někam výše nad hlavu. Prostor pro operaci hlavy tak nebude ovlivněn umístěním dílů laseru.

Prostor se dále rozdělí mezi stůl a podávací hlavu. To, jaký budou mít minimální a maximální prostor částečně stanovují udělené možnosti pohybu daných částí. Je důležité říci, že po domluvě s vedoucím práce a vedením katedry bylo předem řečeno, že hlava bude navržena jako stacionární část, s možností mikropohybu ve 3 směrech a že bude paralelně s návrhem koncipován pohyblivý stůl.

Výhodou tohoto návrhu je hlavně zjednodušení při podávání optických skelných vláken. Skelná vlákna jsou do jisté míry pevná, ale jsou citlivá na ohyb. Navíc jakýkoliv malý lom znamená jisté riziko tvorby trhlinek. Při tisku by bylo nutností se pohybovat společně s hlavou, zásobník by tak musel být umístěn někde v těsné blízkosti, což by mělo nejspíše vliv na jeho velikost nebo počet vláken, který by byl schopný pojmout. V pevné poloze je tedy mnohem jednodušší přivádět materiál, a kromě toho i přesně navádět paprsek laseru. Velikost bodu, který vznikne vybuzením laseru, se odvíjí od optických vlastností čočky, kterou prochází světlo. Rozměr expozičního prostoru je tak v přímé závislosti na ohniskové vzdálenosti čočky. Ta by měla být vyrobena tak, aby soustředila co největší množství světla na co nejmenší místo, tedy ohnisko. Tím se docílí dostatečné množství energie k natavení objektu.

V případě sebemenší odchyšky může laser naprosto minout vlákno. Mohou to zapříčít Newtonovy síly při náhlém zastavení hlavy, dále také vlastní frekvence motoru pohybového ústrojí atd. [35].



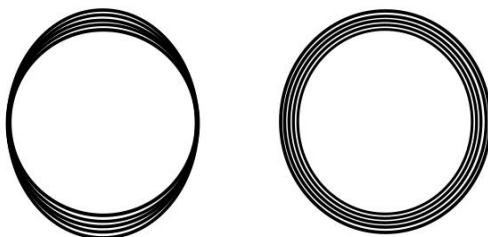
Obrázek 7: Příklad velikosti pracovního prostoru pro pohyb stolku v uzavřeném systému 3D tiskárny. Zeleně je znázorněn prostor pro pohyb hlavy a červeně prostor pro pohyb stolku [35].

Pohyb stolku má také jistá omezení. Jelikož stůlek je místo pro konečné situování tištěného objektu, tak s větším rozměrem stolku se bude muset zvětšit i prostor tiskárny. Pokud by se pohybovala hlava, tak příkladem by se hýbala v prostoru krychle o rozměrech 200 x 200 x 200 mm, ovšem pokud se bude hýbat stůlek, tak je třeba očekávat nejméně plochu čtverce o 1600 mm² a s tím spojenou výškou. Ten přesah 100 mm na každou stranu se následně promítne ve velikosti výrobku. Na stejném prostoru je pohyblivá hlava schopná natisknout plošně větší předměty než pohyblivý stůlek.

Mikroposuvy lze provést několika možnými mechanickými způsoby. Protože se jedná o experimentální projekt, který nemusí ústit v úspěšný proces tisku skelného vlákna, tak z ekonomického hlediska je vhodné si vystačit s prvky dostupnými na katedře. Samozřejmě by mohlo dojít k realizaci pomocí vodících drážek a šroubů, ale podobný princip pohybu používají i mikroposuvníky s předem změřenou dráhou posuvu. A jsou tedy nejjednodušším možným nízkonákladovým řešením.

Dalším zadaným parametrem je i posuv více vláken do místa expozice. Pojmem více vláken jsou myšlena nejen vlákna více průměrů, ale i vlákna různého počtu (minimálně dvou). Při zavedení více než jednoho filamentu by bylo nutné se potýkat s problémem symetrie tisku.

U podávání a tavení jednoho vlákna je prakticky jedno, odkud bude podáváno. Ve všech výstupních směrech by mělo být osamocené vlákno natavováno stejně i kvůli izotropii a symetrii kruhového nebo čtvercového průřezu. Pokud ovšem bude vedeno více vláken, například vedle sebe,



Obrázek 8: Problém výstupu více vláken.

do tavicího bodu, tak se během tisku nebudou ve všech směrech pokládat stejně. Snadno si to představit jako zvýrazňovač, jež má spoustu tyčinek v jedné řadě nasáklých pigmentem. Bude-li se s ním kreslit kruh a nebude-li se s ním rotovat, tak se dostane ovál. Trajektorie jednotlivých vláken se v určitém bodě střetnou a na „kruhu“ vzniknou dvě místa, jež budou užší a dvě místa, jež budou naopak tlustší, a proto daný obrazec nikdy nebude připomínat kruh. Tato problematika se dá snadno vyřešit doplněním rotace do konstrukčního řešení hlavy nebo stolku. Hlava je dána jako pevně zavazbený díl s několika mikroposuvy, takže otázka rotace se týká stolku a není nutné se jí dále zabývat.

Poměrně komplexním problémem se stávají vlákna různých průměrů. Otázkou je, jak zajistit, aby tím samým otvorem mohlo s danou přesností depozice 0,2 mm procházet vlákno s různou tloušťkou?

Nabízí se dvě možná řešení: a) Univerzální tryska s nastavitelným výstupem
b) Individuální trysky se stanovenými rozměry

Varianta A je nepochybně složitější. Vlákna, jež se budou používat pro tisk, jsou křehká a měří stovky mikrometrů, což znesnadňuje jinak konvenční řešení. U podávání tyčí by se nejspíše použil systém několik přítlačných desek. Desky by se přitlačily ze 3 nebo 4 stran, tak aby se těleso nehýbalo, ale byl umožněn posuv v požadovaném směru. Upevnily by se na pružiny nebo na pryžové bloky, jež by zajistily změnu rozměrů vedených tyčí. Dala by se použít také sada válců zafixovaných k pružinám. Válce by usnadnily posuv a pružiny opětovnou změnu rozměrů.

Pokud se to aplikuje na tak zanedbatelně malá tělesa, jimiž jsou vlákna, tak se ihned objeví problematika výroby takto malých komponent. Jednotlivé díly nejsou normalizovány a nelze je proto sehnat v klasických obchodech. A i když konstruktér něco podobného navrhne, tak není zaručené, že je to realizovatelné. Konvenční technologie výroby jako je frézování, jsou schopné vytvořit obrobek s vysokou přesností. Destičky o 0,5 mm by neměly být problém. Pryžové bločky jako podpora by se daly snadno vytisknout na 3D tiskárně. Zlomovým bodem by byla velikost, ve které to celé lze sestavit tak, aby se daly snadno a přesně uchytit destičky na pryžové bloky. Celý koncept univerzální trysky není nerealizovatelný a vnáší do experimentální práce mnoho problémů, které se dají prozatím řešit výměnou trysek.

2.3 Rešerše experimentů spojených s natavováním skelného vlákna pomocí CO₂ laseru

Additive manufacturing of glass: CO₂ laser glass deposition printing [36]

Autoři: Philipp von Witzendorff, Leonhard Pohl, Oliver Suttman, Peter Heinrich, Achim Heinrich, Jörg Zander, Holger Bragard, Stefan Kaierle (Laser Zentrum Hannover)

Klíčová slova: „Additive manufacturing, glass, laser“

Obsah a výsledky práce:

Při pokusech byly použity dva CO₂ lasery o různých výkonech ($P_1 = 90 \text{ W}$ a $P_2 = 120 \text{ W}$). Aplikovaná vlákna byla potažena 50 μm vrstvou polymeru, který se při procesu vypařil a nijak neovlivnil jakost křemenného vlákna. Na povrch skelných vláken byla před procesem nanесena vrstva polymeru, která nejenže chránila vlákno, ale činila ho houževnatějším. Rychlost tavení na začátku dosahovala 250 mm/min (4,167 mm/s) a stejná byla i rychlost posuvu laseru. Vlákno bylo podáváno ve stejném směru jako posuv laseru, a dokonce i v opačném směru. Při nízké rychlosti podávání vlákna docházelo k vypařování skla kvůli nadměrnému natavení. Se vzrůstající rychlostí podávání došlo ke změně procesu vypařování na proces přerušovaného tisku. Procesní okno se zvětšilo s použitím laseru s větším výkonem $P_2 = 120 \text{ W}$ a posuvem mezi 200–300 mm/min (3,33 – 5 mm/s). Navíc bylo zjištěno, že tisk by měl být proveden s vláknem dodávaném ve stejném směru jako pohyb os, což nepatrně zvětšilo okno procesu. Když rychlosti podávání vlákna překonají 300 mm/min (5 mm/s) dojde k nedostatečnému natavení a jednotlivé vrstvy se nespojí.

Nakonec bylo vytištěno deseti-vrstvé cylindrické těleso s průměrem 20 mm. Pro jeho vytvoření bylo použito rotační osy. Tištění bylo provedeno s posuvem laseru a dávkováním vlákna ve stejném směru. Vytvořený dutý válec byl vytisknut homogenně bez trhlin nebo jakýchkoliv pórů.

Aditivní výroba křemenného skla je proveditelná pomocí CO₂ laseru a s kontinuálně dodávaným vláknem z křemenného skla. Během procesu je zapotřebí řídit přívod tepla, protože to může vést k silnému odpařování, či naopak nedostatečné fúzi. Autoři tak odhalily procesní okno, ve kterém lze libovolně tisknout z křemenného filamentu.

Laser glass deposition of spheres for printing micro lenses [37]

Autoři: K. Rettschlag, A. Hohnholz, P. Jäschke, D. Kracht, S. Kaierlet, R. Lachmayer

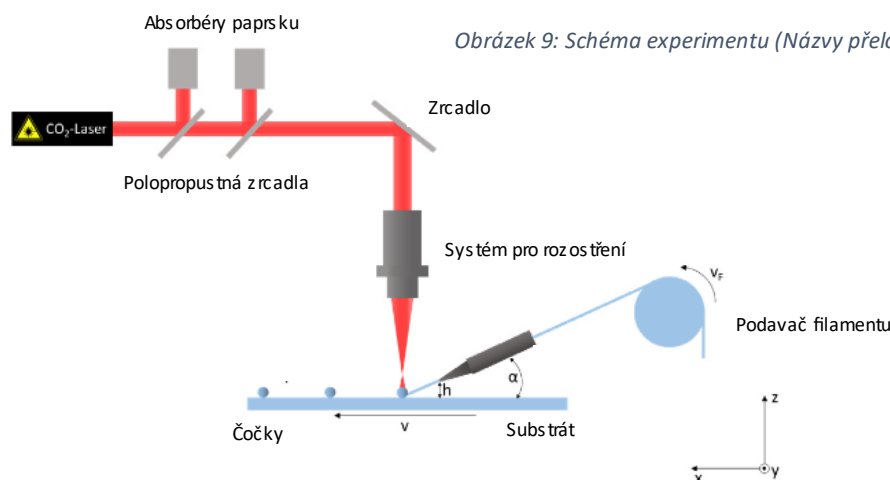
Klíčová slova: „Laser Glass Deposition, Spheres, Additive Manufacturing, Fused Silica“

Obsah a výsledky práce:

Autoři práce v úvodu vyzdvihují některé vlastnosti skla v 3D tisku a porovnávají jej s polymery. Velká část vstupního textu cílí na optické vlastnosti skla, které je bráno jako obtížně degradovatelný materiál pro vysoce výkonné aplikace. A označují laserovou výrobu skelných optických komponent možným řešením pro výrobu funkčních optických čoček. Jako hlavní výzvou celé práce je dosažení homogenní struktury v celém objektu.

Během experimentu se rozhodli použít nezaostřený laserový paprsek CO₂ laseru o výkonu 140 W. Laserové záření bylo odraženo zrcadlem a na konci lehce zaostřeno optickým systémem. Materiál byl podáván z boku. Aby byla zaručena homogennost, byl v systému vygenerován rozostřený paprsek o průměru 4 mm, který měl ochránit materiál před odpařením. Další ochranou byl polymerní obal o tloušťce 50 μm . Polymerní schránka měla zabránit zlomení 400 μm bezjaderného vlákna, než se dostane do místa expozice. Při natavování se schránka dle pozorování zcela vypařila, takže nijak nenarušila proces. Skelná vlákna byla na základě předchozích studií posunuta o 1 mm od centra exponování, čímž se, podobně jako předtím, zabránilo nadměrnému odpařování. Po natavení laserem byla tavenina chytána substrátem, jež oddělil taveninu do jednotlivých kapek. Hlavním cílem při natavování byla eliptická kapka vzniklá existencí povrchových napětí vnesených energií laseru.

Bylo stanoveno, že její velikost odpovídá rychlosti podávání a vzdálenosti laseru od vlákna. A že eliptického tvaru lze docílit správným náklonem podávaného materiálu.



Následně byly zkoumány a vyhodnocovány výsledky z hlediska optických vlastností, zbylých vnitřních napětí a možné opakování experimentu. Některé kapky se při reprodukci pokusů lišily až o 0,5 mm.

Výsledkem byly kapičky eliptického tvaru podobné čočkám. Autoři tohoto experimentu se však plně nedokázali vypořádat s vznikajícím vnitřním napětím a ani zreprodukovat pokusy se stejnými průměry čoček.

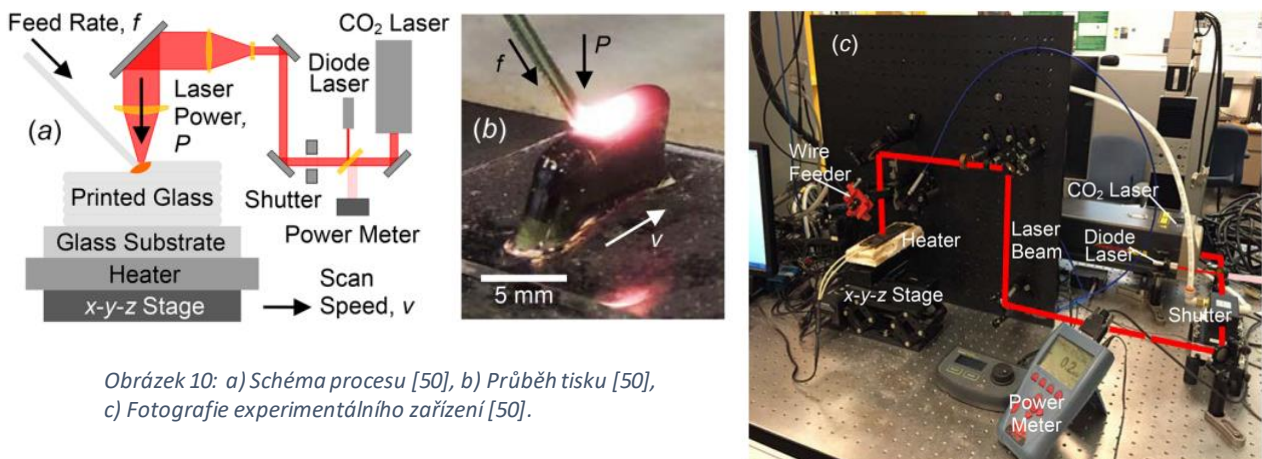
Additive manufacturing of transparent soda-lime glass using a filament-fed process [38]

Autoři: Junjie Luo, Luke J. Gilbert, Chuang Qu, Robert G. Landers, Douglas A. Bristow, Edward C. Kinzel

Klíčová slova: „additive manufacturing, transparent glass, filament-fed, printed optics“

Obsah a výsledky práce:

Ve studii AM technologii výroby limetkového skla autoři ze začátku poznamenávají výrobní technologie DED vedoucí k produkci skla, z nichž zatím žádná, kromě jedné, nevedla ke stoprocentním výsledkům anebo bylo namísto skla použito polymeru. Ta jedna popsaná metoda prokázala výrobu vysokoteplotním natavením, kde byla tavenina nanášena gravitačním spádem. Tento způsob se zdál nestabilní. Nejspíše tou jednou byla myšlena technologie G3DP. Dále pak ukazují na problémy tvorby pórů vlivem zachytávajících se plynů.



Obrázek 10: a) Schéma procesu [50], b) Průběh tisku [50], c) Fotografie experimentálního zařízení [50].

Na experiment byl použit CO₂ laser s rozostřeným paprskem v místě taveniny o průměru 200 μm. Výkon tohoto laseru byl sledován teplotními snímači a v průměru dosahoval 61,5 % celkového výkonu. Jako počáteční reaktant bylo použito velmi tenké sklíčko substrátu o tloušťce 1 mm umístěné na plochu ohříváče. Při zahřátí tak došlo k vytvoření tavné lázně pospolu udržované laserem, jež vytvořila dokonalou základnu pro vstup filamentu. Skelná vlákna se přiváděla do tavné lázně pod úhlem 45 °, speciálně navrženým podavačem vláken, který byl poháněn počítači řízeným krokovým motorem (inspirován klasickými drátovými podavači). Bohužel nebyl ukázán. Pohyblivý stůl byl také řízen počítačem a měl možnost pohybu ve 3 směrech.

Autorům se podařilo na experimentální zařízení vytisknout skelnou strukturu podobnou zdi. Výsledky experimentu říkají, že optické vlastnosti závisí hlavně na výkonu laseru, rychlostech posuvu vláken a rychlostech skenování. V dalších experimentech zkoušeli různě natavovat sklíčka, přičemž měnili výkon laseru (od 20 W do 50 W) a rychlosti posuvů v rozmezí 0,2–2 mm/s. Na většině z nich byl

vidět rozdíl mezi taveninou substrátu a filamentu, takže ačkoliv byl spodní substrát tekutý, tak se nezdálo, že by došlo k výraznému mísení skel. Následné pokusy při vytváření struktur s několika vrstvami ukázaly obecně 4 různé geometrie povrchu při natavení a prokázaly, že je třeba pečlivě vyvážit proces tak, aby nedocházelo k deformacím.

V neposlední řadě měřili i optické vlastnosti skla Helium-Neonovým (He-Ne) laserem a v rámci pokusů o porovnání provedly natavení rozlámaných vláken technologií lití. Rozlámaná sklíčka zahřáli na 1100 °C a pak 5 hodin chladili, aby se uvolnila veškerá teplotní napětí. Výsledkem byla zhruba 85% shoda s se sklem vyrobeným metodou tisku.

Práce obsahuje i část s bilancí energie taveniny a morfologii.

Výsledky experimentu stanovily procesní parametry pro tisk, které ukazují, že je možné tuto technologii využít k tisku technického transparentního skla s hladkým povrchem.

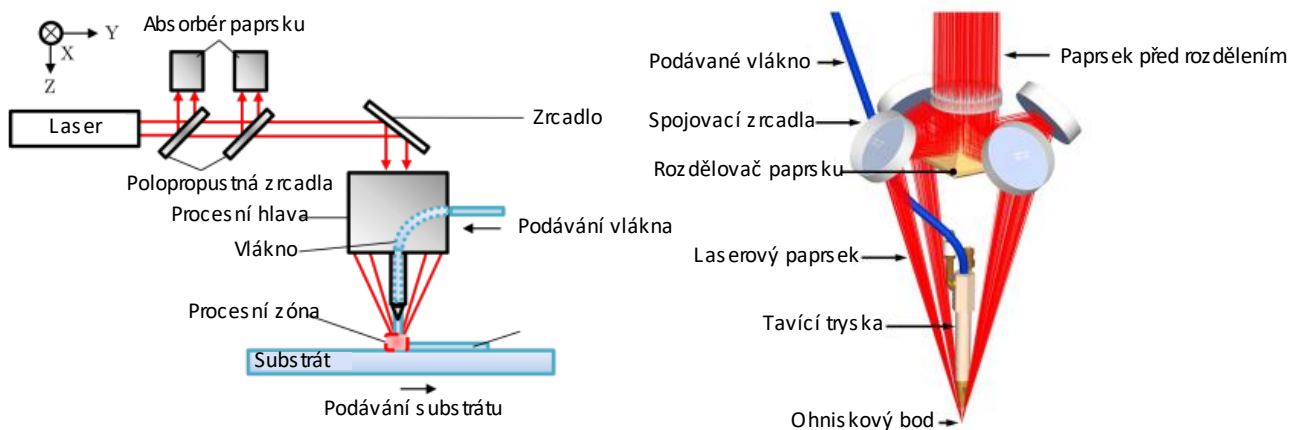
Additive manufacturing of fused silica using coaxial laser glass deposition: experiment, simulation, and discussion [39]

Autoři: T. Grabe, M. Lammers, S. Wang, X. Wang, K. Rettschlag, K. Sleiman, A. Barroi, T. Biermann, A. Ziebel, J. Röttger, P.-P. Ley, A. Wolf, P. Jaeschke, J. Hermsdorf, S. Kaierle, H. Ahlers, R. Lachmayer

Klíčová slova: „Additive Manufacturing, Laser Glass Deposition, Coaxial Laser Welding, Simulation“

Obsah a výsledky práce:

V této práci se tvůrci věnují koaxiálnímu 67,5 W laseru, který by měl přispět k lepšímu natavování vlákna nezávislého na směru tisku a snížit zbytková napětí vznikající v důsledku vysokých teplot tavení. Dále by měl také zvýšit geometrickou přesnost a zdokonalit optické vlastnosti tištěného tělesa. Je představen funkční, ovšem i nadále experimentální koncept. Třeba poznamenat, že autoři v práci přiznávají některé nedostatky týkající se neznalosti chování teplotních zón během procesu tavení. Každopádně jejich druhým cílem je provést numerické simulace procesu tisku koaxiálního laseru, aby tak právě lépe určily rozložení teplot skelného vlákna.



Obrázek 11: Náčrt experimentálního systému (Přeloženo) [51]. Obrázek 12: Popis technologie hlavy (Přeloženo) [51].

Koaxiální hlava se skládá ze 4 rozdělovačů, které rozdělí paprsek na 4 části. Paprsky jsou pak zrcadly usměrněny do společného ohniska v jednom bodě. Protože je paprsek laseru rozdělen a odražen do více směrů, tak je možné vést podávaný materiál centrem hlavy kolmo na plochu tisku. Vlákno je odebíráno z cívky a vedeno systémem rolen podavače přímo do vstupního místa mezi zrcadla (inspirováno podavači kovových drátů). Při natavení hlavou je tavenina nanášena na povrch pokrytý vrstvou substrátu z křemenného písku, který se také nataví vlivem tepelné radiace vyvolané laserovými paprsky. Profil vlákna se skládá ze dvou částí o celkovém průměru 500 μm . Vnitřní část je tvořena křemenným vláknem o $\varnothing 400 \mu\text{m}$ a vnější část polymerní povlakem s tloušťkou 50 μm , za účelem ochrany skelného jádra proti lomu či jiným okolním vlivům.

Bylo pozorováno, že vlákno na povrch substrátu dopadá čisté ve viskózním stavu. Vytváří tak nejdříve lehce zvlněný úsek, následovaný rovným úsekem a malou uzlovitou hmotou na konci.

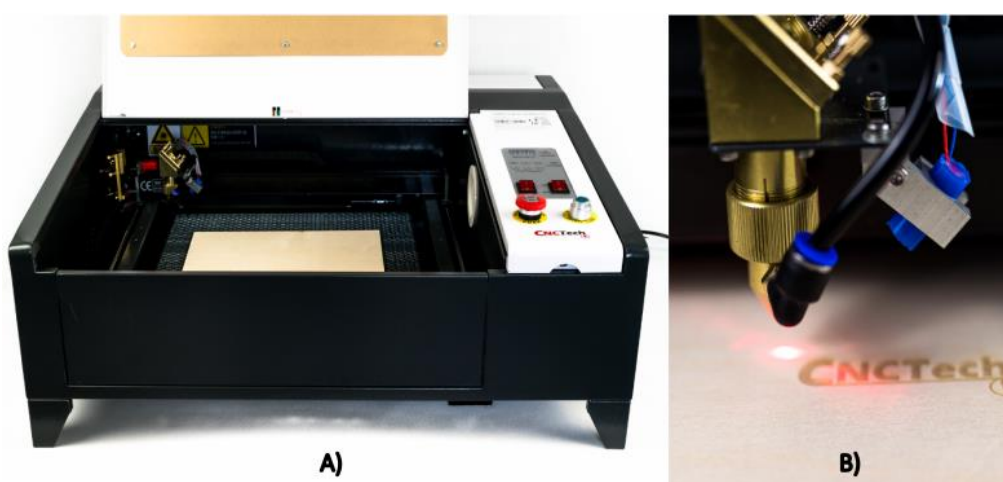
Na základě výsledků byla provedena simulace pomocí metody konečných prvků, ve které byly zvýrazněny odchylky teploty skleněného vlákna podle místa v rozmezích 2450–2585 $^{\circ}\text{C}$. Byl dosažen téměř homogenní ohřev v celém objektu. Během experimentů docházelo i k částečnému odpařování skla.

2.4 Základní ověřovací experiment

V laboratoři na Katedře sklářských strojů a robotiky jsem pod mikroskopem zkoumal vliv běžného CO_2 laseru, jež se v mém případě nacházel v gravírovacím stroji na vlákna a materiály různých parametrů. Vstupním úkolem do této bakalářské práce bylo zjistit, zdali možné natavit vlákna o průměrech 352 a 125 μm na cenově dostupném gravírovacím stroji s CO_2 laserem o výkonu 40 W. Jedná se o velmi silný plynový laser s dlouho vlnovou délkou, který je schopný i při desátém odrazu vypálit sítnici a nenávratně poškodit zrak. Proto jsem při jeho používání dodržoval veškerá bezpečnostní pravidla BOZP a řídil se bezpečnostními pokyny při práci s laserovými zařízeními danými zákonem č. 258/2000 Sb. o bezpečnosti a ochraně zdraví při práci s lasery [40].

Testovací zařízení

Veškeré testy tavení skelného optického vlákna byly provedeny na zařízení Laserový plotr CO₂ 40 W MAX 40 x 40 cm od společnosti CNCtech. Jde o vodou chlazený laserový gravírovací stroj, který je zaměřen především na obrábění menších objektů. Plotr umožňuje pomocí laserového regulátoru nastavit (v procentech celkového výkonu) optimální výkon laseru pro konkrétní procesy. Dále disponuje stolkem, jež je možné ve vertikální ose manuálně posunout v rozsahu 70 mm. Proces natavování probíhá zaměřením červeného paprsku na tavnou zónu. Tento laser byl bohužel lehce vyosený, takže některé testy vedly jen k částečnému natavení vlákna. Zařízení disponuje také funkcí ventilací hlavy („Air Assist“). Ventilace vychází přímo skrz prostor laserového paprsku, takže při procesu gravírování je natavována jen oblast působení laseru, takže paprsek nespálí hrany rytého vzoru [41].



Obrázek 13: A) Laserový plotr a B) procesní hlava s laserem, ventilací a červeným bodem He-Ne laseru [41].

Průběh ověřování

Jednotlivé vzorky vláken, přednostně jsem použil vlákna s větším průměrem, jsem podrobil laseru a aspoň přibližně se pokusili stanovit bod jejich tavení. Vlákna s menším průměrem jsem se rozhodl natavovat až na konci, kdy byl již z daných poměrů stanoven bod tání na vlákně s větším průměrem. Jelikož byla menší, tak bylo mnohem obtížnější nastavit správný výkon potřebný k jejich roztavení.

Vlákna byla nalámána na malé kousky (zhruba po 80 mm) a přiložena na destičky, které měly sloužit jako podstavce procesu. Gravírovací zařízení totiž nedisponovalo pevným stolcem, nýbrž bylo osazeno polopropustným stolcem v podobě mřížky, jež dovoluje propad uhlíku a jiným nečistotám vznikajícím při vypalování.

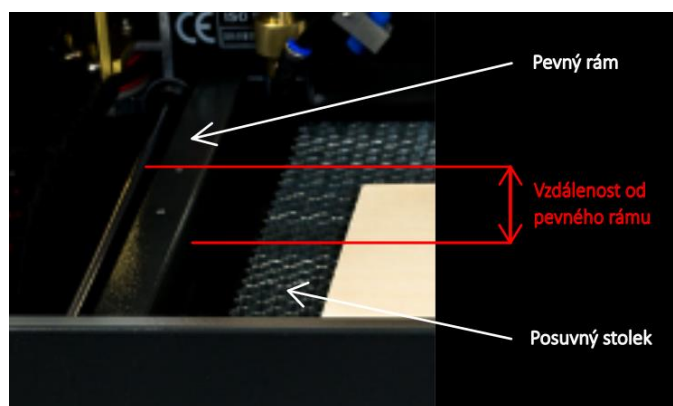
Destičky 80 x 25 x 2 mm byly voleny z různých materiálů s ohledem na výsledky. Nejdříve v několika málo případech byly použity skelné destičky za normálních podmínek sloužící pro optické zkoumání laboratorních pokusů. Ty se natavovaly společně s vláknem, takže při každém pokusu musela být

použita nová destička, což se především ze začátku nezdálo úplně vhodné, jelikož byla třeba opakovatelnost a musel jsem se vypořádat s nedostatkem laboratorního materiálu. Proto pro valnou většinu experimentu bylo použito ocelové destičky, které zaručovaly opakovatelnost a stálost během procesu. Jediným nevýhodným aspektem byly místa s výskytem tepla zanechaného laserovým paprskem. Tomuto problému se předešlo zahrnutím druhé, rozměry podobné destičky. Vzájemně se po pokusu střídaly tak, aby nemohly gradovat vnitřní teploty a odpovídaly vždy vstupním počátečním podmínkám.

Při laboratorních experimentech je potřeba zachytit počáteční podmínky v daném prostředí v oblasti laboratoře, zde se teplota pohybovala kolem 22–23 °C. Při změně prostředí se mění podmínky. To znamená, že při provedení toho samého měření v jiné oblasti, příkladem na některém pobřeží tropických ostrovů, kde je jiná teplota, vlhkost nebo tlak, by byly možná změřeny jiné hodnoty. Vlhkost se při experimentech neměnila vlivem klimatizace v sektoru laboratoří a tlak se vždy blížil blízko atmosférickému. Zde největší vliv hrála teplota a vlhkost. Se zvýšenou teplotou by relativně pomaleji chladly vzorky a s vyšší vlhkostí by to mohlo znamenat orosení vzorku a vnesení nežádoucích příměsí do taveniny vlivem běžných procesů v gravírovacích strojích.

Na destičku byla vlákna přelepena tenkou lepicí páskou. Pásky jsou zpravidla polymerních struktur a se zanedbatelnou tloušťkou. Byla tak jistá snaha napodobit tavená vlákna v experimentech [36–39], kde byly využity polymerní povlaky.

Dále byla vlákna vložena do zařízení na programem zaměřenou pozici, nejčastěji někde do rohu, aby se předešlo špatnému zaměření. A spuštěn program. Bylo sledováno rovnou několik hodnot. První hodnotou byl výkon laseru. Jak již bylo řečeno, laser umožňuje procentuální nastavení výkonu, takže jsem postupoval s doporučením od 40 %. Další sledovaným parametrem byl posuv, jež se zadal



Obrázek 14: Měřená vzdálenost pevného rámu a stolku [41].

před začátkem procesu v programu. A poslední sledovanou hodnotou byla vzdálenost ve vertikální rovině. Jelikož byl stůlek posuvný, tak bylo třeba určit vzdálenost od nějakého pevného bodu. Tímto bodem se stala oblast rámu obklopující prostor stolku, kterou jsem mohl kdykoliv snadno změřit.

Dohromady bylo provedeno kolem 50 pokusů z nichž většina byla provedena na větším vlákně o průměru 352 μm . Protože na experimenty s malým vláknem stačilo pomocí jednoduché lineární rovnice určit odpovídající poměr výkonu ku daným rozměrům (celá tabulka je součástí přílohy). Nejlepší z pokusů, jež bylo ve snaze zopakovat, byl v pořadí 37. pokus při 40% výkonu, 1 mm/s posuvu a 28,1 mm vzdálenosti od pevného rámu.



Obrázek 16: Snímek 2.9 - Dlouhá kapka.



Obrázek 15: Snímek 2.10 - Zkroucené vlákno.

Ve snímcích 2.9 a 2.10 z elektrického mikroskopu DINO je vidět několik stádií natavování skelného filamentu, při kterém došlo ke vzniku tuhé i kapalně fáze, tedy jejich přímému přelomu. Na levém obrázku se snímkem 2.9 je vidět jasně zřetelná bílá hmota v pevném stavu obklopující kapku. Uprostřed taveného vzorku vznikla kapka hlavně kvůli tvaru natavovaného materiálu. Použitá vlákna mají v řezu tvar kruhu. To znamená, že teplo dopadající ve vlnových délkách, jež projde povrchem a částečně se odrazí od spodní destičky, nejprve roztavuje povrchovou vrstvu ze všech stran. U horní strany probíhá proces mnohem rychleji než u spodní, a proto posledním kouskem k roztavení se stává oblast pod středem průřezu kruhového vlákna. V druhém pravém snímku 2.10 je zkroucené vlákno vlivem vysokoenergetického kontinuálně proudící zdroje energie. Vlákno se snažilo nalézt stav, kdy dosáhne nejmenšího vnitřního napětí, a tak se začalo kroutit. Kdyby bylo ponecháno v procesu o chvíli déle, nejspíše by se zamotalo a utvořilo klubíčko.

Během posledních pokusů s menším 125 μm vláknem se objevil podobný trend, kde se vlákno smotalo do kruhového tvaru. S takto malým průměrem se velice špatně pracovalo, jelikož se po procesu při jakékoliv manipulaci nepřetržitě lámalo.



Obrázek 17: Snímek 4.1 - Struktura tavené vrstvy tenkého vlákna.



Obrázek 18: Snímek 4.3 - Napětím srolované vlákno.

Experiment s malým vláknem nepřinesl nijak významné výsledky. I přestože bylo poměrně snadno a rychle stanoveno potřebné procento výkonu laseru, tak výsledkem byly většinou buď úplně vypařená vlákna, srolovaná vlákna anebo v nejlepším případě vlákna, která byla někde mezi těmito stavy podobně jako na obrázku 17.

Některé z pokusů se uskutečnily i na základních destičkách z odlišných materiálů, aby se prokázalo, že kov je vhodnou podložkou. Příkladem je tavení vlákna na sklokeramickém kusu dlaždice.

U sklokeramiky docházelo k natavování jí samotné. Výsledná struktura skelného povrchu při natavení vlákna byla vizuálně podle odrazu světla dokonce horší než natavený povrch samotné



Obrázek 19: Snímek 3.4 - Roztavený sklokeramický podklad včetně vlákna ve dvou spojitých vrstvách.

dlaždičky. Paprsky laseru prostoupily křemenné vlákno a část tepla se tak dostala i do základny. Prakticky se dělo to stejné, co u kovové destičky. Kovy na rozdíl od skla nemají optickou propustnost a jsou schopny část dlouhých vln odrazit. Sklon k odrazu má většina kovů, ovšem záleží na druhu a jeho povrchové úpravě. Nejlepším je stříbro, které dokáže odrazit přes 90 % světla v celém spektru, proto se dříve používalo pro výrobu zrcadel [42].

Podkladový keramický materiál by byl vhodnou volbou, pokud by se hledala pevná základna výrobku pro 3D tisk. Výsledné výrobky by pak byly vázané na určitý podklad.

Dalším takový materiálem byla skleněné destičky používané v laboratořích pro pozorování mikroorganismů a jiných částí mikrosvěta pod mikroskopem. Kvůli jejich tenkému základu většina z nich nevydržela náhlé rostoucí napětí a popraskala. Ty destičky, které proces tavení přežily, byly velmi



Obrázek 21: Snímek 3.5 - Natavené skelné vlákno na prasklé laboratorní destičce s černým podkladem.

křehké na manipulaci a přelomily se takřka ihned nebo jen nepatrnou chvíli po uchopení. Protože byly přelepeny páskou, která držela vlákno, tak se je přesto podařilo zachytit pod mikroskopem.

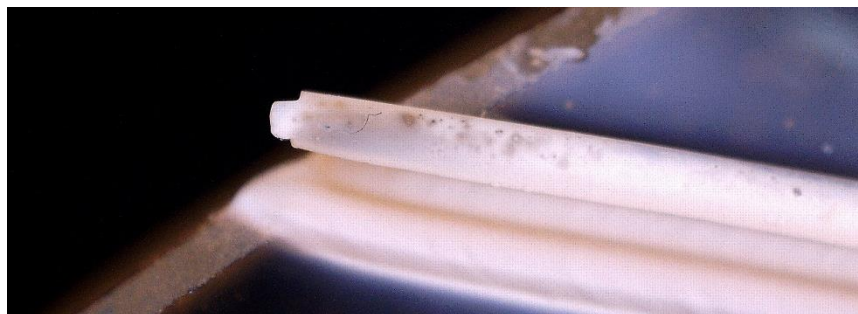


Obrázek 22: Snímek 3.1 - Natavená plocha se zbylých pozůstatkem jádra ve středu.

Na obrázku 22 je jasně vyobrazeno popraskané natavené skelné vlákno, které se vtavilo do rozlámaného sklíčka. Nahoře je jasně vidět zbylá část, než byl celý proces zastaven, aby se zabránilo dalšímu šíření lomu. Jasně bílý potah kolem je součástí nežádaného procesu vaporizace. Při větším výkonu laseru se prostupem tepla začne povrch odpařovat a vzniká zmíněný potah v blízkém okolí. Zde je také velice pěkně vidět, že během procesu došlo ke spojení podkladové plochy a skelného vlákna za

vzniku transparentní vrstvy v místě působení laserového paprsku, což podporuje výše zmíněné experimentální pokusy se sytkým substrátem oxidu křemičitého [36–39].

Protože laboratorní sklíčka byla tenká a často praskala, tak se vyzkoušelo i robustnější sklíčko o tloušťce 8 mm. Výsledky dopadly podobně jako se sklokeramikou s malým rozdílem, že při bližším prozkoumání pod mikroskopem bylo zřetelně rozeznatelné vlákno a skelný podklad.



Obrázek 23: Snímek 3.2 - Snímek zjevného rozdílu v pozici vlákna a nataveného skla

Na snímcích 3.1 a 3.2 je jasně vidět natavené vlákno ve středu proudění laserového paprsku. Tavná zóna laseru široce přesáhla průměr vlákna. Vlivem vysokého sklíčka se posunulo ohnisko paprsku hluboko pod oblast vlákna, takže paprsek zasáhl i přilehlou oblast a způsobil, že energie, jež by normálně stačila na natavení vlákna se rozdělila do většího prostoru. Proto zůstalo celistvé vlákno a vznikla teplem ovlivněná zóna pod ním. Sklíčko bylo bohužel jenom jedno. Ovšem i z tohoto jednoho pokusu se dá usoudit, že pokud by byla správně rozložená energie, pouze na oblast vlákna, tak by se mimo něj natavila i zóna pod ním (tmavší hnědá čára). Je to jasný důkaz průchodu vlnových délek zvoleným skelným materiálem.

Zajímavým faktem je, že vlákno nebylo v některých místech přichyceno k podkladu. Očekávalo se natavení spodní vrstvy ve všech místech a takřka stejný pád do taveniny podložky, jako tomu bylo u dlaždičky ze sklokeramického materiálu. Ale jak je jasně vidět na obrázku 16, tak vlákno zůstalo viset těsně nad podložkou. Hlavním důvodem pro natavení podložky a ojedinělému vyzdvihnutí vlákna může být druh skla daného robustní sklíčka, za předpokladu, že by to sklo mělo nižší teplotu tání než cílené křemenné vlákno, tak by se logicky natavovalo dřív, a tudíž by se i mnohem dříve dostalo na bod tavení. Velký vliv zde měla také větší ohnisková vzdálenost, jež zapříčila pomalejší narůst teploty u vlákna, které se během té krátké chvíle už nestačilo více natavit. Proto z něj zůstalo tenké jádro. Oproti tomu materiál podkladu byl vysoce nad teplotou tavení. Na obrázku 15 jsou kolem zbytků vlákna zřetelně vidět známky odpařování.

Z důvodu rychlosti tavení sklíčka, vznikl mezi oběma prvky jistý prostor, který se posléze rozšířil vlivem dozrívajících akumulovaných napětí ve vlákně.

2.5 Návrh řešení

Návrh podavače

Podavač je velmi jednoduché zařízení využívající posuvných prvků, nejčastěji rolen, k realizaci posuvného pohybu. Existuje spousta různých řešení, přesto bude nejlepší se zaměřit na vzory podavačů experimentálních prací [36–39], soustředit se na vytvoření návrhu na základě již funkčních konceptů podavačů drátu a přizpůsobit dané koncepty na nejméně 2 uskutečnitelné mechanismy. Důvodem tohoto řešení je naprosto neexistující místo podavačů skelných vláken na obchodním trhu. Systém podávání drátu je, při zanedbání vlastností podávaného materiálu, naprosto stejný. Tudíž není třeba vytvářet zcela nové a ohromující návrhy v oblasti skelných vláken.

První koncept podavače

Vzorem prvního návrhu je kovový extrudér s dvojitým převodem vyvinutý společností MrCode s. r. o., který disponuje zahřívacím koncovým prvkem (hot-end). Prvek není nijak podstatný, hlavní je zde využitý mechanismus k vytvoření přítlaku na filament [43].

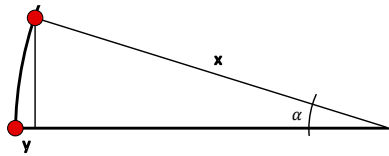


Obrázek 25: Extrudér s dvojitým převodem od společnosti MrCode s. r. o. se zajímavým řešením podávání [43].

Podavač využívá páky s osou kolmou na směr pohybu vlákna. Z obrázku 23 je patrné, že páka je podpořena silou pružiny. Tento systém spoléhá na aspoň minimální houževnatost podávaného vlákna. Při pohybu páky, jíž je veden filament, se zároveň mírně změní trajektorie dráhy posuvu vlákna. Vzniká tam jistý rádius, který by mohl být pro vlákno kritický. Výhodou toho mechanismu je fakt, že pružina nikam nevylézá z prostoru podavače. Zajímavé je také to, že pružina se odráží od základní desky, takže je zmenšen počet potřebných prvků k montáži. Celek se tedy skládá ze 4 základních prvků: páky, druhé podpůrné části, která je součástí základny, upevňovací desky a motoru. Vstupní a výstupní moduly jsou součástí systému vyvozující přítlak a uvolní místo v prostoru.

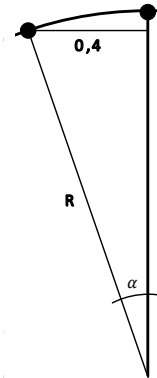
Návrh podavače toho stylu musí zcela jistě vyřešit problém s mírným sklonem během posuvu materiálu. Je důležité si nejdříve říci, jaké vlákna se budou používat. V ověřovacích experimentu byla použita skelná vlákna s průměry 125 μm a 352 μm . Vezme-li se v potaz možnost zavedení i jiných vláken například do 500 μm , tak je tu rozsah zhruba 0,4 mm. A při rotaci páky okolo ložiska o úhel α ve

vzdálenosti x od výstupu se vlákno vychýlí o $y = x - x \cos \alpha$. Úhel pootočení se zjistí z posuvu rolny v radiální směru na vzdálenosti středu rolny od osy rotace R : $\alpha = \arcsin\left(\frac{0,4}{R}\right)$



Obrázek 27: Simulace rotace páky a posuvu výstupu vlákna.

Obrázek 26: Simulace rotace páky a posuvu rolny.



Výsledkem by byl kolmý posuv vedení vlákna o:

$$y = x - x \cos\left(\arcsin\left(\frac{0,4}{R}\right)\right)$$

Pokud by se dosadila za výsledek náhodná čísla kupříkladu $R = 50 \text{ mm}$ a $x = 25 \text{ m}$ (přesná kóta), tak by vyšel konečný posuv výstupu vlákna v radiálním směru:

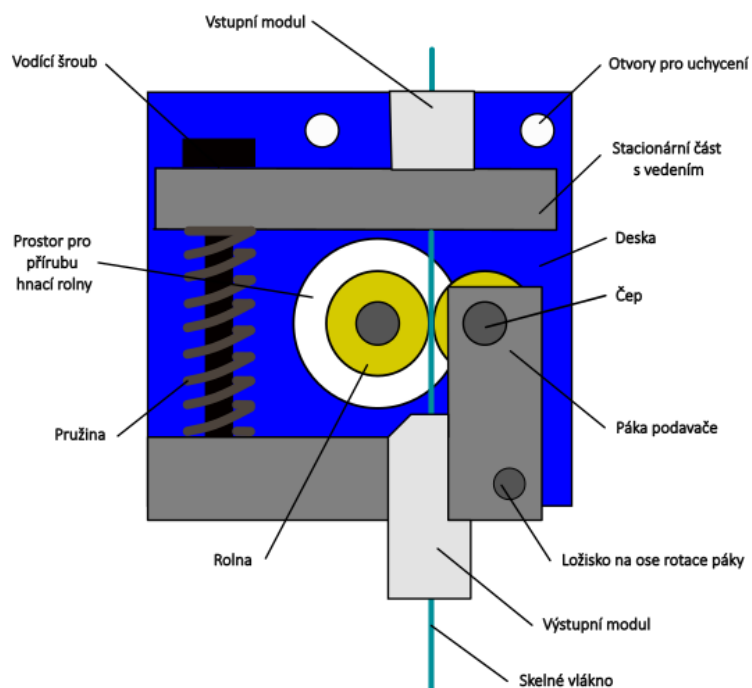
$$y = 25 - 25 * \cos\left(\arcsin\left(\frac{0,4}{50}\right)\right) = 8,0001 * 10^{-4} \text{ mm} = 0,80001 \mu\text{m}$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{0,4}{50}\right) = 0,4584^\circ$$

Výsledky posuvu i rotace při náhodně zvolených číslech daly v obou případech zanedbatelné hodnoty, které by vlákno s odkazem poměr délky a průměru mělo docela lehce vydržet. Musela by být ovšem za ním dimenzovaná tryska, která by s přesností směřovala vlákno do místa určení. Pokud by se vlákno přesto jevílo křehké a nastal by problém v mírném úhlu vstupu do trysky, tak by se na výstupní bod na páce zkonstruovala hadička, jež by umožnila znovu narovnat filament a odstranit problém.

V dalším případě by se dal na páce vytvořit prostor dovolující průchod výstupního modulu s vláknem.

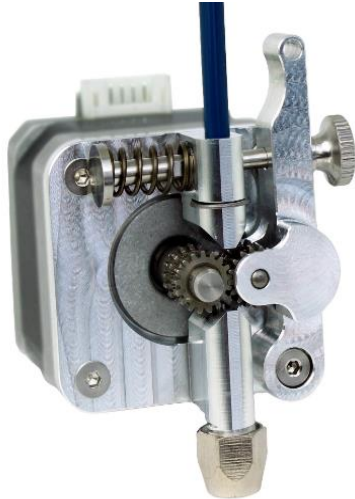
Obrázek 28: Náčrt prvního konceptu podavače s osou pružiny rovnoběžnou s vedením vlákna.



Druhý koncept podavače

Vzorem druhého návrhu je Dual Gear Extruder M2714 od společnosti Creality Bowden určený pro tiskárny. Tento podavač je určený pro více různých druhů 3D tiskáren, jelikož má schopnost výměny výstupní části vlákna, která se může při potřebě nahradit například ohřívanou tryskou [44].

Model se skládá z podpůrné desky, jejíž součástí jsou také vstupní a výstupní moduly pro vlákno. Dále disponuje pákou podepřenou pružinou o vstupní modul v kolmém směru na vedení



Obrázek 29: Dual Gear Extruder M2714 od Creality Bowden [44].

vlákna. Na rozdíl od předchozího konceptu je tato varianta intuitivnější.

Pro případ vzniku ohybu vlákna je třeba znovu zkontrolovat vychýlení vlákna. Výstupní otvor bude natvrdo připevněn k desce, takže mu nebude umožněn žádný posuv. Rolna se pootočí o úhel α , čímž se znovu dosáhne radiálního posuvu od vedení o 0,4 mm. Rolna je ve vzdálenosti R od osy rotace páky. Bude platit, že úhel vzniklý rotací bude odpovídat úhlu vychýlení vlákna β :

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{0,4}{R}\right) = \beta$$

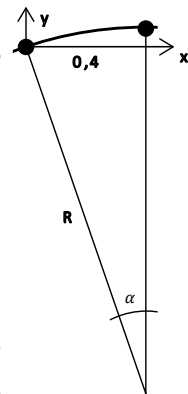
$$\alpha = \arcsin\left(\frac{0,4}{50}\right) = 0,4584^\circ$$

Za předpokladu, že by R nabylo hodnoty 50 mm, tak by byl docílen úhel $0,4584^\circ$.

Výchylka této hodnoty by měla na vzdálenosti R za následek ten samý odklon vlákna jako posun rolny ve směru x (o 0,4 mm) z vedení mezi rolnami.

Tento problém by se dal jednoduše vyřešit přiblížením výstupního otvoru vlákna na co nejkratší vzdálenost od výstupu z prostoru mezi rolnami, aby se tak zmenšila odchylka vedení, která vzrůstá se vzdáleností od východu z rolen.

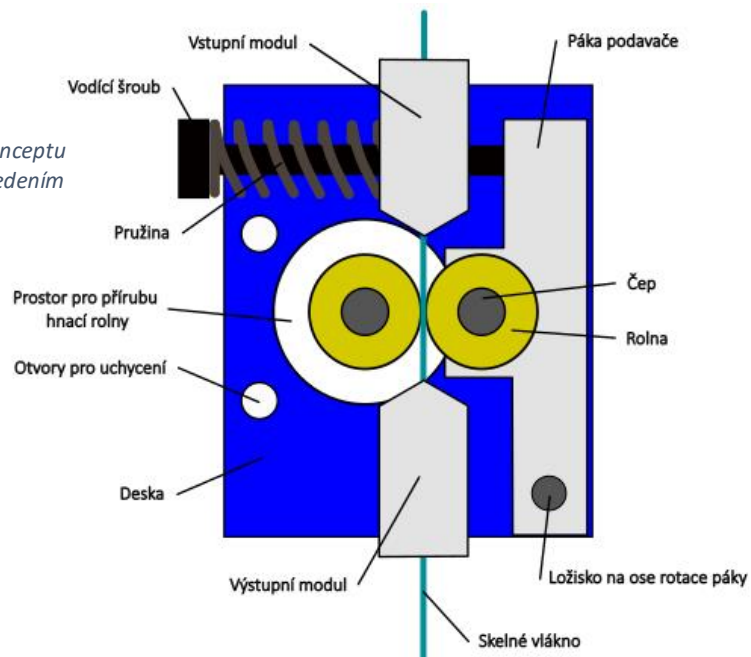
Protože se vedení vlákna nehýbe, tak by bylo možné navrhnout moduly přiléhající blízko k rolnám.



Obrázek 30: Náčrt posuvu rolny ve směru x .

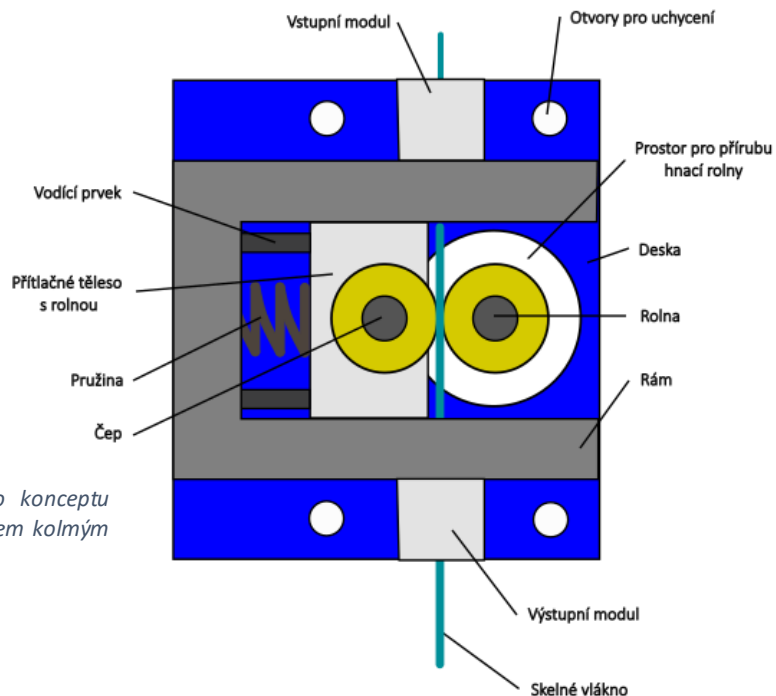
Návrh konceptu druhého podavače s protáhlým vedením skelného vlákna by mohl vypadat nějak takto:

Obrázek 31: Návrh druhého konceptu podavače s osou pružiny kolmou na vedením vlákna.



Třetí koncept podavače

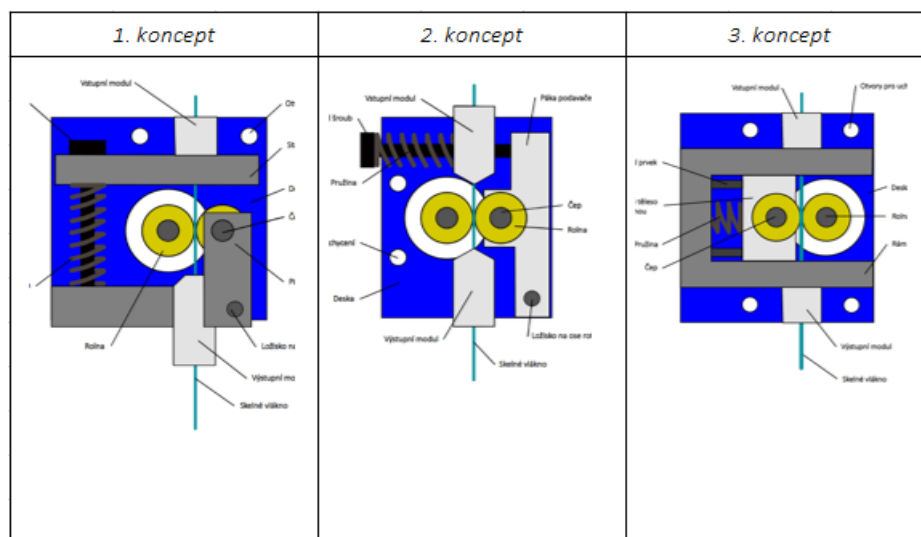
Třetím mechanismem je podavač s odlišným systémem vytváření přitlaku. Předchozí dva koncepty se zaměřují na systém páky, která svou rotací přitlačuje hnanou rolnu k té hnací. Nespornou výhodou páky je její jednoduchost. Při sestavování se veškeré prvky upevňují na desku, což znamená, že v případě nouze, opravy či jiných důvodů se zařízení dá velice snadno rozebrat. Další předností je také počet komponent. Ačkoliv podavač vyžaduje vstupní a výstupní moduly, tak ty jsou ve většině případů částí desky. Takže se minimalizuje počet součástí na výrobu a snižuje se tím cena.



Obrázek 32: Návrh třetího konceptu podavače s posuvným prvkem kolmým na vedením vlákna.

Navržený mechanismus má systém založený na posuvném prvku působícím kolmo na vedení vlákna. Je to velmi snadný způsob vyvození přítlaku, při kterém se vlákno nijak neohýbá či jinak nekrotí. Na přítlačné těleso s rolnou je vyvolán tlak přes uloženou v rámu. Rám obklopuje přítlačné těleso, takže slouží jako podpora vodícího ústrojí. Takzvaný vodící prvek je pomocná posuvná konstrukce, která udržuje přítlačné těleso v dané rovině. Na náčrtu je vyobrazena jako vodící prvek tyč procházející skrz přítlačné těleso. Tento princip by se také dal realizovat vytvořením drážky v rámu. Výstupní a vstupní modul by se mohly, vzhledem ke konstrukci, stát součástí rámu, čímž by se zmenšil počet nutných komponent a ekonomicky snížila cena.

Nevýhodou tohoto zařízení je velikost. Na levé straně, kde je umístěné přítlačné těleso, pružina a rám, se bude nalézat mnohem více komponent, což ztlačí osu vlákna z centra desky. Podavač tak nebude univerzálně směrovatelný, protože při podávání zleva doprava tak, aby mechanismus tlačil směrem nahoru, bude ta daná část ztlačí přesahovat. Tento přesah by musel být kompenzován vytvořením dlouhé trysky z výstupního modulu, tak aby nedocházelo ke kolizi se stolkem nebo jinými překážkami v prostoru. Koncept rámu navíc znemožňuje vytvoření prvku k přesnějšímu zavedení do oblasti rolen. Nemluvně o drážkách, které by musely vést nejméně do bodu vstupních a výstupních otvorů vlákna po délce rámu. Toto řešení by mohlo potenciálně ovlivnit tloušťku rámu.



Obrázek 33: Koncepty podavače.

Rozhodovací analýza podavače

Podavač je jednou z nejdůležitějších součástí hlavy, ne-li tou přímo nejdůležitější, protože vykonává zásadní funkci přesunu vlákna ze zásobníku do prostoru. Pro zopakování byly navrženy celkem 3 koncepty. Všechny 3 koncepty jsou navrženy pouze s jedním podavačem. Až posléze na základě volby nejvíce vhodného konceptu dojde k určení a rozvržení nejméně dvou podavačů.

První koncept byl navržen s pákou v radiální pozici na osu vedení vlákna. Pružina vede spolu s osou, takže řešení je kompaktní, ale s pákou by rotoval i výstup, tudíž bude nutno přistoupit k jinému řešení, například v podobě vloženého výstupního modulu, jež obepne rameno. Druhý koncept je s podobnou pákou, ovšem tentokrát umístěnou ve stejném směru jako je veden filament. Řešení je na pohled jednoduché a lehce rozebíratelné. Vlákno je vedeno skrz moduly dovolující velmi přesné podávání do oblasti rolen. Třetí a poslední koncept je spíše technicky intuitivní řešení, které využívá posuvného přítlačného systému kolmému na vedení. Nehrozí tedy jakékoliv vychýlení a vlákno je tak částečně chráněno před zlomem. Nevýhodou by se této variantě mohla stát konstrukce robustnějšího typu a náklady na její výrobu.

Pro výběr mezi technicky velmi podobnými řešeními pomůže rozhodovací analýza. To je systém, který dovolí uživateli na základě kritérií rozhodnout, jestli alternativy splňují dané požadavky a pomůže tak najít to nejvhodnější řešení.

- Rozhodovacími kritérii jsou:
1. Obtížnost konstrukčního řešení
 2. Rozebíratelnost
 3. Spolehlivost a přesnost podávání
 4. Polohovatelnost v prostoru
 5. Náklady na výrobu

Párové srovnání alternativ				Matice užítivosti alternativ							
Alternativa:				X. koncept		1. koncept		2. koncept		3. koncept	
číslo	počet voleb	pořadí významnosti	váha	Hodnota		Hodnota		Hodnota		Hodnota	
				prostá	vážená	prostá	vážená	prostá	vážená	prostá	vážená
1.	1	4	2	100	200	60	120	75	150	65	130
2.	3	2	4	100	400	45	180	58	232	45	180
3.	4	1	5	100	500	80	400	90	450	100	500
4.	2	3	3	100	300	70	210	80	240	60	180
5.	0	5	1	100	100	56	56	60	60	50	50
Celkem				1500		966		1132		1040	
Užitnost v relativním vyjádření [%]						64,4%		75,5%		69,3%	
Pořadí alternativ podle užítivosti:						3.		1.		2.	

Obrázek 34: Rozhodovací analýza provedená v programu Microsoft Excel

Dle dostupných výsledku pořadí jednotlivých alternativ skončil na prvním místě celkového výběru druhý koncept, který je ze všech bezesporu nejprostším a určitě nejlevnějším, protože nevyžaduje, kromě dvou modulů, desky a páky, prakticky nic navíc. Přesto je velmi zajímavý také třetí koncept, jehož odlišné technické řešení by mohlo znamenat revoluci v jinak monopolním systému pákových podavačů v oblasti aditivních technologií.

Zvolený koncept obsahuje několik různých částí vyžadujících samostatné řešení. Návrh se skládá ze dvou vodících modulů, páky a desky.

Návrh hlavy

Hlava je sestava skládající se z mnoha podsestav a součástí, které dohromady tvoří zařízení jako celek. Při návrhu konceptu hlavy je zapotřebí postupovat od prostoru, do níž bude zasazena přes uspořádání těchto částí. U podkapitoly Rešerše mechanismů technologických hlav bylo již zmíněno, do jakého prostředí by mohla být uložena a z čeho se běžné hlavy skládají. Přesto je zapotřebí si připomenout některé body rozhodující o návrhu řešení.

- a) Hlava bude umístěna nejspíše do konstrukce z hliníkových profilů.
- b) Přesnost podávání do místa expozice bude zajištěna mikroposuvníky. Na katedře jsou dostupné pouze dva, takže bude nutné se rozhodnout, který ze 3 potřebných je postradatelný anebo nemá větší význam.
- c) Mikroposuvníky mohou být doplněny o goniometr, jež zhruba odpovídá velikosti každého z nich, takže je bylo uskutečnitelné umístit do sebe do série
- d) Pro návrh hlavy by měl být použit některý z konceptů podavače
- e) Je nezbytné zahrnout i rozměry motoru a vedení kabeláže, tak aby nedošlo ke kolizi během posuvu

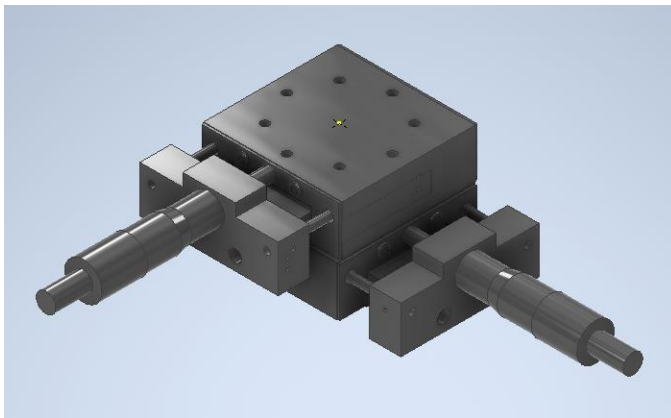
Posledním nezmíněným bodem návrhu je schopnost vést dvě a více vláken najednou. Protože tato bakalářská práce je prací experimentální, tak je nutné přihlídnout na další podmínku funkčnosti a finanční náročnosti. Z těchto důvodů, a také dle rozhodnutí vedoucího práce a vedení katedry, vznikne koncept hlavy především na základě dostupných prostředků. Mezi tyto prostředky patří jeden krokový motor a sada mikroposuvníků s goniometrem. Ačkoliv je tento motor velmi drahý, je u něj plně zaručena jeho spolehlivost a provozuschopnost, u levnějších alternativ by se mohly objevit nedokonalosti v řízení, či by se mohla projevit slabá stránka levnější mechanické konstrukce. Pro projekt by takto levný nákup mohl znamenat zbytečnou ztrátu vynaloženého času a nákladů.

V oblasti návrhu hlavy bude práce soustředěna na výběr adaptabilní všestranného a hlavně funkčního celku se schopností vést jedno vlákno. Na základě vybraného konceptu bude v kapitole technického řešení v podkapitole řešení hlavy představena také varianta se schopností podávat více vláken najednou, čímž bude splněno zadání.

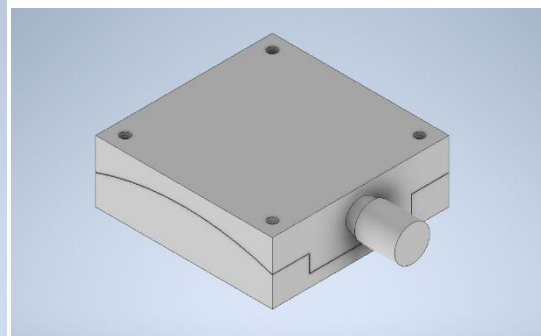
Umístění hlavy rozhoduje o tvaru a o rozpoložení jednotlivých dílů v rámci celku. Existuje několik možných variant. První varianta pracuje s čtvercovým profilem umístěným osou v horizontální rovině. Kameny, jež budou vloženy do profilu, budou schopny posuvu do stran, což odebere posuv do jednoho směru. Zbýlé směry budou doplněny vlastnostmi mikroposuvníků. Druhá varianta se vymezuje na

posuv kamenů na profilu ve vertikální ose, tudíž ostatní posuvy v horizontální rovině by pokryl mikroposuvný systém.

V případě stanovené přesnosti si nelze upřít, že posuv do jakékoliv strany je velmi podstatný a že jeden rozměr dokáže podstatně ovlivnit ty zbývající. V konceptech technologií 3D tiskáren jako jsou například SLA nebo SLS lze najít jeden rozměr, který se dá velmi logicky a snadno přenést na jinou funkční součást. Jedná se o posuv ve vertikální ose. V zmíněných aditivních výrobních technologiích se využívá kooperace plotru a stolků. Stolek se pohybuje nahoru a dolů, zatímco hlava umožňuje přesné polohování ve vodorovné rovině. V první fázi tisku nejprve operuje plotr, který nanese vrstvu materiálu o tloušťce jedné vrstvy. Když je tento proces ukončen, nastoupí stolek, jenž se posune o jednu vrstvu dolů, aby umožnil opakovat první proces na té samé hladině. Tyto děje se opakují, dokud není vytištěn výrobek.



Obrázek 36: Model mikroposuvníků v aplikaci Autodesk Inventor.



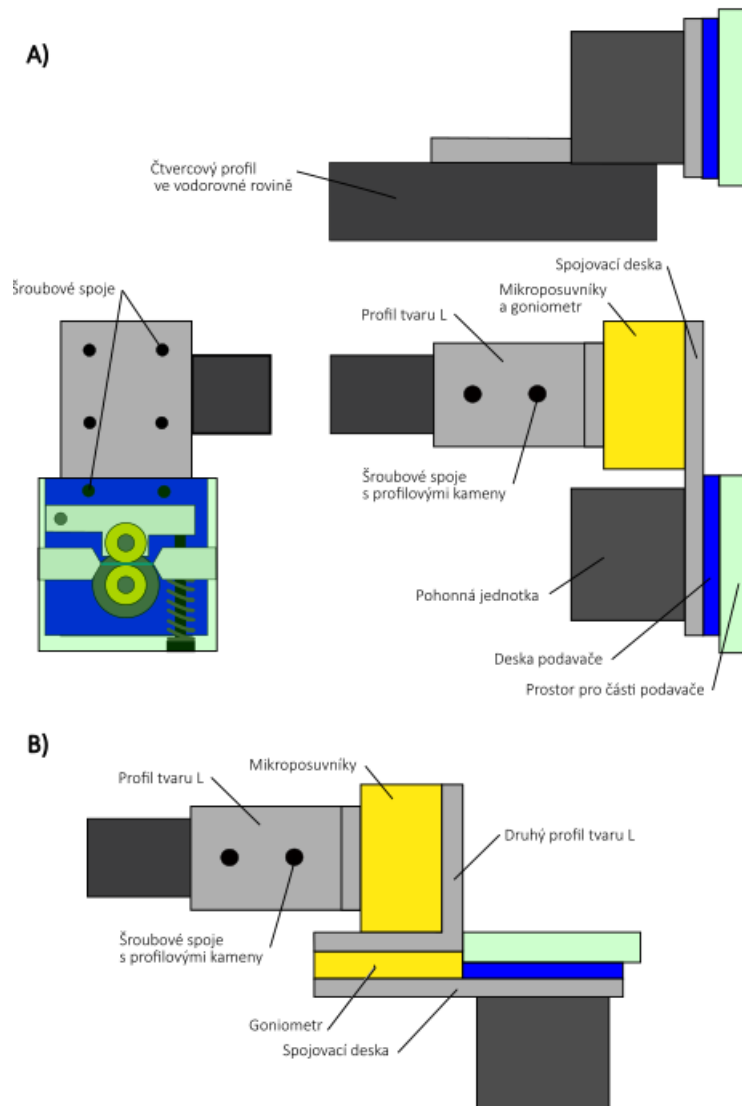
Obrázek 35: Zjednodušený model goniometru v aplikaci Autodesk Inventor.

K sadě mikroposuvníků bude přiřazen i goniometr. Díky goniometru bude možné natočit hlavu nebo podavač o přesný počet stupňů a pomocí goniometrických funkcí dopočítat polohu výstupu ve třetím rozměru.

První koncept hlavy

Rozhodnutí upřednostnit přesný pohyb pomocí mikroposuvníků v horizontální rovině nebrání návrhu hlav s vertikální rovinou posuvníků, protože dohodnutým faktem zůstává, že pohyb by měl v jistém směru vynahrazovat i pohyblivý stolek. Příkladem návrhu hlavy s posuvníky ve svislé rovině je koncept číslo jedna s označením A). Základní profil ve tvaru L je uložen do vodorovně položeného čtvercového profilu. Na něj navazují takto otočené mikroposuvníky, k nimž je přišroubována spojovací deska. Tato součást spojuje část posuvnou s částí podavače. Skrz desku je prostrčena pohonná jednotka. Mohlo by se jednat například o zástupce ze skupiny krokových motorů. Ty jsou poměrně lehké, snadno ovladatelné, protože je posuv realizován v jednotlivých krocích. Nevýhodou podobného řešení je špatně situovaný goniometr. Pro koncept hlavy je velice výhodné umístit mikroposuvníky a goniometr do série, protože to ušetří výrobu dalších desek či jiných úchytných prvků. Pokud by mělo

dojít k repozici goniometru, tak by měl být uložen někam mezi pohonnou jednotku a mikroposuvníky. Shora by byl uchycen L profilem a zespoda by byl připevněn ke spojovací desce, u níž by došlo k rotaci o 90 %, takže by podavač pracoval ve vodorovné poloze. Načrtnuto v obrázku B).



Náčrt A) znázorňuje hlavu s mikroposuvníky a goniometrem v sériové poloze.

Náčrt B) ukazuje hlavu s přepracovanou pozicí goniometru.

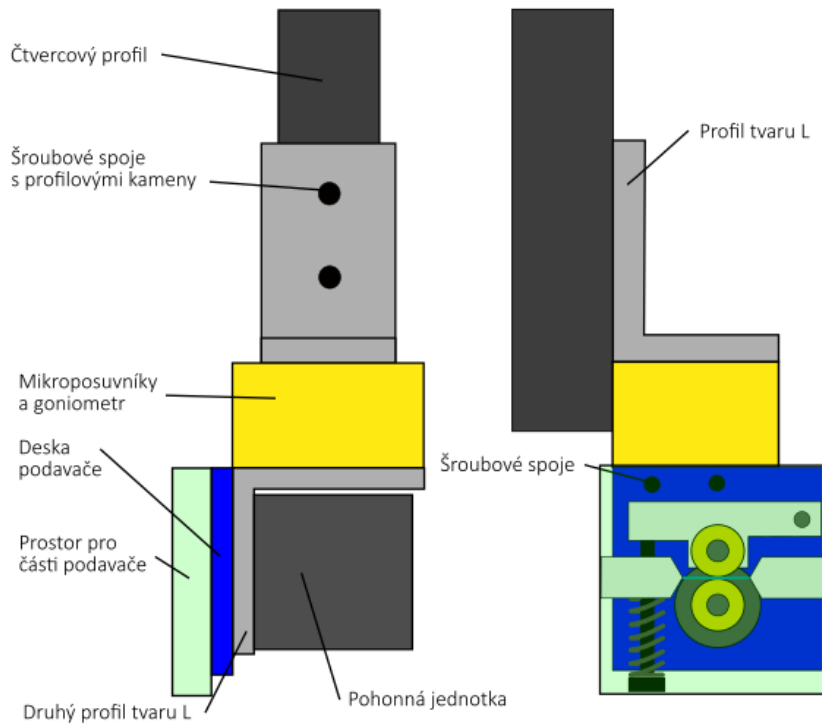
Obrázek 37: Náčrt prvního konceptu hlavy ve dvou variantách.

Druhý koncept hlavy

Druhým konceptem hlavy je systém, jež umísťuje mikroposuvníky, podobně jako koncept 1 A, do horizontální roviny. Jedná se návrh, který se spoléhá na sadu na sebe navazujících profilů ve tvaru L. Ačkoliv posuv ve svisle uloženém čtvercovém profilu vyžaduje větší přítlak a vysoký koeficient tření, tak je umístěn tak, aby byl snadno dostupný a lehce rozebíratelný. Spodní část je dobře vyvážená, jelikož těžiště celé soustavy se posouvá více ke středu. Pomocí sériového seřazení posuvných komponent jednu na druhou je návrh jednodušší a ekonomicky úspornější. Mikroposuvníky dovolují

přesný posuv v horizontální rovině, zatímco goniometr umožňuje mírné naklonění, aby docházelo k podávání pod určitým úhlem.

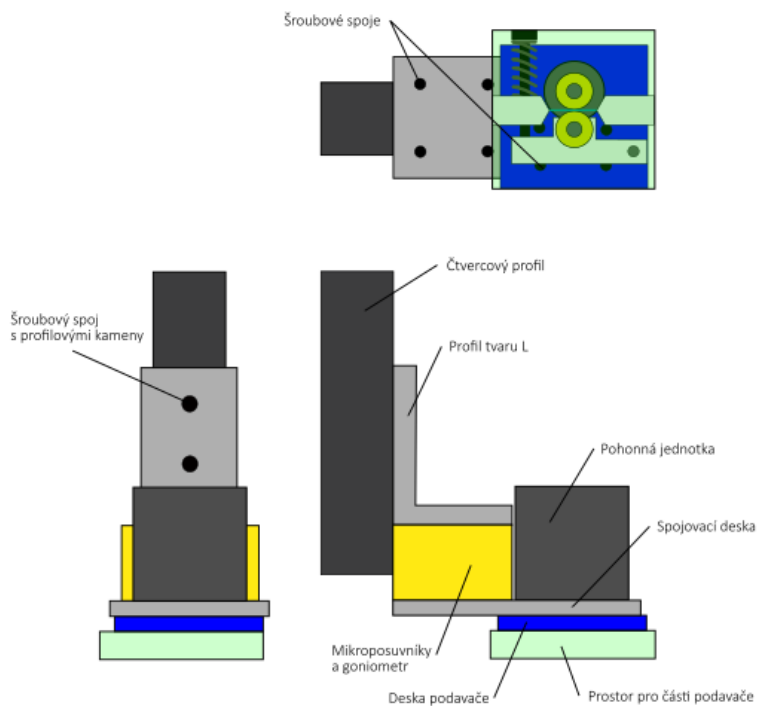
Řešení 2. možné konstrukční varianty hlavy:



Obrázek 38: Náčrt konceptu druhé hlavy uložené na čtvercový profil ve vertikální rovině.

Třetí koncept hlavy

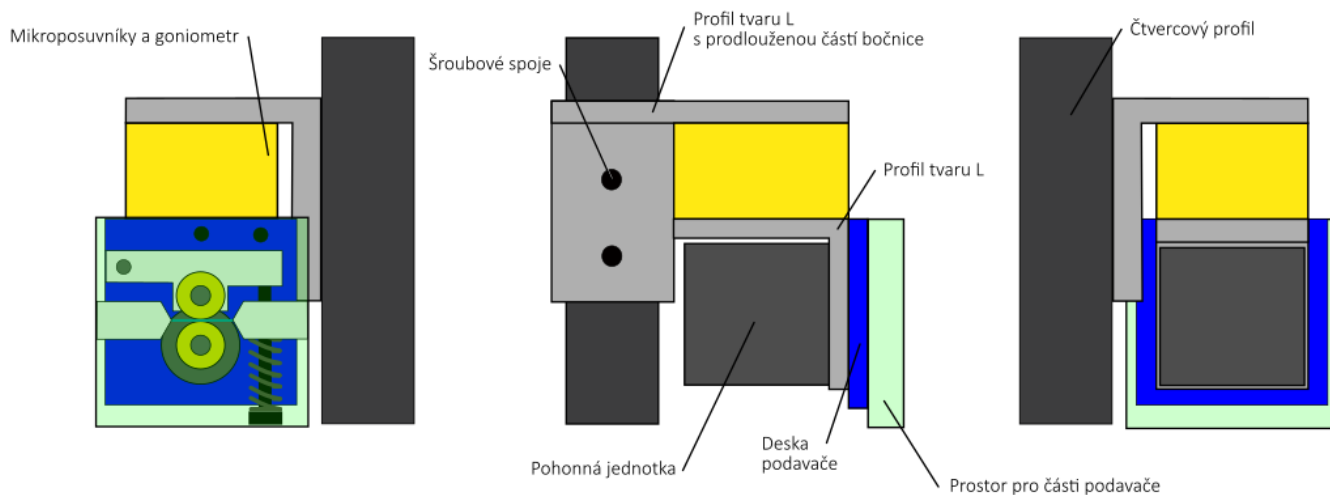
Třetí variantou je hlava umístěna podobně jako předchozí na vertikálně uloženém čtvercovém profilu. Toto řešení se liší pouze uspořádáním části podavače, který se nachází ve vodorovné rovině.



Obrázek 39: Náčrt konceptu třetí hlavy s podobným uložením na profilu, ale odlišným uspořádáním komponent pod mikroposuvníky a goniometrem.

Čtvrtý koncept hlavy

Poslední řešením hlavy pro 3D tisk skla je koncept s otočeným L profilem u čtvercového profilu. Bočnice L profilu je částečně prodloužená, aby vytvářela rovinu pro uchycení sady mikroposuvníků a goniometru. Zespuď této sady je další L profil, který vyvádí podavač stranou. Výhodou této myšlenky je uspořádání částí, jež přináší volný prostor pro podavač s motorem.



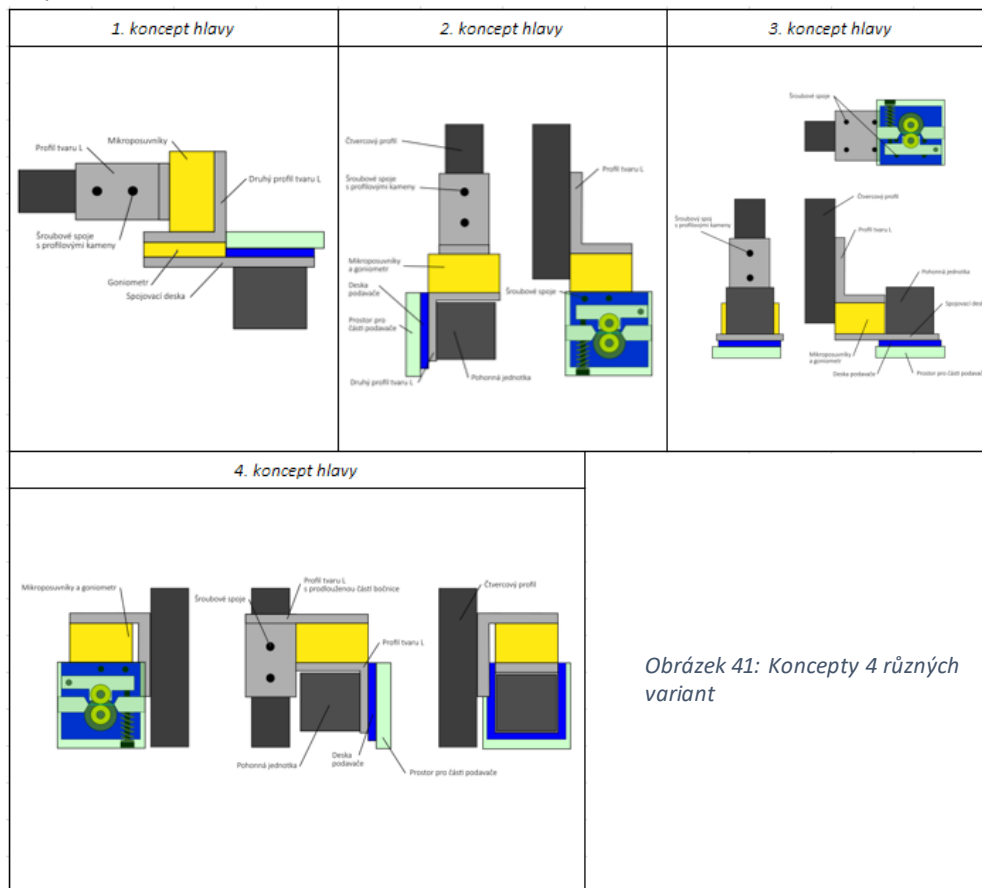
Obrázek 40: Náčrt konceptu čtvrté hlavy s těžištěm daleko od osy čtvercového profilu.

Rozhodovací analýza hlavy

Volba alternativního řešení hlavy by měla pomoci najít vhodný koncept pro následnou realizaci. Protože byly vytvořeny více než dvě varianty, tak je to nesporný důkaz toho, že zvolené konstrukční řešení je flexibilní. Přidáním dalších prvků, rotací částí nebo posuvem v prostoru bylo docíleno vzniku dokonce čtyř různých konceptů.

První koncept hlavy byl umístěn na vodorovně položený čtvercový profil, za účelem ukázky složitosti konstrukce podobného typu. V předchozí kapitole byly jasně definovány požadavky na pohyb mikroposuvníků v prostoru a bylo stanoveno, že vzhledem ke tvaru a funkci mikro posuvníků by se měly nacházet především v horizontální poloze, aby umožnily posuv v té samé rovině. Goniometr musel být umístěn tak, aby bylo možné podavač naklonit v ose rovnoběžné s osou profilu. Vznikl tak relativně funkční návrh, jenž obsahuje pouze o jeden prvek navíc. Druhý koncept byl postaven na čtvercovém profilu umístěném vertikálně. Řešení je velmi jednoduché a jeho těžiště je umístěno přímo blízko přichycení, tudíž nijak nevybočuje. Třetí koncept je postaven podobně jako druhý. Nevýhodou mu je pozice pohonné jednotky a podavače. Podavač musel být situován směrem dolů, aby byl dovolen vstup vlákna. Takže systém pohonu zůstal v horní části. Další negativní vlastností je bezesporu pozice nastavitelných prvků mikroposuvníků. Jedná se o krátké hřídele vystupující do prostoru v na sebe kolmých směrech. Jedna z nich by byla nucena vstoupit do prostoru čtvercového profilu. Řešení hlavy má být pohyblivé, ale tento prvek by musel být umístěn pod profilem, což by znamenalo horší manipulaci. Poslední čtvrtý koncept je tvarově velmi kompaktní. Malým nedostatkem tohoto řešení je

vychýlení na stranu, takže těžiště se může potenciálně, v závislosti na váze motoru, posunout daleko od úchytu k profilu.



Obrázek 41: Koncepty 4 různých variant

Pro výběr správného řešení byla použita tato kritéria:

1. Potřebné místo v prostoru
2. Rozebíratelnost
3. Dostupnost prvků podavače, goniometru a mikroposuvníků
4. Náklady na výrobu

Párové srovnání alternativ				Matice užítlosti alternativ									
Koncept hlavy:				X.		1.		2.		3.		4.	
číslo	počet voleb	pořadí významnosti	váha	Hodnota		Hodnota		Hodnota		Hodnota		Hodnota	
				prostá	vážená	prostá	vážená	prostá	vážená	prostá	vážená	prostá	vážená
1.	1	3	2	100	200	40	80	50	100	50	100	50	100
2.	2	2	3	100	300	50	150	70	210	50	150	70	210
3.	3	1	4	100	400	75	300	75	300	25	100	75	300
4.	0	4	1	100	100	45	45	60	60	60	60	55	55
Celkem					1000		575		670		410		665
Užitnost v relativním vyjádření [%]							57,5%		67,0%		41,0%		66,5%
Pořadí alternativ podle užítlosti:							3.		1.		4.		2.

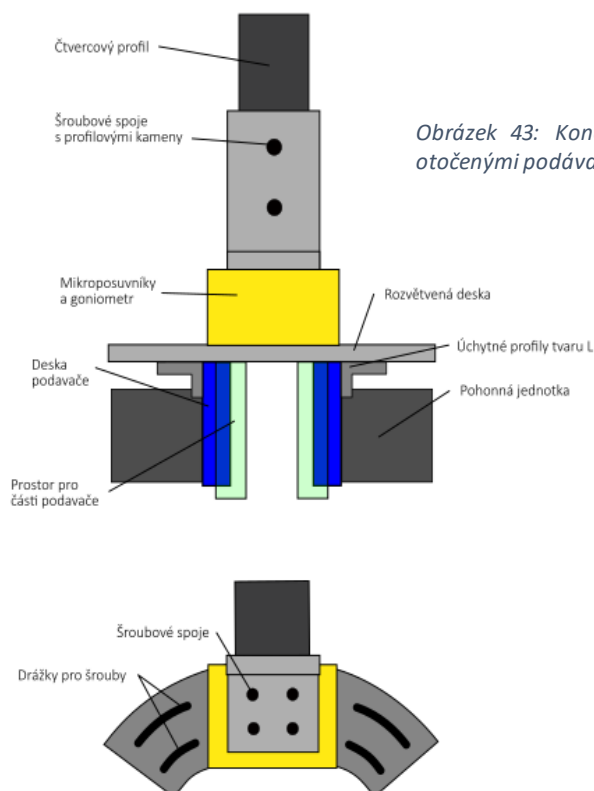
Obrázek 42: Rozhodovací analýza konceptů hlavy vytvořená v Microsoft Excel

Řešením s největším počtem užitenosti v relativním vyjádření se 67,0 % stává koncept druhé hlavy. Pokud by došlo k zaokrouhlení i na celá čísla, tak by přibylo i čtvrté řešení, jež dosáhlo 66,5 %. Jak již bylo řečeno, tak všechny koncepty jsou si velice podobné a pokud by to vyžadoval prostor, tak by mohlo dojít k jednoduché přestavbě na koncept čtvrtý nebo na jinou koncepci více-vláknové hlavy.

Návrh hlavy pro více vláken

Návrh více-vláknové hlavy vyplývá z výchozích výsledků rozhodovací analýzy. Pro podávání je předem určen podavač, tudíž ústrojí hlavy slouží spíše jako pomocná konstrukce k přesnému navedení filamentu do konkrétního prostoru. Všechny varianty návrhu hlavy spojuje společný prvek L profilu nebo desky uchycující podavač s motorem k posuvné části celku. Pokud by tento prvek byl mírně pozměněn a rozšířen, otevřely by se možnosti pro vnesení dalších podávacích jednotek. Problémem je pouze prostor a neznámá pozice laseru. Hlava není pohyblivé zařízení, proto, za předpokladu stacionárního laseru, jakékoliv návrhy uložení podavačů se vzájemně rovnoběžnými osami naprosto ztrácí smysl. Zařízení nebude schopné dostatečného pohybu, aby se druhý podavačem dostalo do místa expozice.

Realizovatelnou možností je však vyvádění všech vláken do jednoho jediného bodu. Střetnutím os v centrálním bodě se docílí lepší preciznosti při střídavém podávání více vláken z různých zdrojů. K tomuto účelu by mohla velmi dobře posloužit zaokrouhlená deska nebo deska se dvěma rameny. Ramena by podavače natočila do správné pozice, takže by se vlákna střetla. Podavače by byly upevněny



Obrázek 43: Koncept hlavy nesoucí dva podavače vláken otočenými podávacím mechanismem směrem k sobě.

k desce zkráceným L profilem. Jestliže by deska mírně zkroutila to tvaru C, mohl by se podavač posouvat například v podélné drážce šroubu, tudíž by se zlepšila jeho adaptabilita na vnější podmínky.

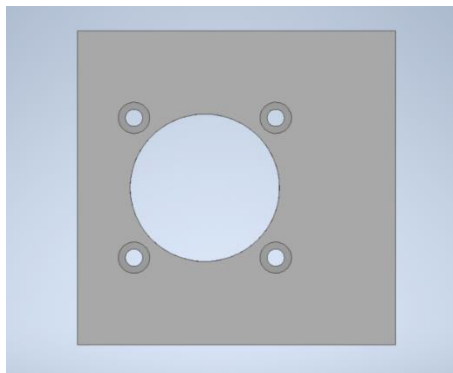
Technické řešení

Řešení podavače

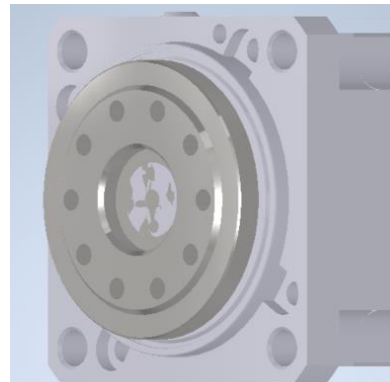
Technické řešení podavače vyplývá z rozhodovací analýzy. Ta ukázala, že nejlepší užití řešení bude 2. koncept, návrh sestávající se ze základní desky, dvou vodících modulů, pohonné jednotky a páky.

Pohonná jednotka

Pro pohon byl zvolen, na katedře dostupný, rotační aktuátor DriveSpin DS50 s cykloidní převodovkou a střídavým synchronním servomotorem. Ačkoliv je zařízení vůči předpokládané velikosti podavače poměrně velké a těžké, tak je snadno ovladatelné a díky uzavřené konstrukci nevyžaduje žádnou údržbu. Aktuátor je vhodný pro robotická zařízení, manipulátory, CNC stroje, ale i lékařské přístroje a radarové systémy. Na katedře byl tento pohon součástí mnoha projektů, takže bude jednodušší jej opětovně zapojit a uvést do provozu bez jakýchkoliv nákladů. Již v návrhu bylo předpokládáno, že servomotor bude vyžadovat průchod základní deskou. Za tímto účelem byla v desce v místě hnací rolny ponechána kruhová díra.



Obrázek 45: Deska s dírami pro šrouby.



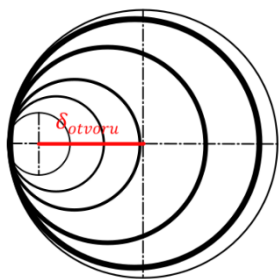
Obrázek 44: Příruba motoru.

Kromě hnacího prvku bude potřeba motor také uchytit. Základní model motoru obsahuje 4 symetricky uložené průchozí díry pro šrouby velikost M5. Materiál desky je kvádr o ploše 110 x 100 mm a tloušťce 8 mm. Tato tloušťka slouží k zapuštění některých prvků a dovoluje tvorbu závitů. Pro zápuštěné šrouby s vyšší hlavou nad rozměr M4 je 8 mm nedostačujících.

Pro správné usazení příruby je potřeba zvolit přesnou toleranci, tak aby osazení kolem příruby těsně dosedlo do desky. Ve výsledku motor pevně dosedne do desky, což eliminuje některé vlastní kmity a dovolí přírubě volnou rotaci.

Dalšími díly jsou moduly, které budou zabíhat přímo do oblasti rolen. Díky tomuto faktoru se zlepší vedení vláken. Během experimentů byla použita vlákna různých rozměrů a s měnícími se rozměry se mění i otvor. Při využití relativně velkého množství průměrů skelných vláken by se mohlo stát, že

univerzální vodící otvor by některé vlákna vyváděl nepřesně. Pákový mechanismus je velmi jednoduchý. Hnací rolna tvoří stacionární člen a hnaná rolna na páce je přitlačným členem. Když dojde k přitlaku, tak se přitlačný člen přitlačí na vlákno, jež se opře o stacionární člen. V tuto chvíli je vlákno jednou svou stranou plně opřeno o stacionární člen. Kdyby byl vyvoláván přitlak a zvětšoval by se průměr vlákna, tak by se jeho střed neustále posouval více a více ke druhé straně otvoru, dokud by se vlákno nedotklo stěny. To znamená, že rozdíl největšího a nejmenšího vlákna v otvoru vytváří odchylku, která by se objevila, pokud by byl použit univerzální otvor. Tomuto problému je zapotřebí se vyhnout.



Obrázek 46: Odchylka způsobená změnou velikosti vlákna.

$$R_{MAX} - R_{MIN} = \delta_{otvoru}$$

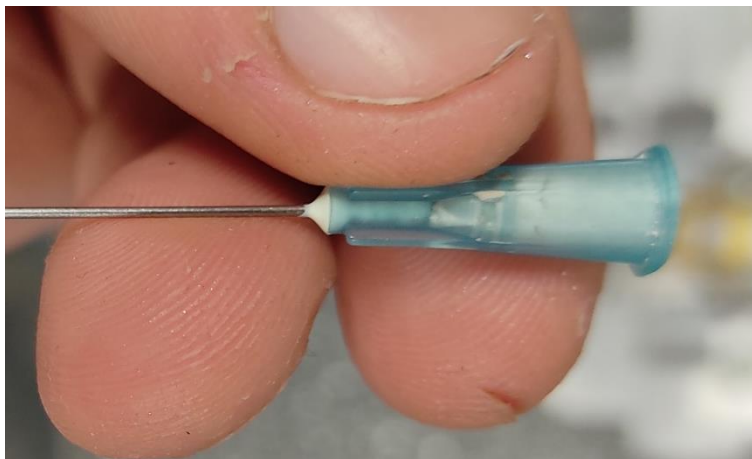
Řešením by se mohlo stát individuální vedení vláken, například dle průměru. Vstupní a výstupní moduly by nebyly tudíž všestrannými, ale naopak vyměnitelnými částmi, jimiž by se modifikoval podavač. Toto řešení je ekonomicky poměrně náročné, jelikož při použití vláken od 125 μm do 1 mm by bylo zapotřebí udělat nejméně 3 páry modulů. Dalším problémem je technologie. Výroba dlouhých a tenkých a hladkých otvorů o průměru nejméně 250 μm vyžaduje speciální vybavení, které na univerzitě není dostupné. Nejbližší technologií výroby je 3D tisk, metoda FFF vytváří produkty s vysokou přesností, ovšem díry by nemusely být hladké a nejspíše by bylo nutné je protáhnout nějakým mikro-nástrojem.

Poslední možností je do modulů vsunout jehly. Injekční jehly jsou vyráběny s vysokou přesností pro správné dávkování látek. Protože jen několik málo miligramů podaných léčiv navíc, může rozhodnout o životě nebo smrti. Kanyly se vyrábí ve velikostech od 200 μm do 3,4 mm na vnějším průměru. Hlavní vlastností je správný průtok, proto výrobci neuvádějí tloušťku stěn. Odhadovaná velikost stěny je kolem 100 μm .

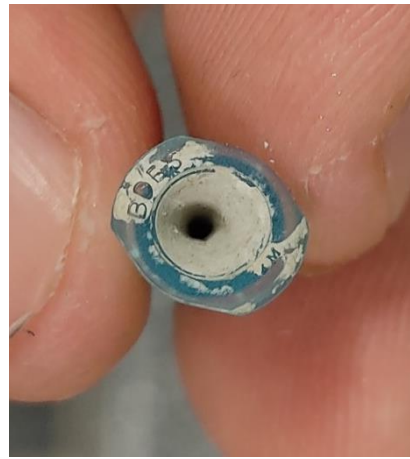
Pro odzkoušení bylo nakoupeno několik velikostí jehel v různých velikostech od 0,4 mm do 0,7 mm a bylo vybráno tužší 325 μm vlákno, se kterým se lépe manipuluje. V prvních pokusech s menšími průměry kanyl se vlákno opakovaně lámalo, protože otvory byly moc malé. Až u kanyly o 600 μm průměru bylo vlákno úspěšně provléknuto skrz. Při pokusu bylo zřejmé, že vlákno nemá možnost radiálního pohybu, takže bude minimalizována výchylka. Problémem se ale stalo zavádění. Ze strany jehly se dalo opřít o zkosenou špičku, takže vlákno hezky vklouzlo dovnitř, ovšem ze strany druhé byl vstup do jehly na vypouklém vrcholu obklopen velice tenkou drážkou, takže šlo vlákno provléci jen se štěstím.

Bylo potřeba zúžit nebo zaplnit vnitřek nástavce jehly, aby zbyla jen vstupní díra. Řešením byla výplň. Při správně vyplněném prostoru by procházelo jen vlákno. Začalo se proto s hledání vhodného materiálu na výplň. Vzorovou výplní se stala zubní plomba. Materiál zubních plomb je hladký a tvrdý, takže by potenciálně nejlépe vedl vlákno. Nakonec byla vybrána velmi jemná sádra. Se sádrrou se velice dobře pracuje. Po zatvrdnutí má vysokou tvrdost a hladkost povrchu záleží především na velikosti zrn.

Výplň nástavců jehel probíhala následovně. Ze jehly se umístil špendlík, jež se zatlačil do vstupního otvoru. Šla by použít i jehla s menším průměrem, ale špendlík je delší a má hrot ve tvaru



Obrázek 48: Viditelnost vyplněného prostoru.



Obrázek 47: Výplň rotačně hyperbolického tvaru.

rotačního kužele, tudíž se snadněji vtačil do díry. Pak se namíchala sádra a pomocí špejle se vtěsnala veškerá hmota dovnitř, aby se co nejvíce zaplnil okolní prostor. Nakonec se krouživým pohybem špendlíku ve nástavci jehly vytvořil vstupní kužel pro lepší vstup vlákna a celek se odložil ke zdroji tepla k vytvrzení.

Ostatní materiály jako jsou tmely a pryskyřice mají velmi dobré mechanické vlastnosti. Příkladem jsou například epoxidové a akrylátové pryskyřice na zalévání laboratorních vzorků, které jsou snadno vytvrditelné a velice tvrdé. Jejich nevýhodou je počáteční tekutý stav, jež by v tomto případě vyžadoval negativ. Pro automatizaci procesu vkládání vlákna by bylo nejlepší použít negativ s tvarem rotačního kužele či rotačního hyperboloidu, aby filament mohl snadno vklouznout dovnitř jehly. Avšak pro experimentální práci, kde jsou zapotřebí jen 4 kusy, je lepší využít jednodušší i cenově dostupnější variantu a vyplnit nástavce kanel sádrrou.

Vstupní a výstupní modul

Vstupní a výstupní moduly budou mít vzájemně velice podobný tvar a pouze se lišit zaváděcími podmínkami. Oba moduly by měly obsahovat vstupní otvor pro nástavec jehly a otvory pro uchycení k základní desce umístěné zespodu. Vstupní modul bude navíc od společného modelu obsahovat i rozšířenou část vstupního otvoru pro trubičku se stabilizačními prvky v podobě šroubů. Šrouby ve

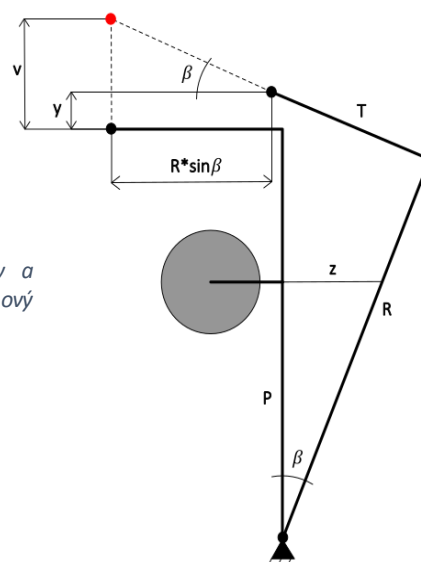
formě červíků zachytí ostrým vrcholem trubičku, čímž se zamezí posuv ve směru osy. Radiální posuv trubičky bude zajištěn předepsaným rozměrem díry s vnitřní tolerancí. Díky dorazu trubičky na konec rozšířené části otvoru bude zároveň zabezpečen nástavec kanely proti posuvu ve směru osy vlákna. Nástavec jehly má tvar tupého kužele. Poněvadž je obtížné změřit jeho zkosení, natož jej vyrobit, tak je vybrána druhá varianta bodového dotyku. V tomto případě je nástavec vmáčknut do dvou na sebe navazujících děr s odlišnými průměry a přechodem se zkosením. Varianta dvou navrtávaných děr byla vybrána, protože technologicky je mnohem jednodušší vyvrtat do materiálu dvě díry se stejnou osou než obrobit dovnitř kužel s malým úhlem klesání.

Nástavec jehly byl velice přesně změřen na dvou místech, na vstupní části s okrajem a ve středu. Očekávalo se, že polymerní materiál se vmáčknutím do těsného otvoru lehce zdeformuje a zapadne do díry. Pro naprostou jistotu této teorie byl udělán velice jednoduchý pokus. Sestrojil se vzorník děr s různými poměry těchto průměrů a v různých vzdálenostech, aby se zjistilo, do které díry zapadne nejlépe. Zřetelný úspěch zaznamenala poslední varianta s první dírou o průměru 5,9 mm do hloubky 7,7 mm a druhou dírou vrtákem $\varnothing 4,9$ mm skrz.



Obrázek 49: Fotografie Ing. Michala Starého, Ph.D vzorníku děr.

Dalším prvkem, jímž se bude vstupní modul lišit je otvor pro průchod dřívku šroubu s pružinou. Velikost a tolerance této části záleží především na naklonění šroubu při posuvu páky. Za předpokladu, že by délka páky v ose tohoto otvoru R činila 90 mm a v $P = 50$ mm by byla rolna, přičemž šroub by v polovině díry dosahoval $T = 40$ mm od páky a velikost vlákna se změnila o $z = 400$ μm , tak by vznikl úhel β odpovídající:



Obrázek 50: Náčrt pootočení páky a svislého posuvu šroubu v díře. Kruhový obrazec je vlastně rolna.

$$\beta = \arctan\left(\frac{z}{p}\right) = \arctan\left(\frac{0,4}{50}\right) = 0,458^\circ$$

Samotná páka by se otočila kolem své osy o úhel β a její vertikální rozměr by se zmenšil, ale šroub by také rotoval a hodnotu by naopak o něco málo zvětšil. Značí to, že by se bod posunul po kruhové dráze ve vertikálním směru o hodnotu y :

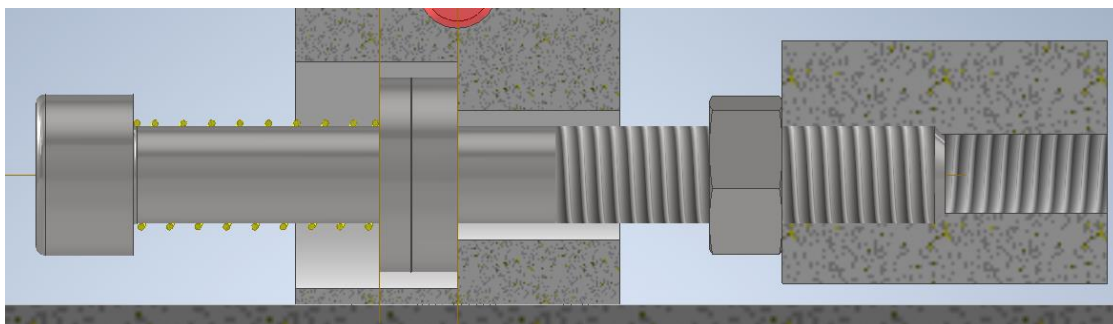
$$y = T * \sin\beta + R * \cos\beta - R = 40 * \sin(0,458) + 90 * \cos(0,458) - 90 = 0,317 \text{ mm}$$

Jelikož se jedná o vertikální posuv bodu na šroubu ve vzdálenosti 40 mm kolmo od páky a 90 mm od osy rotace, tak je tento posuv pouze částí celkové hodnoty. Šroub plně prochází otvorem v modulu, tudíž tento bod se pohybuje na radiální ose díry a zároveň na ose šroubu. Dá se logicky předpokládat, že tento rozměr y by se vlivem posuvu v ose šroubu zvětšil na velikost v . Proto minimální vůle nutná pro jeho pohyb v díře činí zhruba 0,5 mm, přesněji:

$$v = y + \tan\beta * R * \sin\beta = 0,317 + \tan(0,458) * 80 * \sin(0,458) = 0,322 \text{ mm}$$

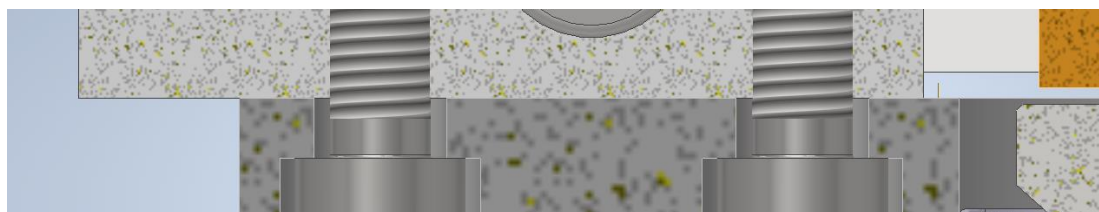
V návrhu je pro případ špatně vyvrtané díry v místě osy rotace páky nebo pohybu modulu v radiálním směru k ose vedení vlákna zvolena vyšší vůle 1 mm.

Na to samé místo bude doléhat pružina. Teoreticky by mohla být opřena o stranu modulu. Pokud by byla opřena o holou stěnu, mohlo by se stát, že by se začala kroutit kolem díry a případně do ní i spadla. Pokud se pružina zapustí do otvoru šroubu, zabrání se jejímu možnému pohybu po ploše.



Obrázek 51: Snímek řezu modelem podavače v oblasti díry vstupního modulu, jímž prochází šroub s pružinou a kluznou podložkou. Šroub je v levé části uchycen do páky.

Zvolená pružina je tlačná pružina s označením TLZ 040.068.0292. Jedná o pružinu s průměrem drátu 0,4 mm, vnějším průměrem 6,8 mm a délkou 29,2 mm, která se navlíkne na šroub. Pružina svým vnitřním rozměrem velmi přesně doléhá na dřík, díky čemuž se nebude kroutit. Síla pružiny ve stlačeném stavu je 2,43 N, což je více než dostatečná hodnota pro přitlačení skelného filamentu. Protože šroub bude mít jistou vůli, tak se na konec většího otvoru uloží kluzná podložka, která zajistí,

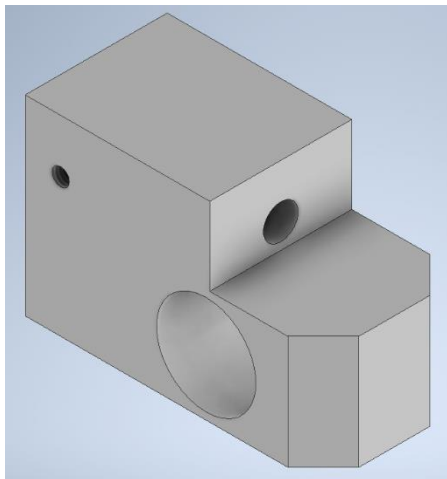


Obrázek 52: Díry pro šrouby s větším průměrem pro usnadnění manipulace.

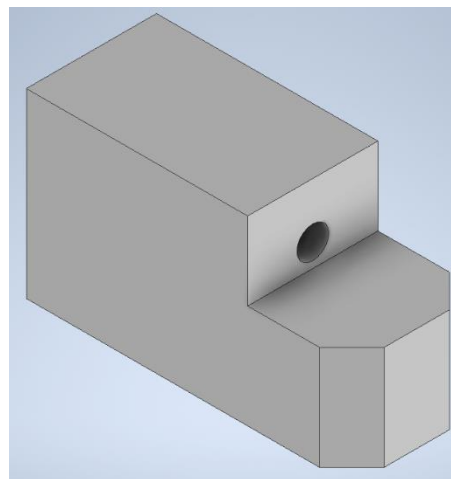
že se pružina neprovlékne. Podobně jako šroub bude vyžadovat i podložka minimálně 1 mm vůle, aby se mohla hýbat společně s pákou. Pružina bude zapuštěna až do poloviny modulu, čímž se ušetří prostor.

Poslední částí vstupního modulu je upevnění ke základní desce. Spoj bude realizován zápustnými šrouby do zadní části desky. Díry v desce musí být o trochu větší. Důvodem je fakt, že pokud by se díry na moduly vyvrtaly nepřesně, ačkoliv stále v toleranci, tak by mohlo dojít k vychýlení osy vlákna a zlomení v místě vstupu do rolen. Rizikovým faktorem jsou zvolené jehly. Sice navedou vlákno velice přesně do zóny posuvu, ale je jistá šance, že se vlivem výrobních nepřesností nestřetnou. V ideálním případě by obě kanely měly mít společnou osu. Zvětšením děr se docílí jisté pohyblivosti, která se využije k doladění a dotažení modulů ve správné pozici.

Výstupní modul má, jak už bylo řečeno, velmi podobnou konstrukci. Se vstupním modulem se shodují tvarem, uchycením k desce a nosnou částí na nástavec jehly. Liší jen v několika málo hledech,

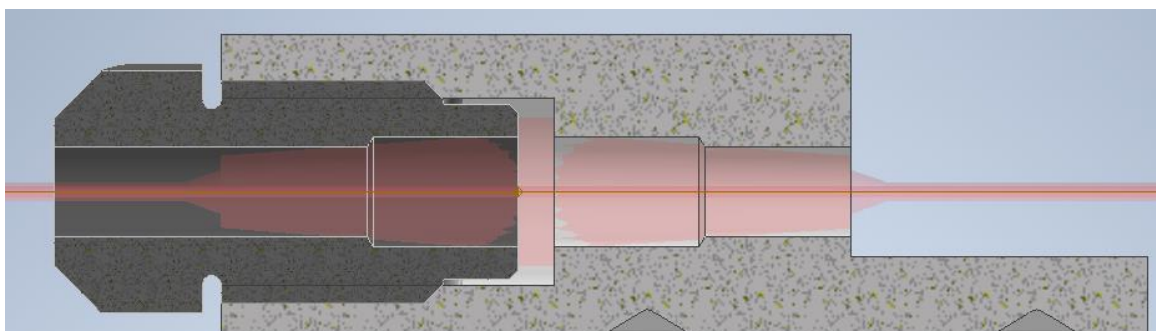


Obrázek 54: Model vstupního modulu.



Obrázek 53: Model výstupního modulu.

jako je výstup z jehly a její upevnění. Výstupní modul bude orientován obráceně. Vlákno se provleče kanelou a vystoupí nástavcem, na níž bude navazovat další jehla, jež poslouží jako koncový člen. Důvodem pro konstrukci jehly navazující na jehlu je více. Čistě teoreticky, pokud by filamentem bylo optické vlákno s dobrými optickými vlastnostmi a bylo natavováno laserem, tak by mohlo během



Obrázek 55: Řez modelem podavače v oblasti výstupního modulu s tryskou a průhlednými vzájemně navazujícími jehlami.

procesu podávání dojít ke kontaminaci vlákna z venkovního prostoru. Prvním důvodem je tedy znečištění, druhým konstrukce a vsazení jehly. Během procesu posuvu filamentu by bylo nejlepší, aby systém navazoval hned na upravený kuželovitý vstup nástavce jehly. Jenže to by vyžadovalo vsunutí jehly zvenčí a prakticky nic by pak nezaručilo, že nástavec během procesu, například vlivem vlastní frekvence motoru, nevyskočí a jehla neskončí pověšená na vlákne. Možností by bylo použití dalšího přidržujícího prvku, čímž by se posunula vstupní část o pár milimetrů dovnitř a vlákno by se zavádělo naslepo. Navržený systém dvou na sebe navazujících jehel může pracovat při vyjmutí první vstupní jehly v naprosto totožných podmínkách, tedy „naslepo“. Protože vlákno je dostatečně pevné, takže by na vzdálenost maximálně 50 mm mělo mít téměř nulový pokles.

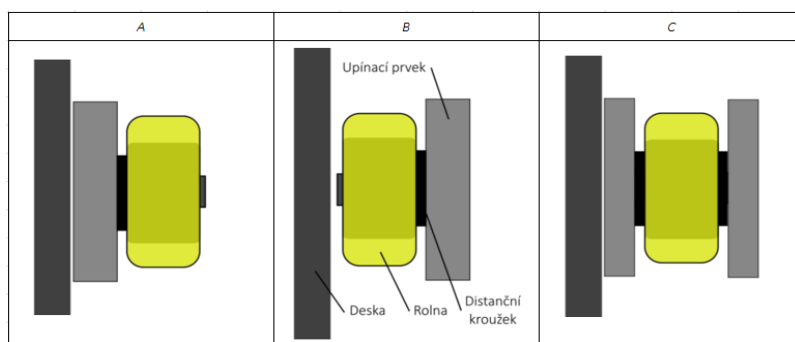
Kvůli vzájemnému napojení jehel by nástavce měly být umístěny co nejblíže k sobě. K tomuto účelu slouží výstupní část trysky. Tryska ve tvaru šroubu se zašroubuje do otvoru se vnitřním závitem a tím se přimáčkne oba nástavce k sobě. Uvnitř trysky je otvor shodný, jako mají oba moduly. Kanela bude moci volně projít skrz a zároveň bude uchycena tak, aby nedošlo k náhodnému pohybu. Vnější část trysky je obrobena do tvaru čtverce s 13 mm, který usnadňuje manipulaci.

Páka

Základní tvar páky bude vycházet z velikosti rolny a umístění přitlačného šroubu. Pro usnadnění výroby bylo rozhodnuto, že se celek rozdělí do dvou částí. První část bude tvořit zmíněný koncept páky se vstupem pro šroub a druhá přidrží rolnu v požadované poloze nad deskou.

Druhá část (upínací část páky) by mohla mít několik alternativ. Začíná se druhou částí, protože ta stanovuje odchylku rolny částečně ovlivňující tvar první části. Varianta A by držela rolnu ze strany desky. Nahoře by rolna byla odkrytá a lépe by se s ní manipulovalo, jenže to by vzdálilo rolnu od povrchu desky, takže by vystoupila více do prostoru. Společně s tím by bylo zapotřebí zvýšit moduly. Další alternativa B by třímala rolnu naopak seshora, což by posunulo rolnu naopak dolů. Výhodou by bylo i upevnění upínacího prvku shora usnadňující jakoukoliv manipulaci a demontáž.

Poslední varianta C by zachytila rolnu v mezi prostou tenkými rameny z obou stran. Sic to vypadá jako nejlepší řešení, tak ramena z obou stran by znamenala zmenšení prostoru pro povlak roln, což by rozhodně ovlivnilo obtížnost sestavování a nejspíše by se řešení přiblížilo alternativám A či B.



Obrázek 56: Alternativy řešení upínací části páky.

Rychlá rozhodovací analýza:

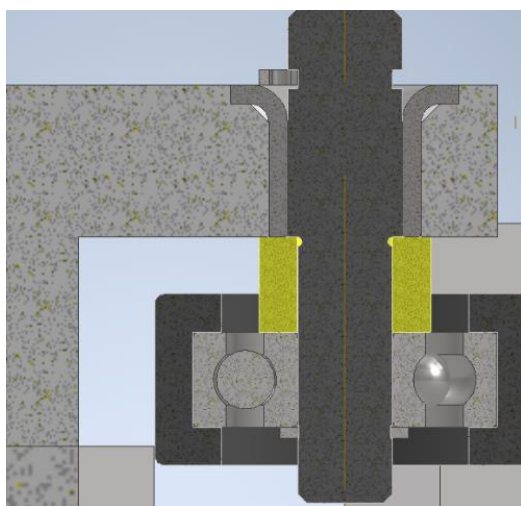
- Rozhodovací kritéria: 1) Vzdálenost rolny od desky
2) Rozebíratelnost
3) Náklady na výrobu

Párové srovnání alternativ				Matice užítivosti alternativ								
Alternativa:				X		A		B		C		
číslo	počet voleb	pořadí významnosti	váha	Hodnota		Hodnota		Hodnota		Hodnota		
				prostá	vážená	prostá	vážená	prostá	vážená	prostá	vážená	
1.	2	1	3	100	300	80	240	100	300	90	270	
2.	1	2	2	100	200	100	200	85	170	70	140	
3.	0	3	1	100	100	70	70	70	70	40	40	
Celkem					600		510		540		450	
Užitnost v relativním vyjádření [%]							85,0%		90,0%		75,0%	
Pořadí alternativ podle užítivosti:							2.		1.		3.	

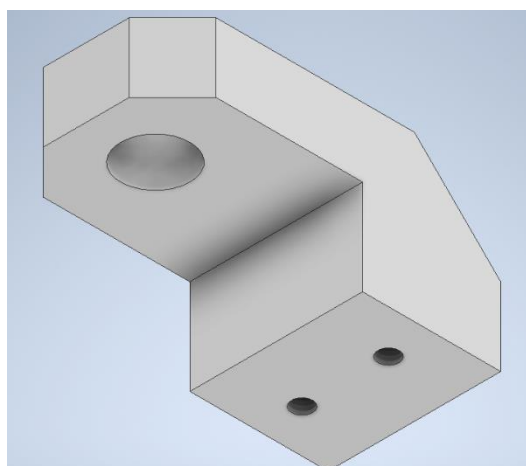
Obrázek 57: Rozebírací analýza upínacího (druhého) prvku páky v aplikaci Microsoft Excel.

Dle pořadí užítivosti je nejlepším řešením možnost B. Upínací prvek bude umístěn shora, což zlehčí a zjednoduší konstrukci páky.

Tato druhá součást bude zalomena do tvaru L. První část páky může mít na radiální ose rolen menší tloušťku, takže druhá část musí vystoupit lehce nahoru. Skrz rolnu a druhou část bude procházet malá hřídel. V části upínacího prvku bude navíc vedena přes kluzné pouzdro s přírubou. To umožní snadný průchod hřídele a dovolí i lehce rotovat. Na každé straně hřídele se dosadí jisticí kroužek, který zabraní posuvu rolny ve směru osy. Důležitým elementem je distanční kroužek, jež oddálí ložisko od upínací části, takže zamezí odírání stran povlaku rolny. Do spodní části upínacího prvku, ze strany první části páky, se udělají díry se závitem, které umožní spojit páku jako sestavu.

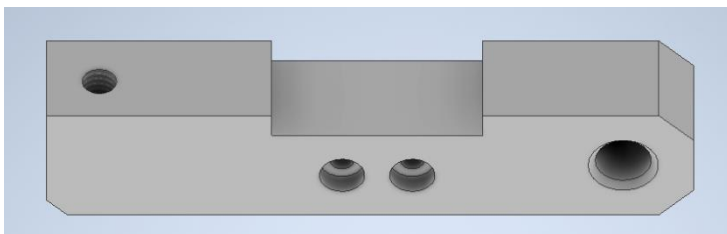


Obrázek 59: Řez modelem podavače pro ukázkou uložení hřídele a ostatních komponent ve vztahu s druhou částí (upínací částí) páky.

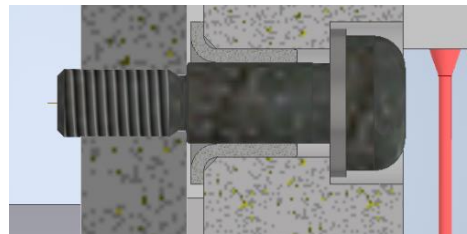


Obrázek 58: Model druhé části (upínací částí) páky.

První část páky je tvarem dlouhé rameno s upínacím prvkem (druhou částí) umístěnou ve středu a otvorem pro šroub na svém konci. Toto rameno se otáčí kolem své osy umístěné na desce vedle výstupního modulu. Pro rameno byl zvolen velmi jednoduchý tvar plochého kvádru se zkosenými hranami a vykrojenými prostory pro rolnu a druhou součást páky. Zespodu rameno jsou vytvořeny dvě díry pro zápusťné šrouby, čímž je zprostředkováno spojení první a druhé součásti. Osou páky prostupuje otvor se zapuštěným kluzným pouzdem s přírubou pro osazený šroub. Ložisko je přírubou otočeno a zapuštěno do ramene ze stran desky, takže vytváří distanc páky od plochy desky. Páče je tak umožněn plynulý a velmi hladký pohyb. Osazený šroub je zachycen dírou v desce s metrický závitem. Poslední elementem je díra pro tažný šroub s pružinou. Otvor se nachází na ose díry vstupního modulu a je zcela prostupný, tudíž je v případě potřeby možné vyměnit šroub či změnit velikost pružiny.



Obrázek 61: Model první součásti páky s viditelnými elementy upevnění jednotlivých prvků.

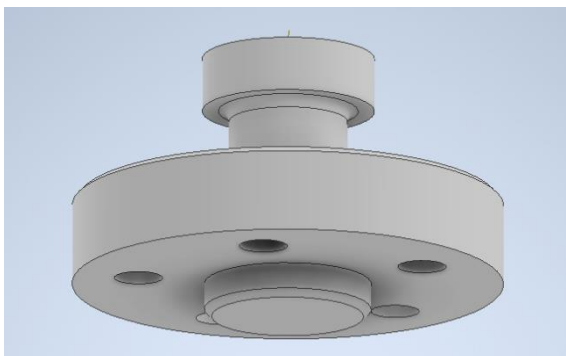


Obrázek 60: Řez modelem podavače v oblasti páky s osazeným šroubem a přírubovým kluzným pouzdem.

Rozšiřující příruba motoru s hnací rolnou

Tato příruba bude připevněna na přírubu motoru. Rozšiřující příruba se bude skládat z podstavce a výstupního členu ve tvaru rolny. Velikost rolny vychází z řešení páky, ve které bylo zvoleno hnané ložisko s konkrétními vnějšími rozměry. Stejnou velikost bude mít i druhá rolna, jež bude na podstavci vyvýšena mezičlenem ve tvaru úzkého válce. Rolny by měly být rozměrově stejné, aby nemuselo být modelováno a tisknuto více modelů povlaků.

Podstava tvaru plochého válce vznikla od příruby motoru, která je jeho výstupním členem. Tento člen pokrývá deset symetricky uložených děr se závitem kolem společné osy. Stejně prvky bude obsahovat i podstava, aby mohla plynule navázat na člen motoru. Počet děr je omezen na pět.



Obrázek 62: Model příruby s rolnou, mezičlánkem a podstavou se středící hřídelí.

Abyste nedocházelo ke kolizi s povlakem, jsou použity zápusťné šrouby, které se zapustí do podstavce. Zároveň to ušetří část prostoru, takže rolna nebude muset vystupovat moc vysoko.

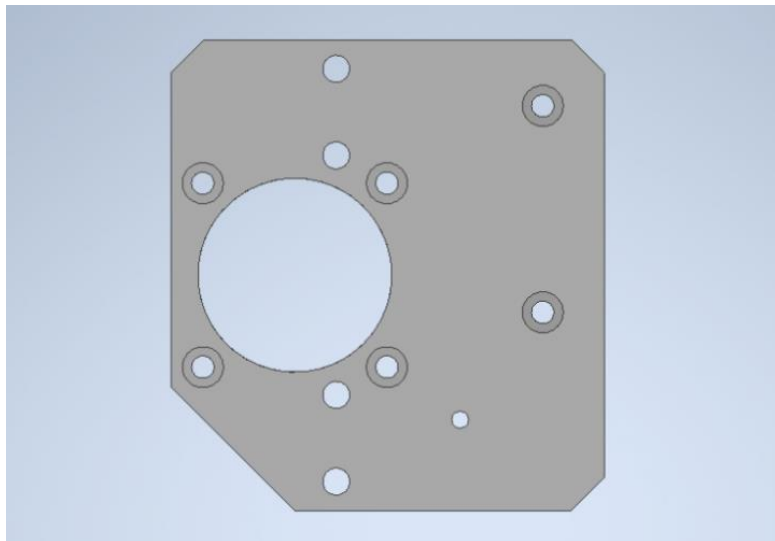
Ve středu motorové příruby se nachází ještě středící díra. Široký otvor tvaru plochého válce umožňuje navazující přírubě dokonalé vycentrování. Pro středící hřídel je zvolená specifická tolerance pro hřídele h7. Úchylka je velmi blízko nulové čáře neboli rozměru středícího díry, což zaručí, že nová příruba zasedne do té stávající u motoru s minimální vůlí.

Deska podavače

Deska podavače jakožto důležitý prvek by v celém procesu konstrukci postupně měněna, aby se přizpůsobila potřebám všech dílů a poskytla bezpečnou základnu. Ze začátku do ní byl vytvořen velký otvor pro průchod příruby, kolem něj byly symetricky rozmístěny další čtyři díry pro zachycení motoru. Během projektování vstupního a výstupního modulu přibýly čtyři díry umístěné v jedné ose těsně vedle díry pro přírubu. Poslední díra se zhotovila vedle otvorů pro výstupní modul a měla sloužit pro stabilizaci osy rotace páky.

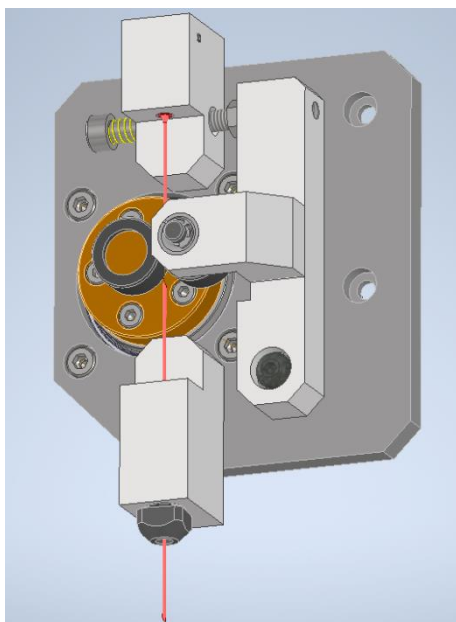
Podavač, jako zařízení, by měl být snadno odnímatelný. Při výměně vláken by se například mohl nacházet v prostoru se špatnou dostupností nebo by bylo potřeba zavést vlákno jiného průměru a vyměnit kanely. Přesně kvůli těmto účelům by podavač měl vytvořit samostatnou demontovatelnou jednotku v rámci hlavy. Deska se do strany mírně rozšíří, aby bylo možné vytvořit ještě dvě díry pro zápusťné šrouby. Tím se umožní zavěšení desky podavače a všech na ní navázaných komponent.

Obrázek 63: Model desky podavače se všemi modifikacemi



Postupnou úpravou modelu podavače se došlo až k výslednému řešení v této podobě:

Obrázek 64: Model dokončeného podavače

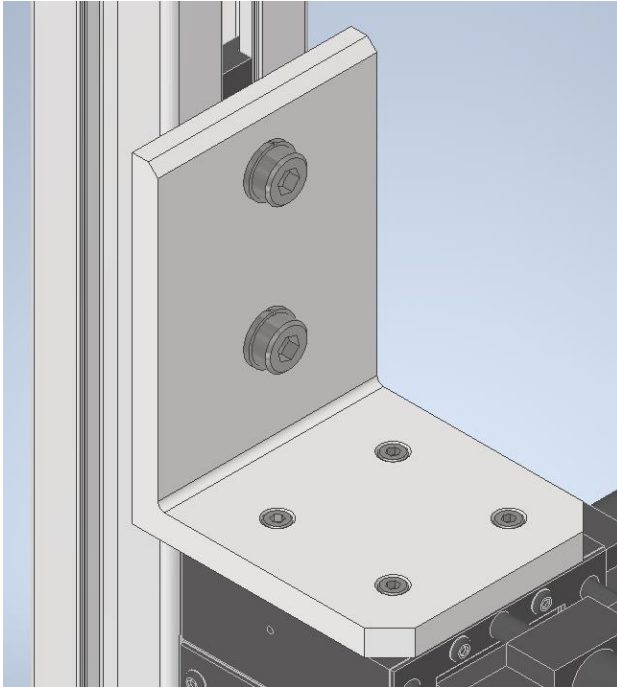


Řešení hlavy

Celkový model hlavy 3D tiskárny pro tisk skla za pomoci CO_2 laseru je vybranou alternativou skládající se ze sestavy podavače, profilu tvaru L (horní příruba), jež udržuje hlavu v konkrétní výšce, dále obsahuje i sadu pohyblivých prvků, goniometru a dvou mikroposuvníků, které umožňují posuv v horizontální rovině a mírný náklon pro změnu podávacího úhlu. Posledním elementem je zkrácený L profil (zkrácená příruba) pro upevnění sestavy podavače k ostatním komponentům. O této změně bylo rozhodnuto až během procesu konstrukce, jelikož dosavadní řešení bylo poměrně složité a ztěžovalo manipulaci vlivem přítomnosti bloku motoru v místě šroubových spojů.

Horní příruba

Horní příruba ve tvaru L profilu slouží k připevnění k nosné konstrukci 3D tiskárny a zároveň dostal druhou vlastnost nastavitelného posuvu ve vertikální ose profilu. Korigováním síly utažení na dvou šroubech lze hlavou pohybovat nahoru a dolů v ose drážky. V drážce profilu jsou umístěny profilové kameny, které napomáhají zajištění hlavy. Hlavy šroubů použitých ke spojení hlavy 3D tiskárny a kamenů v drážce neleží na funkční ploše a tudíž, na rozdíl od šroubů u desky podavače, není vyžadováno jejich plné zapuštění do profilu. Ve spodní části L profilu, kde dojde ke spojení s mikroposuvníky jsou vyvrtány celkem čtyři symetricky uložené díry pro zápusťné šrouby. Jejich rozmístění je určeno otvory, které předepsal výrobce mikroposuvných jednotek.



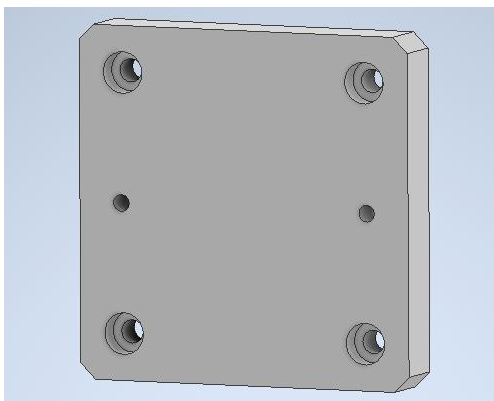
Obrázek 65: Model profilu tvaru L připevněný jednou stranou ke čtvercovému profilu a druhou k sadě pohyblivých součástí.

Sada mikroposuvníků a goniometru spojená korektorovou deskou

V podkapitole návrhu bylo zmíněno, že prostorově nejušpornějším řešením je realizace těchto prvků v sérii za sebou. Seřazením zařízení se otevírá více možností pro případnou modifikaci struktury hlavy s ohledem na prostor. Při změně rozpoložení hlavy nebude nutné měnit veškeré komponenty a například se upraví pouze tvarové prvky hlavy jako jsou L profily.

Pár mikroposuvníků bude umístěn na sebe a goniometr se připevní pod ně. Mikroposuvníky mají od výrobce stanovené díry pro vzájemné spojení, proto se přednostně situují pod sebe. Problém však vznikl při zakomponování goniometru, jež nenesl žádné označení nebo logo výrobce a jehož díry měly diametrálně odlišené pozice od pozic děr na mikroposuvnicích.

Jediným rozumným řešením byla korektorová deska, která by pomohla k propojení těchto komponent.



Obrázek 66: Model korektorové desky pro spojení mikroposuvníku s goniometrem

Korektorová deska se celkově skládá ze čtyř zápusných děr a dvou otvorů se závity, aby se zabránilo kolizi a ušetřil prostor.

Mikroposuvník pracuje na principu velké vodící desky ve tvaru U, do níž je vloženo posuvné těleso realizující pohyb. Výstup vytváří právě posuvné těleso, které nese dvě symetricky uložené díry pro průchod šroubu. Goniometr má ve své horní části čtyři symetricky umístěné otvory se závit. Z pohledu montáže se nejdříve připevní ve čtyřech místech goniometr. Druhý spoj je realizován tak, že se povysune posuvné těleso mikroposuvníku, což otevře prostor pro vložení dvou šroubů skrz do korektorové desky.

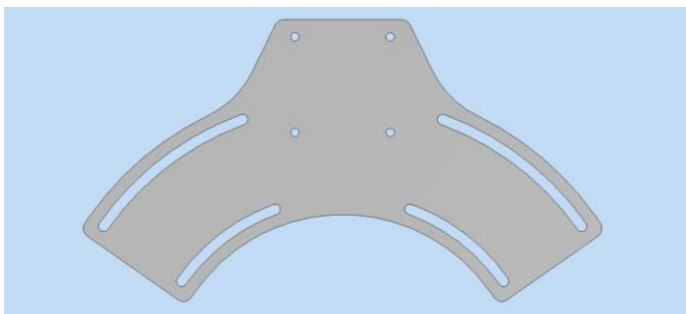
Dolní příruba

Navazující součástí je zkrácený L-profil navazující na podavač. Upevnění na goniometr je ze spodní části naprosto totožné jako shora přes korektorovou desku. V profilu jsou vyvrtány čtyři symetricky uložené díry pro čtyři šrouby se zápustnou hlavou.

Profil je s deskou podavače propojen zápustným šroubovým spojeními s maticemi. Matice jsou situovány ze strany motoru, tudíž nezasahují do prostoru podavače a nenarušují pohyb páky.

Rozvětvená deska

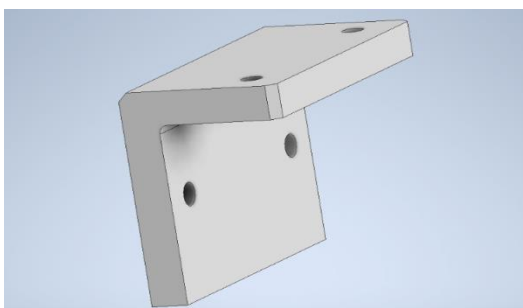
Tato deska je tvořena dvěma rameny otvory pro vedení šroubů. Ramena jsou rozbalena do tvaru C, což dovoluje translaci filamentu do společného bodu pro oba podavače. Rozvětvená deska je mírně předsunutá, čímž se zabraňuje zasažení vysunutě páky mikroposuvníku paprskem laseru.



Obrázek 67: Model rozvětvené desky.

Zkrácená příruba a korekční příruba k rozvětvené desce

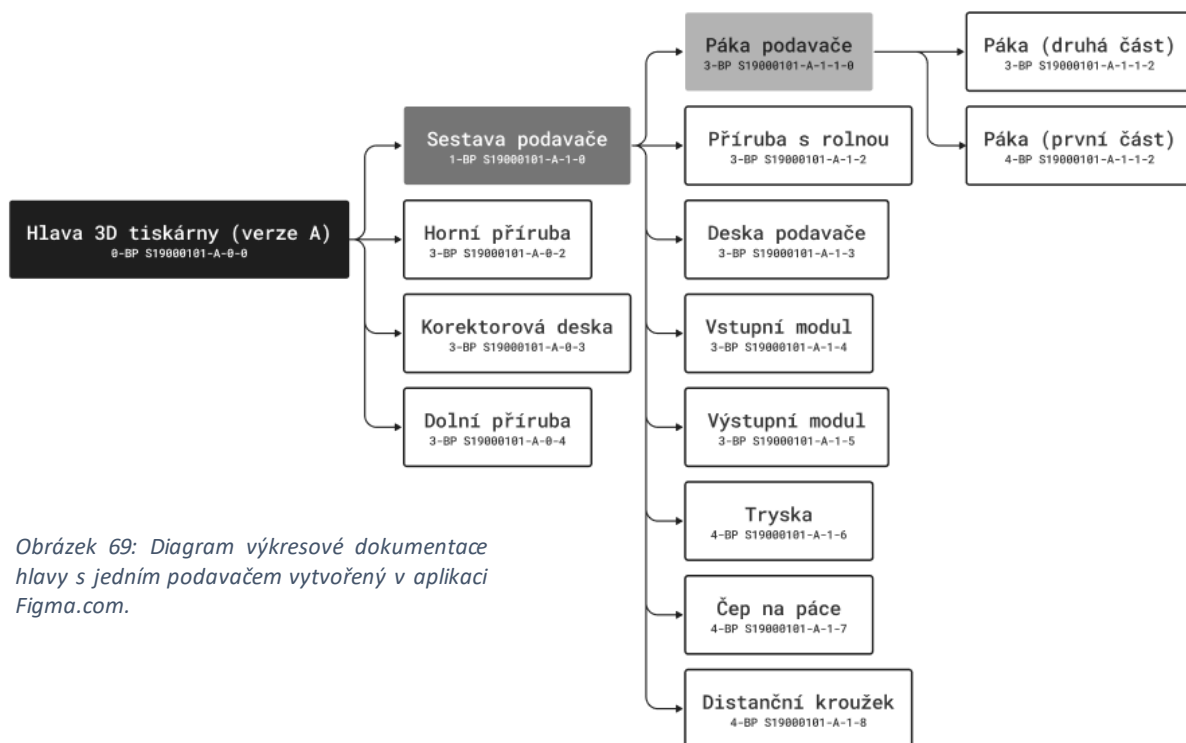
Oba dva profily poslouží k uzavření posuvného snadno rozebíratelného spojení mezi větví desky a podávacím zařízením. Tvar vznikl zkrácením již existujícího profilu dolní příruby. Úkolem korekční příruby je zajistit správnou pozici osy vlákna vzhledem k centrální bodu za použití stejného podavače.



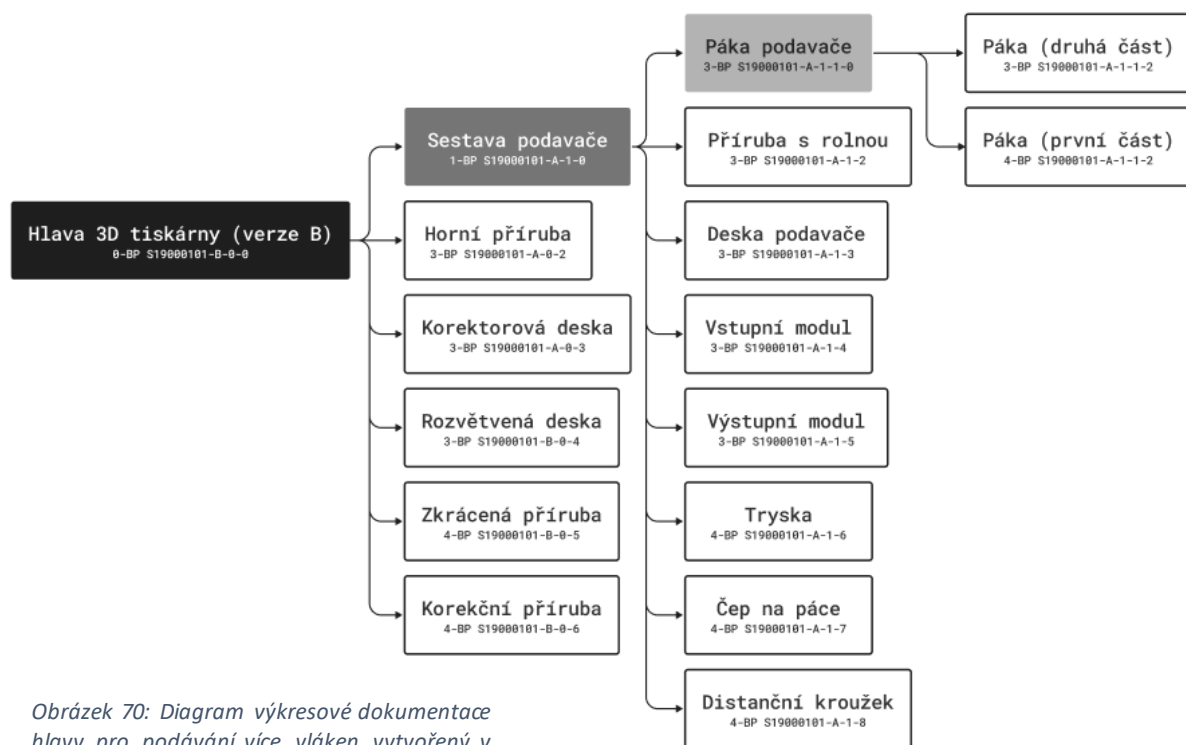
Obrázek 68: Model zkráceného L profilu dolní příruby.

Výkresová dokumentace

Výstupem této práce je také výkresová dokumentace veškerých součástí, podsestav, sestav a samozřejmě finálního výrobku. Pro lepší orientaci mezi jednotlivými výkresy byl vytvořen diagram výkresové dokumentace ve formě myšlenkové mapy, kvůli úspoře místa v tomto dokumentu.



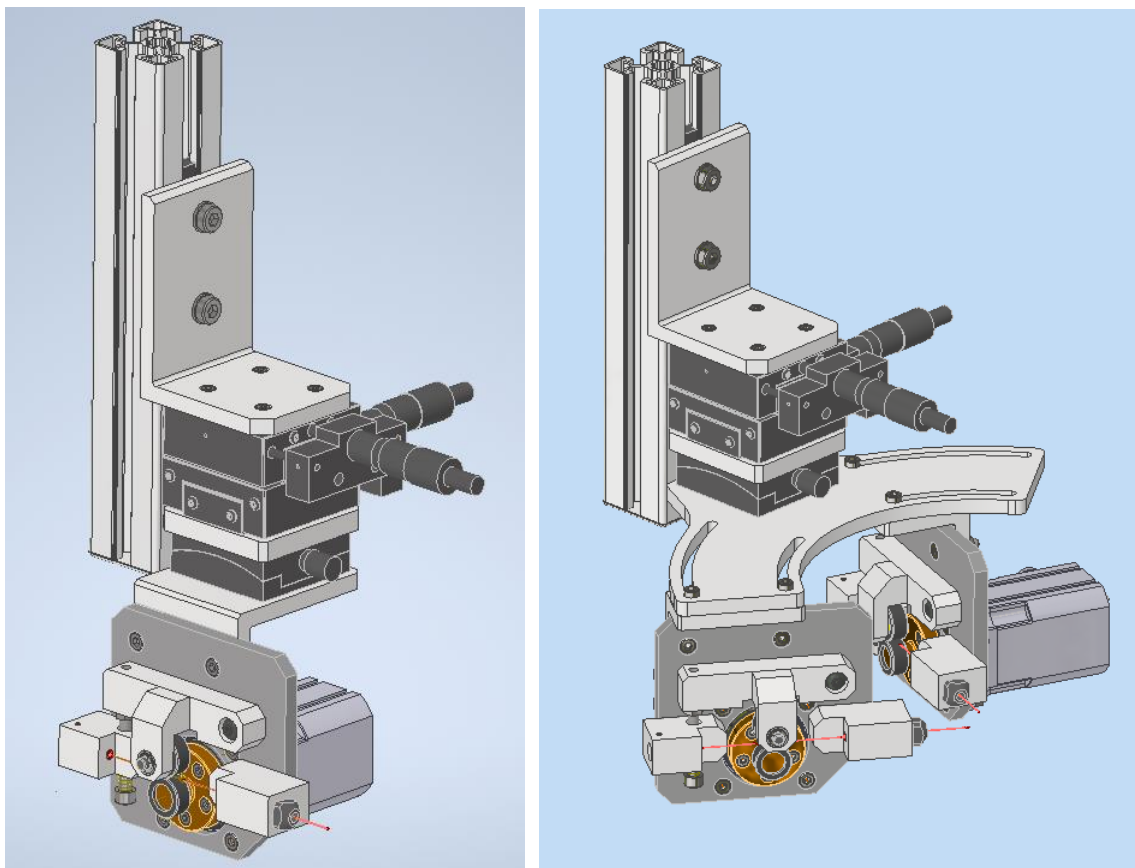
Obrázek 69: Diagram výkresové dokumentace hlavy s jedním podavačem vytvořený v aplikaci Figma.com.



Obrázek 70: Diagram výkresové dokumentace hlavy pro podávání více vláken vytvořený v aplikaci Figma.com.

Technicko-ekonomické hodnocení

Hlava 3D tiskárny pro tisk skla za pomoci CO₂ laseru je zařízení vzniklé přímo v dílnách katedry sklářských strojů a robotiky. Jelikož zadaná práce je prací experimentální, tak byla použita prioritně zařízení, jmenovitě mikroposuvníky, goniometr a krokový motor, nacházející se na pracovišti nebo ve skladu katedry. Tím se ušetřily značné náklady jinak vynaložené na základní funkci celého konceptu.



Obrázek 72: Výsledný model realizované hlavy pro 3D tisk skla s jedním podavačem. Obrázek 71: Model hlavy pro podávání více vláken.

Z technického pohledu byl tímto přístupem značně omezen celkový návrh. Zařízení bylo určeno předem stanovenými součástkami, tudíž koncept stroje byl nucen se přizpůsobit vstupním parametrům. Bez těchto vstupních veličin by konečný model byl teoreticky lehčí a pohyblivější. Velkou část hmotnosti zařízení vytváří právě motor, který zahrnuje i převodovku.

Naopak velká volnost v tvorbě se objevila při návrhu podavače. Podavač sám o sobě není nikterak složité zařízení, ale má nespočet různých variant. Před stanovením jakékoliv myšlenky musela být provedena pečlivá rešerše, která ukázala, že požadovaných výsledků lze dosáhnout modifikací stávajících řešení. Kvůli křehké povaze vláken bylo rozhodnuto o realizaci konstrukce specializovaného podavače se zaměřením na podávání skelných vláken.

Hlava 3D tiskárny je vyrobena tak, aby co nejvíce usnadnila montáž. Použité díly do sebe zapadají podobně jako stavebnice, což zjednodušuje servis. Při pohybu stolku je absence

nastavitelného mikroposuvu hlavy ve vertikální ose prakticky bezvýznamná. Pomocí goniometru je možné podavač naklonit až do 20°.

Velké množství nákladů vložených do konstrukční úlohy bylo užito hlavně na výrobu jednotlivých dílů. Pro materiál přístroje se zvolila slitina hliníku nazývaná dural. Ačkoliv je zvolený materiál dražší než běžná ocel, velmi snadno se obrábí, je lehký, chemicky odolný a vhodný pro povrchové úpravy. V zadání této práce nebylo přesně stanoveno prostředí, takže bylo zapotřebí umístit hlavu někam do prostoru a zajistit materiál proti vnějším vlivům na úkor investic.

Pro sestavení úlohy s jedním podavačem bylo zapotřebí vyrobit jedenáct dílů s odpovídajícím objemem 0,00054818672 m³. Hustota hliníku odpovídá 2700 kg/m³. Aktuální cena hliníku na trhu se pohybuje v rozmezí 130 Kč za kilogram. Při vynásobení celkového objemu s hustotou a cenou vychází teoretická hodnota konstrukčních dílů na zhruba 192 korun. Protože materiál byl odebírán ze skladu materiálu a nebyl jednotlivě objednávan, tak stanovená cena přibližně reflektuje cenu reálnou.

Připočte-li se také práce spojená s výrobou a sestavením všech 11 kovových dílů s průměrnými 3 hodinami na díl a ceně 350 Kč za normohodinu odpovídající částce za obrábění, plat zaměstnance, energie atd., vyhoupane se celková suma na 11742 Kč.

Komponenty jako jsou šrouby, matice, jehly byly za zanedbatelnou částku buď nakoupeny anebo odebrány ze skladových zásob dílny.

Pružina pro své malé atypické rozměry musela být objednána samostatně. Protože výrobci neumožňují nákup jen jediné pružiny, bylo vybráno 5 různých průměrů v rozmezí 5–11 Kč. Hlavní položkou byla částka za dopravu přesahující 100 Kč. S pěti pružinami objednávka činila cca 150 Kč.

Kluzná pouzdra pro uložení jednotlivých částí páky byla nakoupena v počtu 2 kusů za 22 Kč.

Další velkou položkou v celkových nákladech byly povlaky rolen. Aby se zajistil plynulý posuv bez poškození vedeného vlákna, byly vytisknuty 3 páry pryžových obalů. Každý z páru byl vytištěn s jinou tvrdostí, aby během zkoušky bylo možné vybrat ten s nejlepšími vlastnostmi. Náklady spojené s tiskem jednoho páru se odhadují na 350 Kč a přičte-li se k tomu také minimálně tříhodinová práce pracovníka, jenž měl na starosti tisk včetně návrhu licí formy, tak se částka za povlaky rolen vyšplhá na 3100 Kč.

Celkové vynaložené náklady na sestavení experimentálního zařízení s jedním podavačem činí při zaokrouhlení v přepočtu 15000 Kč.

Pokud by nakonec došlo k aplikaci druhého řešení s více podavači, cena by nejprve vzrostla o výrobu dalšího podavače, rozvětvené desky a dvou spojovacích dílů v hodnotě přibližně 10500 Kč, jež zahrnuje cenu materiálu i práci dělníka. A také by muselo dojít k nákupu druhého rotačního aktuátoru DriveSpin DS50 přesahujícího částku 50 000 Kč bez DPH. Cena za výrobu hlavy s více podavači pro střídavé podávání dvou vláken vychází velmi draze a to až na 76000 Kč.

Výsledné náklady by ještě vzrostly, pokud by se do částky zahrnula také práce autora a všech pracovníků univerzity, kteří se na procesu jakkoliv podíleli.

Volba realizace experimentálního řešení s pouze jednou hlavou je ekonomicky méně náročná. Schopnosti zařízení při uplatnění v experimentální výrobě ukáží, zdali je výhodné dále zainvestovat a nakoupit další motor nebo projekt přehodnotit a zvolit levnější a lehčí krokový motor s nižšími pořizovacími náklady.

Závěr

Cílem této experimentální práce byla konstrukce hlavy pro 3D tisk skla za pomoci CO₂ laseru. Úvodním krokem do bakalářské práce se stalo ověření dosavadních experimentů provedených technologií řízené energie navařování. Pro napodobení experimentů bylo použito gravírovací zařízení s CO₂ laserem, u něhož bylo možné regulovat výkon. Na optických vláknech bylo provedeno dohromady lehce přes 50 pokusů s cílem natavit vlákno do plastického stavu se správnou viskozitou vhodnou pro 3D tisk. Experimenty byly přednostně provedeny na 2 vláknech s průměry 352 a 125 μm. Velká většina počátečních pokusů byla neúspěšná a vlákna byla buď vypařena anebo spálena, přesto se nakonec ukázaly i kladné výsledky v podobě kontinuálních linií kapek či stáčení skelného filamentu vlivem vzrůstajících vnitřních pnutí. Tyto výsledky se objevily u 352μm vlákna při 40% výkonu 40W laserového paprsku, 1 mm/s posuvu a 28,1 mm vzdálenosti od pevného rámu a u 125μm vlákna při 18 % výkonu, 1 mm/s posuvu a 28 mm vzdálenosti. Během experimentů však nebylo plně docíleno požadované plastické struktury.

Dalším úkolem práce bylo navrhnout zařízení hlavy 3D tiskárny se schopností podávání křehkých skelných optických vláken a na základě vstupních požadavků na zpracování použít rozhodovací analýzu. Návrh proběhl ve dvou fázích.

Ve fázi první bylo zapotřebí nejprve navrhnout podávací zařízení. Pro tyto účely byly vytvořeny 3 koncepty podavačů s odlišnými přítlačnými mechanismy, z nichž, především kvůli kompaktnosti, rozebíratelnosti a přesnosti posuvu vlákna, byl vybrán přítlačný mechanismus páky.

Druhá fáze byla věnována návrhu celkového zařízení. Protože tato práce měla být pouze experimentální, tak z ekonomických důvodů bylo přistoupeno k návrhu, konstrukci a realizaci zařízení schopného podávat jen jedno vlákno. Ze základního náčrtu vznikly celkem 4 koncepty s odlišnými polohami podávacího zařízení v prostoru. Při návrhu musel být zohledněn nedostatek mikropusuvníků, což ovlivnilo přesnost polohování hlavy v jednom směru. Rozhodovací analýzou bylo vybráno to, které bylo snadno ovladatelné a lehce demontovatelné. Aby se naplnily osnovou zadané úkoly, byl dodatečně vytvořen i koncept hlavy pro podávání více vláken, jež vzešel z vybraného návrhu hlavy pro jedno vlákno.

Navazující úkol konstrukce vybraného návrhu probíhal dle předběžných očekávání a společně s ním vznikla i výkresová dokumentace této práce. Nicméně naskytlo se několik významných problémů, jako byl například požadavek na vedení vláken různých velikostí, kde nastala potíž s otvorem pro vlákna. Bohužel univerzita nedisponuje prostředky k vytvoření čistého hlubokého otvoru s průměrem v desetinách milimetru. Z toho důvodu byly navrženy moduly s otvory pro vsazení příruby injekčních jehel. Jehly se vyrábí v různých velikostech od desítek mikrometrů do několika milimetrů, takže byly ideálními adepty pro hladký posuv filamentu. Problém zaznamenala i tvorba povlaků rolen. Kvůli

neznámému vlivu pryžového povlaku na optické vlákno bylo zapotřebí vytisknout 3 páry povlaků s různou odhadovanou tvrdostí. Povlaky byly odzkoušeny a tím byla zároveň potvrzena funkčnost zařízení. Jak již bylo zmíněno, experimentální zařízení bylo vyrobeno, sestaveno a odzkoušeno.

Poslední téma technicko-ekonomické hodnocení ukázalo, že tato experimentální práce splnila požadavek na nízké náklady. Výroba hlavy s jedním vedeným vláknem vyšla bezmála na 15000 Kč. V částce není zahrnuta cena krokového motoru. Při realizaci hlavy pro více vláken by bylo zapotřebí sestrojít druhý podavač a nakoupit druhý motor, což by vyšlo více než na čtyřnásobek ceny výroby hlavy s jedním podávacím zařízením. Rozhodnutí realizace této koncepce bylo proto do budoucna ponecháno na vedení katedry sklářských strojů a robotiky.

Seznam Literatúry

- [1] *3D Systems* [online]. 2023 [vid. 2023-02-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=3D_Systems&oldid=1136721716
- [2] PLOCHER, János a Ajit PANESAR. Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures. *Materials & Design* [online]. 2019, **183**, 108164. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.108164
- [3] LIN, Pei-Yi, Fang-Cheng SHEN, Kuo-Tsai WU, Sheng-Jye HWANG a Huei-Huang LEE. Process optimization for directed energy deposition of SS316L components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, **111**(5–6), 1387–1400. ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-06113-z
- [4] GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing* [online]. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016 [vid. 2023-02-12]. ISBN 978-1-56990-582-1. Dostupné z: doi:10.3139/9781569905838
- [5] *Nd:YAG laser* [online]. 2022 [vid. 2023-02-16]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Nd:YAG_laser&oldid=21314010
- [6] Nd: YAG laser: Principle, Construction, Working, Characteristics, Advantages, Disadvantages and Applications. *BrainKart* [online]. [vid. 2023-02-16]. Dostupné z: https://www.brainkart.com/article/Nd--YAG-laser--Principle,-Construction,-Working,-Characteristics,-Advantages,-Disadvantages-and-Applications_6883/
- [7] STAWOVY, Michael T. Comparison of LCAC and PM Mo deposited using Sciaky EBAM™. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* [online]. 2018, **73**, 162–167. ISSN 02634368. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijrmhm.2018.02.009
- [8] *ELECTRON BEAM MACHINING PROCESS (EBM): Construction and Working of electron beam machining process.* [online]. 2020 [vid. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=QuZ-qkthCCY>
- [9] DING, Donghong, Zengxi PAN, Dominic CUIURI a Huijun LI. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2015, **81**(1–4), 465–481. ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-015-7077-3
- [10] Laser metal deposition – a process for various applications. *Trumpf* [online]. [vid. 2023-04-24]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/en_GB/solutions/applications/additive-manufacturing/laser-metal-deposition/
- [11] *Optomec DED Overview* [online]. 2022 [vid. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=XbFGOdGC1U>
- [12] *Laser Additive Manufacturing: Metal Production | LASERLINE* [online]. [vid. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/laser-additive-manufacturing/>
- [13] Plastic Optical Fibers - an overview | ScienceDirect Topics. *ScienceDirect* [online]. [vid. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/plastic-optical-fibers>
- [14] ILKANIPOUR, Paige. Properties of Glass - state of matter. nedatováno.
- [15] SKLO Skelný stav. *SlidePlayer.cz* [online]. [vid. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2340756/>

- [16] BARBERO, Ever J. *Introduction to composite materials design*. Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, 2018. Composite materials : analysis and design. ISBN 978-1-138-19680-3.
- [17] LE BOURHIS, Eric. *Glass: Mechanics and Technology* [online]. 1. vyd. B.m.: Wiley, 2007 [vid. 2023-02-22]. ISBN 978-3-527-31549-9. Dostupné z: doi:10.1002/9783527617029
- [18] *TIMEIS* [online]. [vid. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.technopreneur.net/technology/tech-trends/chemical/c-glass.html>
- [19] *Glass fiber* [online]. 2022 [vid. 2023-02-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Glass_fiber&oldid=1121945870
- [20] Sklářský písek. *Provodínske písky a.s.* [online]. [vid. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.pisky.cz/sklarsky-pisek/>
- [21] SENIOR, John M. a M. Yousif JAMRO. *Optical fiber communications: principles and practice*. 3rd edition. Harlow, England ; New York: Financial Times/Prentice Hall, 2009. ISBN 978-0-13-032681-2.
- [22] DUMITRAS, Dan C., ed. *CO2 Laser - Optimisation and Application*. B.m.: IntechOpen, 2012. ISBN 978-953-51-0351-6.
- [23] *Carbon-dioxide laser* [online]. 2023 [vid. 2023-02-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Carbon-dioxide_laser&oldid=1140472218
- [24] HECHT, Jeff. Short history of laser development. *Optical Engineering* [online]. 2010, **49**(9), 091002. ISSN 0091-3286. Dostupné z: doi:10.1117/1.3483597
- [25] SILFVAST, William T. *Laser Fundamentals*. 2nd edition. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-0-521-54105-3.
- [26] *Princip CO2 laseru - Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení* [online]. [vid. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>
- [27] HITZ, C. Breck, J. J. EWING a Jeff HECHT. *Introduction to laser technology*. 4th ed. Hoboken, N.J.: Wiley-IEEE Press, 2012. ISBN 978-0-470-91620-9.
- [28] INFO@SABRE.CZ, Sabre, www.sabre.cz, e-mail: Od 1. průmyslové revoluce ke 4. | Technický týdeník [online]. nedatováno [vid. 2023-02-27]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/ekonomika-byznys/od-1-prumyslove-revoluce-ke-4_31001.html
- [29] Hotař V, Stará M, Mánková V, Nikendey Holubová B. *Present state of 3D printing from glass. Pure and Applied Chemistry*. 2022;94(2): 169-179. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/pac-2021-0707>
- [30] KRASSENSTEIN, Brian. G3DP Project: Mediated Matter & MIT Glass Lab Develop Advanced Glass 3D Printer. *3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing* [online]. 20. srpen 2015 [vid. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://3dprint.com/90748/g3dp-glass-3d-print/>
- [31] INAMURA, Chikara, Michael STERN, Daniel LIZARDO, Peter HOUK a Neri OXMAN. Additive Manufacturing of Transparent Glass Structures. *3D Printing and Additive Manufacturing* [online]. 2018, **5**(4), 269–283. ISSN 2329-7662, 2329-7670. Dostupné z: doi:10.1089/3dp.2018.0157
- [32] *Podavač drátu 4R 4 kladky, levý, 24V* [online]. [vid. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.akiton.cz/podavac-dratu-4r-4-kladky>

- [33] WINSTON, Amy. Jak jsem stavěla 3D tiskárnu: extruder filamentu. *Root.cz* [online]. [vid. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/jak-jsem-stavela-3d-tiskarnu-extruder-filamentu/>
- [34] Direct Drive Extruder pro Creality Ender 5 S hotendem. *3DJake Česká republika* [online]. [vid. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/micro-swiss/direct-drive-extruder-pro-creality-ender-5>
- [35] 3DWISER. Ultimaker S5 3D tiskárna - 3Dwiser. *eshop.3dwiser.com* [online]. [vid. 2023-03-05]. Dostupné z: https://eshop.3dwiser.com/3d-tiskarny/ultimaker-s5/?gclid=CjwKCAiAmJGgBhAZEiwA1JZolu9j7-dtUa2AJzq3UngonO9Yjl141c1VHkAeVoo-yuOs4HwXc-pithoC7vEQAvD_BwE
- [36] VON WITZENDORFF, Philipp, Leonhard POHL, Oliver SUTTMANN, Peter HEINRICH, Achim HEINRICH, Jörg ZANDER, Holger BRAGARD a Stefan KAIERLE. Additive manufacturing of glass: CO₂-Laser glass deposition printing. *Procedia CIRP* [online]. 2018, **74**, 10th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2018], 272–275. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2018.08.109
- [37] RETTSCHLAG, K., A. HOHNHOLZ, P. JÄSCHKE, D. KRACHT, S. KAIERLE a R. LACHMAYER. Laser glass deposition of spheres for printing micro lenses. *Procedia CIRP* [online]. 2020, **94**, 11th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2020], 276–280. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2020.09.052
- [38] LUO, Junjie, Luke GILBERT, Chuang QU, Robert LANDERS, Douglas BRISTOW a Edward KINZEL. Additive Manufacturing of Transparent Soda-Lime Glass Using a Filament-Fed Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. 2016, **139**. Dostupné z: doi:10.1115/1.4035182
- [39] GRABE, Tobias, Marius LAMMERS, Song WANG, Xuejian WANG, Katharina RETTSCHLAG, Khodor SLEIMAN, Alexander BARROI, Tobias BIERMANN, Arved ZIEBEHL, Julian RÖTTGER, Peer-Phillip LEY, Alexander WOLF, Peter JAESCHKE, Joerg HERMSDORF, Stefan KAIERLE, Henning AHLERS a Roland LACHMAYER. *Additive Manufacturing of fused silica using Coaxial Laser Glass Deposition: Experiment, Simulation and Discussion* [online]. 2021. Dostupné z: doi:10.1117/12.2577205
- [40] LETOVSKÁ, Magdalena. Ochrana zdraví při práci s lasery | BOZPinfo.cz. *BOZPinfo.cz* [online]. 26. září 2011 [vid. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/ochrana-zdravi-pri-praci-s-lasery>
- [41] *Laserový plotr CO2 40W MAX 40x40cm + Air Assist + Red Point* [online]. [vid. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://www.cncworld.cz/laserov-plotr-co2-40w-max-40x40cm-air-assist-red-point-p-127.html>
- [42] Materials - Light Reflecting Factors. *The Engineering Toolbox* [online]. [vid. 2023-03-09]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/light-material-reflecting-factor-d_1842.html
- [43] MrCode NET. Extruder s dvojitým převodem kovový. *Turtle* [online]. [vid. 2023-03-11]. Dostupné z: https://www.turtle3d.cz/cz/91/25/extruder-s-dvojitym-prevodem-kovovy?gclid=Cj0KCQiA6rCgBhDVARIsAK1kGPLuhHxTjBhvYP5APODSE9aLXUH3lviLyIDGmJfKYyn dwfgJWDcqdoQaAt51EALw_wcB
- [44] CONRAD, (C) 2020. *Dual Gear Extruder pro tiskárny od Creality Bowden Dual Gear M2714 | Conrad.cz* [online]. [vid. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/p/dual-gear-extruder-pro-tiskarny-od-creality-bowden-dual-gear-m2714-2633122>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vlevo je hlava LBMD od Trumpf [10], uprostřed hlava LENS od Optomec [11] a vpravo hlava pro technologii WLAM [12].	13
Obrázek 2: Fotografie hlavy gravírovacího zařízení s CO2 laserem.	15
Obrázek 3: Výrobky zhotovené tiskárnou G3DP [30]	17
Obrázek 4: Podavač drátů pro svařování [32]	19
Obrázek 5: Podavač filamentu FFF tiskárny [33]	19
Obrázek 6: Popis hlavy náhodně vybraného tiskového zařízení FFF [34]	20
Obrázek 7: Příklad velikosti pracovního prostoru pro pohyb stolku v uzavřeném systému 3D tiskárny. Zeleně je znázorněn prostor pro pohyb hlavy a červeně prostor pro pohyb stolku [35].	23
Obrázek 8: Problém výstupu více vláken	23
Obrázek 9: Schéma experimentu (Názvy přeloženy) [49]	26
Obrázek 10: a) Schéma procesu [50], b) Průběh tisku [50], c) Fotografie experimentálního zařízení [50]	27
Obrázek 11: Náčrt experimentálního systému (Přeloženo) [51]	28
Obrázek 12: Popis technologie hlavy (Přeloženo) [51]	28
Obrázek 13: A) Laserový plotr a B) procesní hlava s laserem, ventilací a červeným bodem He-Ne laseru [41]	30
Obrázek 14: Měřená vzdálenost pevného rámu a stolku [41]	31
Obrázek 15: Snímek 2.10 - Zkroucené vlákno	32
Obrázek 16: Snímek 2.9 - dlouhá kapka	32
Obrázek 17: Snímek 4.1 - Struktura tavené vrstvy tenkého vlákna	33
Obrázek 18: Snímek 4.3 - Napětím srolované vlákno	33
Obrázek 19: Snímek 3.4 - Roztavený sklokeramický podklad včetně vlákna ve dvou spojitých vrstvách	33
Obrázek 20: Snímek vlákna roztaveného na sklokeramickém podkladu	34
Obrázek 21: Snímek 3.5 - Natavené skelné vlákno na prasklé laboratorní destičce s černým podkladem	34
Obrázek 22: Snímek 3.1 - Natavená plocha se zbylým pozůstatkem jádra ve středu	34
Obrázek 23: Snímek 3.2 - Snímek zjevného rozdílu v pozici vlákna a nataveného skla	35
Obrázek 24: Skelné vlákno na tlustším sklíčku	35
Obrázek 25: Extrudér s dvojitým převodem od společnosti MrCode s.r.o. se zajímavým řešením podávání [56]	36
Obrázek 26: Simulace rotace páky a posuvu rolny	37

Obrázek 27: Simulace rotace páky a posuvu výstupu vlákna.....	37
Obrázek 28: Náčrt prvního konceptu podavače s osou pružiny rovnoběžnou s vedením vlákna	37
Obrázek 29: Dual Gear Extruder M2714 od Creality Bowden [57]	38
Obrázek 30: Náčrt posuvu rolny ve směru x	38
Obrázek 31: Návrh druhého konceptu podavače s osou pružiny kolmou na vedením vlákna	39
Obrázek 32: Návrh třetího konceptu podavače s posuvným prvkem kolmým na vedením vlákna	39
Obrázek 33: Koncepty podavače	40
Obrázek 34: Rozhodovací analýza provedená v programu Microsoft Excel.....	41
Obrázek 35: Model goniometru v aplikaci Autodesk Inventor	43
Obrázek 36: Model mikroposuvníků v aplikaci Autodesk Inventor	43
Obrázek 37: Náčrt prvního konceptu hlavy ve dvou variantách.	44
Obrázek 38: Náčrt konceptu druhé hlavy uložené na čtvercový profil ve vertikální rovině.	45
Obrázek 39: Náčrt konceptu třetí hlavy s podobným uložením na profilu, ale odlišným uspořádáním komponent pod mikroposuvníky a goniometrem.	45
Obrázek 40: Náčrt konceptu čtvrté hlavy s těžištěm daleko od osy čtvercového profilu.	46
Obrázek 41: Koncepty 4 různých variant	47
Obrázek 42: Rozhodovací analýza konceptů hlavy vytvořená v Microsoft Excel	47
Obrázek 43: Koncept hlavy nesoucí dva podavače vláken otočenými podávacím mechanismem směrem k sobě.	48
Obrázek 44: Deska s dírami pro šrouby	50
Obrázek 45: Příruba motoru	50
Obrázek 46: Odchylka způsobená změnou velikosti vlákna	51
Obrázek 47: Výplň rotačně hyperbolického tvaru	52
Obrázek 48: Viditelnost vyplněného prostoru	52
Obrázek 49: Fotografie pana Starého vzorníku dř	53
Obrázek 50: Náčrt pootočení páky a svislého posuvu šroubu v díře. Kruhový obrazec je vlastně rolna.	53
Obrázek 51: Snímek řezu modelem podavače v oblasti díry vstupního modulu, jímž prochází šroub s pružinou a kluznou podložkou. Šroub je v levé části uchycen do páky.	54
Obrázek 52: Díry pro šrouby s větším průměr pro usnadnění manipulace	54
Obrázek 53: Model výstupního modulu	55
Obrázek 54: Model vstupního modulu	55
Obrázek 55: Řez modelem podavače v oblasti výstupního modulu s tryskou a průhlednými vzájemně navazujícími jehlami.	55
Obrázek 56: Alternativy řešení upínací části páky	56

Obrázek 57: Rozebírací analýza upínacího (druhého) prvku páky v aplikaci Microsoft Excel.....	57
Obrázek 58: Model druhé části (upínací části) páky.	57
Obrázek 59: Řez modelem podavače pro ukázkou uložení hřídele a ostatních komponent ve vztahu s druhou částí (upínací částí) páky.	57
Obrázek 60: Řez modelem podavače v oblasti páky s osazeným šroubem a přírubovým kluzným pouzdem.	58
Obrázek 61: Model první součásti páky s viditelnými elementy upevnění jednotlivých prvků.	58
Obrázek 62: Model příruby s rolnou, mezi-článkem a podstavou se středící hřídelí.	58
Obrázek 63: Model desky podavače se všemi modifikacemi.....	59
Obrázek 64: Model dokončeného podavače	60
Obrázek 65: Model profilu tvaru L připevněný jednou stranou ke čtvercovému profilu a druhou k sadě pohyblivých součástí.	61
Obrázek 66: Model korektorové desky pro spojení mikroposuvníku s goniometrem.....	61
Obrázek 67: Model rozvětvené desky.	62
Obrázek 68: Model zkráceného L profilu dolní příruby.....	62
Obrázek 69: Diagram výkresové dokumentace hlavy s jedním podavačem vytvořený v aplikaci Figma.com.....	63
Obrázek 70: Diagram výkresové dokumentace hlavy pro podávání více vláken vytvořený v aplikaci Figma.com.....	63
Obrázek 71: Model hlavy pro podávání více vláken.	64
Obrázek 72: Výsledný model realizované hlavy pro 3D tisk skla s jedním podavačem.	64

Seznam příloh:

Příloha 01: 0-BP S19000101-A-0-0

Příloha 02: 0-BP S19000101-B-0-0

Příloha 03: 1-BP S19000101-A-1-0

Příloha 04: 3-BP S19000101-A-0-2

Příloha 05: 3-BP S19000101-A-0-3

Příloha 06: 3-BP S19000101-A-0-4

Příloha 07: 3-BP S19000101-A-1-1-0

Příloha 08: 3-BP S19000101-A-1-1-1

Příloha 09: 3-BP S19000101-A-1-2

Příloha 10: 3-BP S19000101-A-1-3

Příloha 11: 3-BP S19000101-A-1-4

Příloha 12: 3-BP S19000101-A-1-5

Příloha 13: 3-BP S19000101-B-0-4

Příloha 14: 4-BP S19000101-A-1-1-2

Příloha 15: 4-BP S19000101-A-1-6

Příloha 16: 4-BP S19000101-A-1-7

Příloha 17: 4-BP S19000101-A-1-8

Příloha 18: 4-BP S19000101-B-0-5

Příloha 19: 4-BP S19000101-B-0-6

Příloha 20: Tabulka laboratorních výsledků