



Návrh kompaktní DLP 3D tiskárny

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce: **Bc. Jakub Taich**
Vedoucí práce: Ing. Michal Moučka, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Taich**

Osobní číslo: **S16000349**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**

Název tématu: **Návrh kompaktní DLP 3D tiskárny**

Zadávací katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem diplomové práce je návrh kompaktní DLP 3D tiskárny.

1. Seznamte se s procesem 3D tisku s využitím doporučené literatury.
2. Proveďte rešerši dostupných stereolitografických tiskáren.
3. Vyberte vhodnou technologii 3D tisku a navrhnete vlastní řešení.
4. Vytvořte 3D model.
5. Vyhotovte potřebnou výkresovou dokumentaci pro výrobu.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 45 stran + přílohy**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] WOHLERS, T. a T. GORNET., History of additive manufacturing. In: Wohlers T. (Ed.), Wohlers Report 2016: Additive manufacturing and 3D Printing State of the Industry, Wohlers Associates Inc., USA, 2016
- [2] FELZMANN, R., S. GRUBER, G. MITTERAMSKOGLER, P. TESAVIDUL, A.R. BOCCACCINI, R. LISKA. a J. STAMPFL, Lithography-Based Additive Manufacturing of Cellular Ceramic Structures, Advanced Engineering Materials, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2012, DOI: 10.1002/adem.201200010
- [3] DAVIS F. J., a G.R. MITCHELL, Chapter 5 Polymeric Materials for Rapid Manufacturing In: Bartlo J. P. (Ed.), Stereolithography. Materials, Processes and Applications, Springer Science + Business Media, LLC 2011, DOI 10.1007/978-0-387-92904-0_1
- [4] SCHWENTENWEIN, M. a J. HOMA, Additive Manufacturing of Dense Alumina Ceramics, International Journal of Applied Ceramic Technology, 2015, 12, 1, DOI:10.1111/ijac.12319

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Moučka, Ph.D.**
Katedra výrobních systémů a automatizace

Konzultant diplomové práce: **Ing. Iaroslav Kovalenko**
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání diplomové práce: **15. listopadu 2017**
Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2019**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
řekán

L.S.

Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:


Podpis:

VYJÁDŘENÍ HLAVNÍHO ŘEŠITELE PROJEKTŮ SGS 21071 a 21224

Diplomová práce s názvem „Návrh kompaktní DLP 3D tiskárny“ vznikla v rámci dvou projektů Studentské grantové soutěže č. 21071 a č. 21224.

Bc. Jakub Taich v rámci projektů vykonával konstrukční návrhy strojních součástí a celků včetně tvorby výkresové dokumentace.

V Liberci dne 15. 5. 2018



Ing. Jaroslav Kovalenko
nositel / hlavní řešitel projektů



Poděkování

Vypracování této práce by se neobešlo bez podpory a připomínek mého vedoucího Ing. Michala Moučky, Ph. D. a konzultanta Ing. Iaroslava Kovalenka. Tímto bych chtěl těmto dvěma poděkovat. Zvlášť si cením spolupráce s Ing. Kovalenkem, bez které by navrhovaná kompaktní 3D DLP tiskárna nikdy nebyla vyrobena, oživena a testována. Zároveň bych chtěl poděkovat své rodině za dlouhodobou podporu během studií.

TÉMA: NÁVRH KOMPAKTNÍ DLP 3D TISKÁRNY

ABSTRAKT: Diplomová práce se zabývá problematikou aditivní výroby z vytvrdivých fotopolymerů, a to hlavně za pomoci 3D DLP tiskáren. Technologie aditivní výroby DLP je v práci charakterizována a členěna podle různých kritérií. Zároveň je technologie DLP popisována také z pohledu projekční technologie. Je zde kladen důraz na popis fyzických i softwarových prvků, které ovlivňují kvalitu vyráběných dílů. V práci je představeno několik zástupců 3D tiskáren pracujících na principu fotopolymerizace v nádobě. V praktické části je pozornost zaměřena na vyhotovení konstrukčního návrhu kompaktní 3D DLP tiskárny pro laboratorní účely. Návrhová činnost je v práci rozebrána podrobně v několika krocích.

KLÍČOVÁ SLOVA: aditivní výroba, fotopolymerizace, stereolitografie, DLP, 3D tiskárny, konstrukce strojů

THEME: DESIGN OF COMPACT DLP 3D PRINTER

ABSTRACT: The diploma thesis deals with problems of additive manufacturing from curable photopolymers and mainly with the help of 3D DLP printers. The additive manufacturing DLP technology is characterized and broken down according to various criteria in the thesis. The DLP technology is also described in terms of projection technology. The emphasis is placed on the description of physical and software elements that affect the quality of the manufactured parts. There are several representatives of 3D printers working on the principle of vat photopolymerization introduced in the thesis. The attention is focused on making construction design of compact 3D DLP printer for laboratory purposes in the practical part. The design activity is discussed in detail in several steps.

KEYWORDS: additive manufacturing, photopolymerization, stereolithography, DLP, 3D printers, machine design

Zpracovatel: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů a automatizace

Počet stran: 83

Počet příloh: 5

Počet ilustrací: 61

Počet tabulek: 9

Počet modelů nebo jiných příloh: 2

Obsah

| | |
|---|-----------|
| SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK..... | 9 |
| Seznam obrázků..... | 9 |
| Seznam grafů..... | 11 |
| Seznam tabulek..... | 11 |
| SEZNAM ZKRATEK..... | 12 |
| SEZNAM VELIČIN..... | 14 |
| ÚVOD..... | 15 |
| 1 CÍLE PRÁCE A HISTORIE VÝVOJE ZAŘÍZENÍ..... | 16 |
| 1.1 Historie vývoje zařízení..... | 16 |
| 2 TERMINOLOGIE..... | 18 |
| 3 ZAŘAZENÍ DLP JAKO ADITIVNÍ TECHNOLOGIE..... | 20 |
| 3.1 Fotopolymerizace v nádobě..... | 20 |
| 3.2 Aditivní výroba na kapalně bázi..... | 22 |
| 3.3 Stereolitografie s promítáním masky..... | 22 |
| 3.4 Systémy na principu fotopolymerů..... | 22 |
| 3.5 Keramická stereolitografie..... | 23 |
| 4 PRINCIP DLP Z HLEDISKA TVORBY OBRAZU..... | 24 |
| 4.1 Projekční technologie..... | 24 |
| 4.2 Projekční zařízení v AM..... | 27 |
| 5 PRINCIP DLP V RÁMCI ADITIVNÍ VÝROBY..... | 30 |
| 5.1 Příprava dat a jejich projekce..... | 30 |
| 5.2 Tvorba fyzického modelu..... | 31 |
| 5.2.1 Bottom up..... | 31 |
| 5.2.2 Top down..... | 32 |
| 5.2.3 Kontinuální výroba..... | 32 |
| 5.3 Parametry AM zařízení..... | 33 |
| 5.3.1 Stavební rozměry..... | 33 |
| 5.3.2 XY rozlišení..... | 33 |
| 5.3.3 Z rozlišení..... | 35 |
| 5.3.4 Přesnost..... | 35 |
| 5.3.5 Rychlost tisku..... | 35 |
| 6 PRVKY 3D DLP BOTTOM UP TISKÁRNY A JEJICH FUNKCE..... | 36 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6.1 | Stavební platforma..... | 37 |
| 6.2 | Nádoba..... | 38 |
| 6.3 | Pohybová osa Z..... | 41 |
| 7 | KOMERČNÍ 3D TISKÁRNY..... | 42 |
| 7.1 | Flashforge Hunter..... | 42 |
| 7.2 | Formlabs Form 2..... | 43 |
| 7.3 | EnvisionTEC Perfactory® 4 Mini XL LED..... | 44 |
| 7.4 | Autodesk Ember..... | 45 |
| 7.5 | Kudo3D Bean..... | 46 |
| 8 | KOMPONENTY POUŽITÉ VE 3D TISKÁRNĚ..... | 47 |
| 8.1 | Projektor..... | 47 |
| 8.2 | Pohybová jednotka osy Z..... | 48 |
| 8.2.1 | Lineární jednotka..... | 48 |
| 8.2.2 | Motor..... | 49 |
| 8.3 | Posuvný stůl projektoru..... | 49 |
| 8.4 | Prvky pro řízení tiskárny..... | 49 |
| 8.5 | Napájecí zdroje..... | 50 |
| 9 | KONSTRUKČNÍ NÁVRH ZAŘÍZENÍ..... | 51 |
| 9.1 | Konstrukční práce 1..... | 51 |
| 9.1.1 | Nádoba s uchycením..... | 52 |
| 9.1.2 | Sestava platformy..... | 53 |
| 9.1.3 | Umístění projektoru a rozlišení obrazu..... | 54 |
| 9.1.4 | Rámová konstrukce..... | 55 |
| 9.1.5 | Posuvný stůl..... | 56 |
| 9.1.6 | Další prvky..... | 56 |
| 9.1.7 | Realizace prvního konstrukčního návrhu..... | 56 |
| 9.2 | Konstrukční práce 2..... | 57 |
| 9.2.1 | Sestava platformy..... | 58 |
| 9.2.2 | Nádoba s uchycením..... | 59 |
| 9.2.3 | Integrace elektronických komponent..... | 60 |
| 9.2.4 | Krytování vnitřního prostoru..... | 60 |
| 9.2.5 | Realizace druhého konstrukčního návrhu..... | 61 |
| 9.3 | Konstrukční práce 3..... | 62 |
| 9.3.1 | Rámová konstrukce..... | 63 |

| | |
|--|-----------|
| 9.3.2 Nádoba s uchycením..... | 63 |
| 9.3.3 Integrace elektronických komponent..... | 65 |
| 9.3.4 Realizace konstrukčního návrhu..... | 65 |
| 9.4 Konstrukční návrh 4..... | 66 |
| 9.4.1 Sestava platformy..... | 67 |
| 9.4.2 Nádoba s uchycením..... | 69 |
| 9.4.3 Kryt pracovního prostoru..... | 71 |
| 9.4.4 Umístění a krytování projektoru..... | 71 |
| 9.4.5 Rámová konstrukce..... | 73 |
| 9.4.6 Kryt tiskárny..... | 73 |
| 9.4.7 Integrace elektronických komponent a chlazení..... | 74 |
| 9.4.8 Realizace konstrukčního návrhu..... | 76 |
| 10 ZÁVĚR..... | 77 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ..... | 79 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 84 |

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 3.1: Princip stereolitografie [4]..... | 20 |
| Obr. 3.2: Princip DLP aditivní výroby [4]..... | 21 |
| Obr. 3.3: Princip technologie 3SP [4]..... | 21 |
| Obr. 3.4: Schématické znázornění zesíťování polymeru [6]..... | 23 |
| Obr. 4.1: Pole mikrozrcátek DMD čipu [8]..... | 24 |
| Obr. 4.2: Detailní pohled na dvě mikrozrcátka DMD čipu [10]..... | 25 |
| Obr. 4.3: Princip odrazu světla na mikrozrcátku [12]..... | 26 |
| Obr. 4.4: Schématické zobrazení DMD čipu [14]..... | 26 |
| Obr. 4.5: Definice throw ratio [13]..... | 28 |
| Obr. 5.1: Schématické znázornění vrstvy voxelů v matici 3x3 [16]..... | 30 |
| Obr. 5.2: Ukázka bitmapy jedné vrstvy modelu Eiffelovy věže [18]..... | 30 |
| Obr. 5.3: Schématické znázornění bottom up DLP [20]..... | 31 |
| Obr. 5.4: Schématické znázornění top down DLP [20]..... | 32 |
| Obr. 5.5: Princip cDLM - kontinuální výroby společnosti EnvisionTEC [21]..... | 33 |
| Obr. 5.6: Elektromechanické zařízení ERM [17]..... | 34 |
| Obr. 5.7: Princip grayscaleingu [17]..... | 34 |
| Obr. 5.8: Aplikace prostorových pixelů [22]..... | 35 |
| Obr. 6.1: DWS XCELL 6000PD s myčkou výtisků a UV komorou [24]..... | 36 |
| Obr. 6.2: Platforma s tvarově upravenou pracovní plochou [25]..... | 37 |
| Obr. 6.3: Nádoba s otočným mechanismem a sěračem pro čištění PDMS [28]..... | 38 |
| Obr. 6.4: Platforma, a nádoba s FEP fólií a motorickým systémem naklápění [29]..... | 39 |
| Obr. 6.5: Schéma nádoby s průlinčitou FEP fólií [26]..... | 40 |
| Obr. 6.6: Naměřená hodnota akustického projevu fólie nadepsaná na nádobě [19]..... | 40 |
| Obr. 6.7: Schéma nádoby se složeným kontaktním oknem [31]..... | 41 |
| Obr. 7.1: Flashforge Hunter [25]..... | 42 |
| Obr. 7.2: Formlabs Form 2 [33]..... | 43 |

| | |
|---|----|
| Obr. 7.3: EnvisionTEC Perfactory 4 Mini XL LED [34]..... | 44 |
| Obr. 7.4: Autodesk Ember [35]..... | 45 |
| Obr. 7.5: Kudo3D Bean [36]..... | 46 |
| Obr. 8.1: DLP projektor s čipsetem DLP4500 [37]..... | 47 |
| Obr. 8.2: Schéma lineární jednotky THK [39]..... | 48 |
| Obr. 8.3: Mikropočítač Raspberry PI 3 [42]..... | 49 |
| Obr. 8.4: Software NanoDLP pro DLP a SL tiskárny..... | 50 |
| Obr. 9.1: 1. návrh – kompletní zařízení..... | 51 |
| Obr. 9.2: 1. návrh – nádoba s naklápěcím mechanismem..... | 53 |
| Obr. 9.3: 1. návrh – sestava platformy..... | 54 |
| Obr. 9.4: 1. návrh – rám zařízení..... | 56 |
| Obr. 9.5: 1. návrh – nádoba a sestava platformy během pracovní činnosti..... | 57 |
| Obr. 9.6: 2. návrh – kompletní zařízení..... | 58 |
| Obr. 9.7: 2. návrh – sestava platformy..... | 59 |
| Obr. 9.8: 2. návrh – nádoba s krytem..... | 59 |
| Obr. 9.9: 2. návrh – sestava projektoru..... | 61 |
| Obr. 9.10: 2. návrh – výroba dílu s novou sestavou platformy..... | 61 |
| Obr. 9.11: 3. návrh – kompletní zařízení..... | 62 |
| Obr. 9.12: 3. návrh – rám zařízení..... | 63 |
| Obr. 9.13: 3. návrh – upnutá nádoba..... | 64 |
| Obr. 9.14: 3. návrh – držák nádoby..... | 65 |
| Obr. 9.15: 4. návrh – kompletní zařízení..... | 66 |
| Obr. 9.16: 4. návrh – a) část sestavy platformy, b) sestava platformy s konzolou..... | 68 |
| Obr. 9.17: 4. návrh – varianty stavební platformy..... | 69 |
| Obr. 9.18: 4. návrh – nádoba s tabulkou skla a PDMS..... | 70 |
| Obr. 9.19: 4. návrh – nádoba s napínáním fólie..... | 70 |
| Obr. 9.20: 4. návrh – kryt pracovního prostoru..... | 71 |
| Obr. 9.21: 4. návrh – komora projektoru..... | 72 |
| Obr. 9.22: 4. návrh – kryt zařízení..... | 74 |
| Obr. 9.23: 4. návrh – elektronické komponenty..... | 75 |

| | |
|---|----|
| Obr. 9.24: 4. návrh – konzola s tvarovými spojovacími díly platformy..... | 76 |
| Obr. B.1: Zařízení SLA-1 od 3D Systems [46]..... | 86 |
| Obr. C.1: 2. návrh – pohled do pracovního prostoru a na elektroniku zařízení..... | 87 |
| Obr. C.2: 2. návrh – pohled z boku na realizované zařízení..... | 87 |

Seznam grafů

| | |
|---|----|
| Graf B.1: Specifikace borosilikátového skla BOROFLOAT [43]..... | 86 |
|---|----|

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 7.1: Parametry zařízení Flashforge Hunter [32]..... | 42 |
| Tab. 7.2: Parametry zařízení Formlabs Form 2 [33]..... | 43 |
| Tab. 7.3: Parametry zařízení EnvisionTEC Perfactory 4 Mini XL LED [34]..... | 44 |
| Tab. 7.4: Parametry zařízení Autodesk Ember [35]..... | 45 |
| Tab. 7.5: Parametry zařízení Kudo3D Bean [36]..... | 46 |
| Tab. 10.1: Porovnatelné parametry navrhované 3D DLP tiskárny..... | 77 |
| Tab. D.1: Seznam jednorázově pořizovaných dílů a prvků (x = velký formát)..... | 88 |
| Tab. D.2: Seznam spotřebního materiálu (x = velký formát)..... | 89 |
| Tab. E.1: Soupis označení modelů a čísel výkresů (x = KSA-VST2)..... | 90 |

Seznam zkratek

| | |
|---------|--|
| AM | Additive Manufacturing, aditivní výroba |
| ASTM | ASTM International (American Society for Testing and Materials) |
| CAD | Computer-Aided Design, počítačem podporované projektování |
| CD | Compact disk, datové médium |
| CLIP | Continuous Liquid Interface Production |
| CDLM | Continuous Digital Light Manufacturing |
| CMOS | Complementary Metal-Oxide-Semiconductor |
| DLP | Digital Light Processing |
| DMD | Digital Micromirror Device, digitální zařízení s mikrozrcátky |
| ERM | Enhanced Resolution Module |
| FEP | Fluorinated ethylene-propylene |
| FS | Fakulta strojní |
| Full HD | Full High Resolution, plně vysoké rozlišení |
| HD | High Resolution, vysoké rozlišení |
| HDMI | High-Definition Multi-media Interface |
| ISO | International Organization for Standardization |
| KSA | Katedra výrobních systémů a automatizace |
| LAN | Local Area Network, místní síť |
| LCD | Liquid Crystal Display, displej z tekutých krystalů |
| LED | Light-Emitting Diode, elektroluminiscenční dioda |
| MEMS | Micro-Electrical-Mechanical System, mikro-elektricko-mechanický systém |
| MIT | Massachusetts Institute of Technology |
| MPSL | Mask Projection Stereolithography, stereolitografie s promítáním masky |
| PDMS | Polydimethylsiloxan |
| PSP | Passive Self-Peeling, pasivní samoodlupování |

| | |
|-------|---|
| PSP-D | Drum type PSP container |
| RP | Rapid Prototyping, rychlá prototypová výroba |
| SGS | Studentská grantová soutěž |
| SL | Stereolithography, stereolitografie |
| SLA | StereoLitography Apparatus, stereolitografické zařízení |
| SW | Software |
| TUL | Technická univerzita v Liberci |
| USB | Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice |
| UV | Ultraviolet, ultrafialové záření |
| Wi-Fi | Wireless LAN, bezdrátová místní síť |
| 2D | Two-dimensional, dvourozměrný |
| 3D | Three-dimensional, trojrozměrný |
| 3DP | 3D Printing, 3D tisk |
| 3SP | Scan, Spin And Selectively Photocure |

Seznam veličin

| | | |
|------------|-------------------|---|
| c | [mm] | vůle mezi výstupní čočkou projektoru a klapkou |
| C | [mm] | vzdálenost projektoru od promítaného obrazu |
| D | [mm] | průměr clony |
| e | [mm] | volený maximální přesah vzniklý předepnutím FEP fólie |
| E_t | [mm] | rozsah posuvu projektoru |
| E_s | [mm] | maximální reálný rozsah posuvu projektoru |
| f | [mm] | ohnisková vzdálenost |
| $f-number$ | [-] | clonové číslo |
| h | [mm] | výška DMD |
| H | [mm] | výška promítaného obrazu |
| H_k | [mm] | minimální hloubka klapky |
| l | [mm] | úhlopříčka DMD |
| M | [mm] | zvětšení obrazu |
| $offset$ | [%] | posunutí DMD vůči optické ose |
| p | [μm] | velikost pixelu na DMD |
| P | [μm] | velikost obrazového pixelu |
| Q | [-] | počet pixelů na šířku obrazu |
| R | [-] | poměr stran promítaného obrazu |
| T | [-] | throw ratio |
| w | [mm] | šířka DMD |
| W | [mm] | šířka promítaného obrazu |
| W_k | [mm] | minimální šířka klapky |
| XY | [μm] | XY rozlišení |

Úvod

Zcela nová výrobní zařízení známá pod pojmem 3D tiskárny začala vznikat v 80. letech 20. století. Pracují na principu prostorové aditivní výroby (AM), čili vyráběný díl vzniká přidáváním materiálu, nikoliv jeho odebíráním či přetvářením. [1] Z hlediska historické významnosti a zaměření této práce lze vyzdvihnout dva nejdůležitější milníky ve vývoji AM zařízení.

V roce 1987 došlo k prvnímu komerčnímu využití zařízení pro aditivní výrobu. Bylo jím zařízení SLA-1 od společnosti 3D Systems, které pracovalo na principu stereolitografie (SL). [1] SL je jednou z metod vat photopolymerization, které staví na principu selektivního vytvrzování tekutého fotopolymeru v nádobě vlivem světlem aktivované polymerizace. [2] Projekční technologie Digital Light Processing (DLP), od společnosti Texas Instruments, byla pro aditivní výrobu poprvé použita v roce 2001 v zařízení Perfactory od společnosti EnvisionTEC. Aditivní technologie DLP, stejně jako stereolitografie, pracuje na principu fotopolymerizace v nádobě. [1]

Přelom 20. a 21. století lze jistě chápat jako počátek éry vývoje zcela nových výrobních technologií, které překopávají zažitá vnímání o možnostech výroby. Tyto technologie si utvořily samostatný obor, který svým rozsahem má potenciál, a již se tomu tak děje, zasáhnout do velkého množství průmyslových odvětví. Použití těchto aditivních technologií však vyžaduje zcela odlišný přístup při navrhování dílů, výběru materiálů, volbě technologických postupů a podmínek. Během následujících let se jistě můžeme těšit na nepolevující vývoj, výzkum a vzrůstající oblibu těchto technologií ať už v komerční či nekomerční sféře. O tom může svědčit i fakt, že v hobby sféře je již nějakou dobu o některé přístupnější technologie veliký zájem.

1 Cíle práce a historie vývoje zařízení

Unikátnost aditivních procesů výroby a nezaplňený trh umožnily vznik mnohým firmám či start-upům, a společně pohybuji se na trhu s tradičními výrobními postupy pomohly vstoupit do nových tržních oblastí. Některé segmenty na trhu s aditivními technologiemi vlivem neustálého vývoje ještě stále nejsou zaplněné, v jiných už díky konkurenci jednotlivé subjekty zanikaly.

Tato práce zabývající se návrhem kompaktní 3D DLP tiskárny necílí s hotovým produktem na zaplněný trh. Segment s DLP zařízeními je již do značné míry zaplněn. Komerční zařízení stejné kategorie jsou převážně určeny pro co nejjednodušší obsluhu bez možnosti většího uživatelského zásahu do procesu výroby. Některá rovněž vyžadují častější výměnu opotřebovaných částí, a to hlavně nádoby. V tomto návrhu je naopak na některé prvky tiskárny kladen specifický důraz, odlišný od komerční sféry.

Všechny konstrukční části zařízení jsou navrhovány jako nespoteřební. Spotřebním materiálem jsou pouze flexibilní pracovní materiály použité v nádobě, těsnění v nádobě a na krytu zařízení, případně transparentní kryty zařízení, které podléhají pomalé degradaci za působení UV záření. Nádoba, kriticky důležitý prvek zařízení, je koncipována jako univerzální prvek, který je možné přizpůsobit pro odlišné tiskové materiály a parametry tisku. Ve stejném duchu je navrhována i stavební platforma. Na zařízení je zároveň aplikována a testována metoda detekce chyb při tisku, což tiskárnu, v porovnání s komerčními zařízeními, staví do nového světla.

Snahou autora práce je dosáhnout co nejlepších parametrů zařízení, ať už z hlediska přesnosti a efektivity výroby, univerzálnosti z hlediska použitelných materiálů a parametrů tisku, jednoduchosti obsluhy zařízení, bezpečnosti provozu či trvanlivosti zařízení jako celku. Kompaktní 3D tiskárna je určena pro výzkum a testování tiskových materiálů a optimalizaci výrobních parametrů.

1.1 Historie vývoje zařízení

Projekt vývoje kompaktní 3D DLP tiskárny vznikl v roce 2015 v rámci Studentské grantové soutěže (SGS) na Fakultě strojní (FS) Technické univerzity v Liberci (TUL) pod názvem: „Vývoj a výroba kompaktního prototypu DLP 3D tiskárny“ a byl veden Ing. Iaroslavem Kovalenkem. Autor této práce se na projektu začal podílet v polovině

roku 2016, přičemž jeho činností byl konstrukční návrh zařízení.

Po skončení tohoto SGS projektu, jehož výstupem byl funkční prototyp kompaktní 3D DLP tiskárny, konstrukční práce autora práce plynule navázaly v rámci této diplomové práce. Další spolupráce při vývoji zařízení bylo dosaženo v roce 2018 díky novému SGS projektu „Stereolitografický 3D tisk keramických a kompozitních materiálů.“

2 Terminologie

Vlivem postupného vývoje celého odvětví docházelo k vytváření nových termínů a jejich zařazování vůči těm původním. Setrvačnost v používání zažitých termínů a rozdíly mezi profesionální a amatérskou sférou bezesporu vedly ke zmatku v chápání terminologických výrazů nejen u širší veřejnosti. Zde jsou pro pořádek uvedeny a vysvětleny termíny přímo související s tématickým zařazením této práce.

V mnoha odvětvích užívaný termín Rapid Prototyping vystihuje, v kontextu vývoje produktů, rychlou prototypovou výrobu přímo z digitálních dat. [3] Rapid Prototyping je však jen jednou, avšak komerčním významem první aplikací Additive Manufacturing (AM). AM je oficiální termín definovaný organizacemi ISO a ASTM International v normě ISO/ASTM 52900. Termín popisuje procesy vytváření fyzických modelů na základě 3D dat vlivem spojování materiálů, obvykle vrstvu po vrstvě. Tím se tyto procesy liší od subtraktivní a formativní výrobní metodologie. Výhod těchto procesů se využívá ve strojírenském průmyslu, medicíně, architektuře, vzdělávání, a v řadě dalších oborů. [2]

Vlivem zvyšování přesnosti výroby či použitím nových odlišných materiálů již nelze v souvislosti s AM hovořit jen o výrobě prototypů. Tento vývoj vedl k využití vyhotovených dílů jako finálních výrobků či nástrojů, které mohou být zatěžovány. [3]

Často je neodborně místo termínu AM používáno výrazu 3D printing neboli 3D tisk. To definuje výrobu předmětů nanášením materiálu za pomoci tiskové hlavy, trysky, nebo jiné technologie tisku. Dodnes je tento termín užíván také v souvislosti se stroji o nízké ceně či nižších schopnostech. [2] Výraz 3D Printing (3DP) je však zároveň názvem AM technologie vyvinuté na MIT, jejíž základem je zařízení s inkoustovou tiskovou hlavou. [3]

Většina technologií AM využívá při výrobě dílů principu stavby po vrstvách, [3] kdy je výrobek sestavován postupně po vrstvách. Vrstvy o malé výšce vznikají pomyslným rozřezáním vstupního modelu dílu. Tvar modelu mezi vrstvami nemůže být popsán přesně, proto bývá aproximován nebo interpolován, tak aby byla zajištěna plynulá návaznost křivek spojujících tyto vrstvy. [3]

AM zahrnuje sedm rozdílných kategorií výroby dílů, kam patří material jetting, binder jetting, material extrusion, vat photopolymerization a další. Jako výrobních mate-

riálů je používáno plastických hmot, kovů, kompozitů a keramiky. [2]

V případě stereolitografie se lze setkat se zkratkami SL a SLA. První z nich odpovídá technologii stereolitografie jako takové. SLA je pak zkratkou výrazu Stereolithography Apparatus, který pojmenovává stereolitografická zařízení od společnosti 3D Systems. [1]

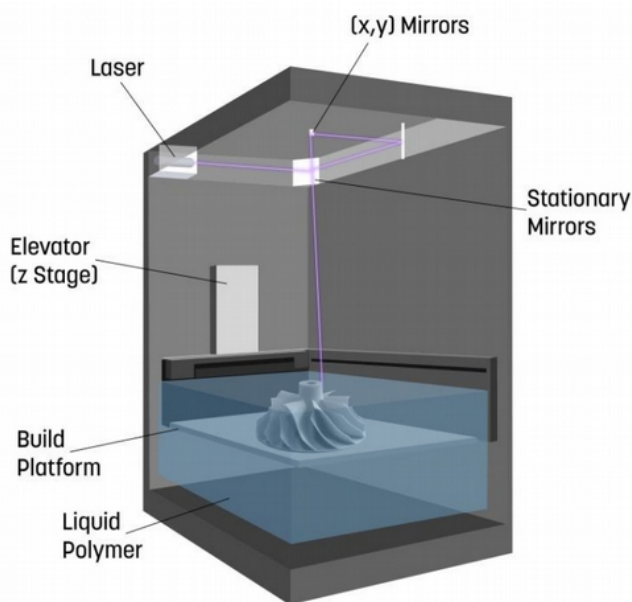
3 Zařazení DLP jako aditivní technologie

Technologii DLP lze zařadit hned podle několika hledisek. Na řádcích níže je DLP technologie postupně popsána dle způsobu nahlížení na jednotlivé kategorie.

3.1 Fotopolymerizace v nádobě

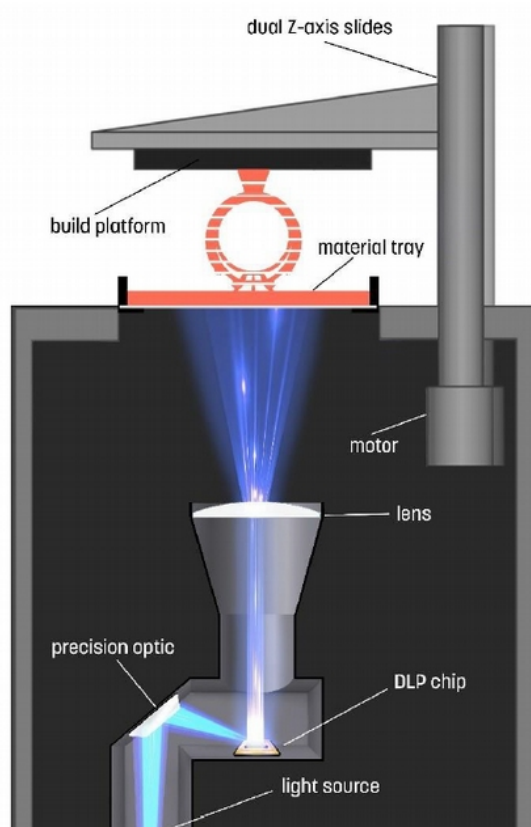
Samotný název kategorie (vat photopolymerization) pojednává o procesu fotopolymerizace probíhající v nádobě. V kontextu používaných technologií se jedná o proces vytvrzování vlivem světlem aktivované polymerizace. [2]

Nejstarším zástupcem této kategorie je technologie stereolithography. Ta je však i dnes značně používaná. Stereolitografie jako zdroje ultrafialového světla využívá paprsku laseru, který je soustavou zrcátek, nejčastěji ovládaných galvanometry, směřován v osách x a y do vytvrzované vrstvy. Paprsek laseru vyráběný díl vytváří bod po bodu. Po dokončení vrstvy se díl resp. proces posunuje o výšku vrstvy. Laser může na nádobu svítit shora nebo zesponu. [4]



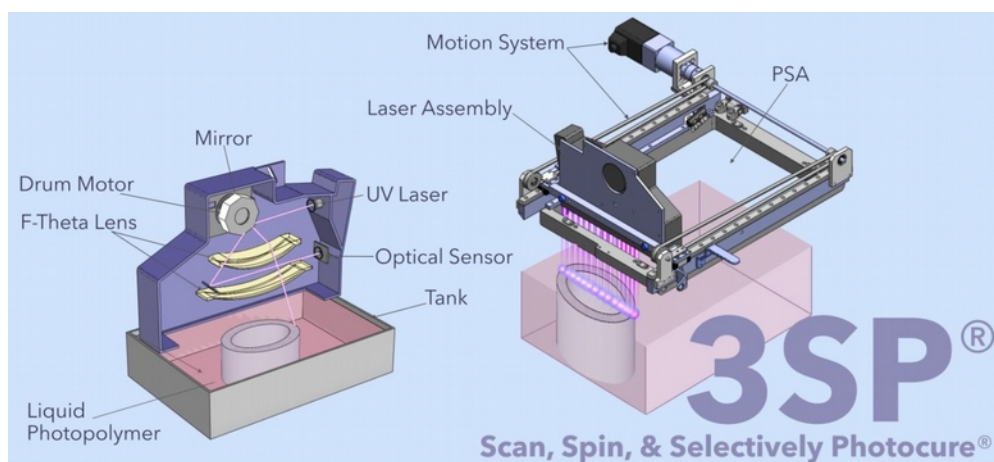
Obr. 3.1: Princip stereolitografie [4]

Novější technologií je právě technologie DLP. Ta jako zdroj světla obvykle používá lampu nebo světlo emitující diodu / diody (LED). Samotné DLP je jednotka starající se o promítání obrazu na dno či vršek nádoby s fotopolymerem. Na rozdíl od technologie SL dochází k vytvrzování celé vrstvy najednou. [1] Alternativou pro plošné promítání obrazu na vrstvu fotopolymeru je nahrazení DLP jednotky pomocí LCD. [3]



Obr. 3.2: Princip DLP aditivní výroby [4]

Jinou technologií, která materiál vytvrzuje pohybem podobným klasické 2D tiskárně, je technologie 3SP. Zde je laserový paprsek odrážen od rychle rotujícího zrcadlového bubnu do soustavy dvou F-theta čoček, které paprsek směřují od začátku osy y až do jejího konce. Tam kde je materiál potřeba vytvrdit, tam je laser rozsvícen, tam kde není, je vypnutý. Krokový pohyb v ose x je vykonáván motorizovaným gantry (portálová konstrukce se závisle pracujícími pohony) pohonem vždy po dokončení celé linky v ose y . [4]



Obr. 3.3: Princip technologie 3SP [4]

3.2 Aditivní výroba na kapalně bázi

Vstupním materiálem u AM na kapalně bázi (Liquid-base AM) jsou tekuté pryskyřice (resin), hydrogely (např. 3D Bioprinting), nebo třeba i voda, která se nechá zamrznout (Rapid Freeze Prototyping). [5]

Tekuté pryskyřice tuhnou nebo jsou vytvrzovány při vystavení elektromagnetickému záření, obvykle ultrafialovému. Proces může probíhat v nádobě naplněné pryskyřicí nebo při tryskání pryskyřice skrze tiskovou hlavu. Technologie DLP patří do první skupiny spolu s technologiemi SL a 3SP, zástupcem druhé kategorie je například technologie Multijet Printing (MJP). [5]

3.3 Stereolitografie s promítáním masky

MPSL pojednává o procesu fotopolymerizace, při kterém je fotopolymer ozařován najednou v celé vrstvě. Tento proces je rychlejší v porovnání s ozařováním laserovým paprskem. Obraz každé vrstvy je nejprve uložen jako bitmapa (bitová mapa) a následně promítán (dynamic mask) skrze prostorové modulátory světla, LCD, nebo DLP čipy. [3]

Při projekci celého obrazu po vrstvách je v každé bitmapě nejen řez vyráběným dílem, ale i řez podporami (supports), které mají za úkol podpořit tvar a strukturu výrobku.

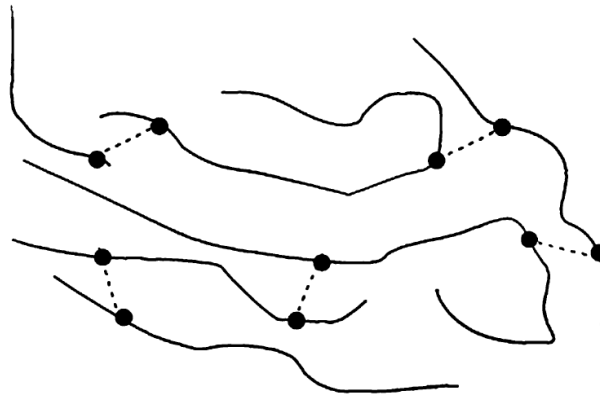
3.4 Systémy na principu fotopolymerů

Tato kategorie (Photopolymer-based Systems) zahrnuje veškeré technologie pracující s fotopolymery a jejich vytvrzováním. Historie fotopolymerů sahá až do pozdních 60. let 20. století. Právě fotopolymer byl použit jako stavební materiál u prvního komerčního AM zařízení, které pracovalo na principu stereolitografie. [3]

Fotopolymerizace je chemickou reakcí, polymerací, přeměňující tekutý monomer na pevnou látku za působení určitého elektromagnetického záření. Tímto zářením může být elektronový paprsek, ultrafialové záření, záření gama, rentgenové záření nebo i viditelné světlo. Komerčně je v AM však používáno jen UV záření a záření ve viditelném spektru. [3]

Samotná polymerace je, jednoduše řečeno, spojování jednoduchých malých molekul (monomerů) ve větší molekuly (polymery). O započítí takovéto reakce se, po vystavení záření, stará fotoiniciátor, který reaguje s fotony ze záření za vzniku volných

radikálů. Radikály vytváří katalyzátor, který je nezbytný pro zahájení polymerní reakce s tekutým monomerem, na jejímž konci je zesíťovaný polymer vytvořený spojením jednotlivých řetězců silnými kovalentními vazbami. Vlivem zesíťování je výsledný materiál netavitelný a vykazuje mnohem menší tečení a koncentraci napětí. Fotopolymery mohou mimo fotoiniciátoru a tekutého monomeru obsahovat i další přísady pro jiné chemické a mechanické vlastnosti. [3], [5]



Obr. 3.4: Schématické znázornění zesíťování polymeru [6]

Výše popsaný chemický proces je typický u fotopolymerů na bázi akrylátů. Novějším procesem fotopolymerizace je kationtová fotopolymerizace. Do této skupiny se řadí epoxidy a vinyllethery. [3], [5]

Specifikem AM metod na principu fotopolymerizace je, že podpůrný materiál, který se tiskne spolu s vyráběným dílem, je ze stejného materiálu jako vyráběný díl. [3]

3.5 Keramická stereolitografie

V této kategorii (Ceramic stereolithography) se hovoří o přizpůsobení aditivní technologie stereolitografie pro vytváření keramiky za pomoci fotopolymerizovatelné suspenze keramických prášků, která nahrazuje tekutý monomer. Formováním suspenze na stereolitografickém nebo DLP zařízení se vyrábí tzv. zelené modely. Zelený model (green body) není hotový výrobek, ale jen pevný díl o tvaru budoucího výrobku, který je ještě nutné vypálit v peci. [7]

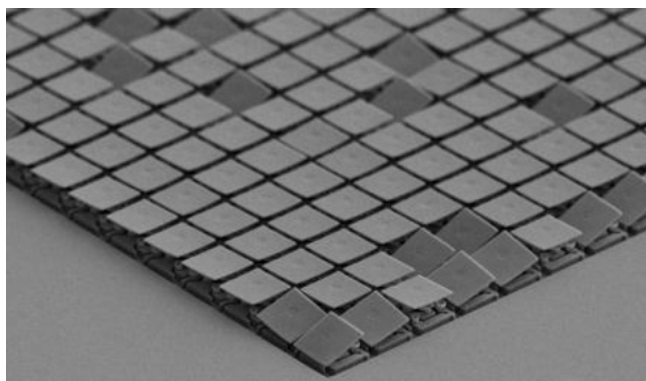
4 Princip DLP z hlediska tvorby obrazu

DLP® ve svém původním významu vyjadřuje technologii projekce obrazu, které je využíváno v projekčních zařízeních. Vzhledem k využívání DLP projektorů pro projekci masky (bitmap) na světlocitlivý fotopolymer se právě pro tuto technologii AM vžilo označení DLP. Lze se setkat i se spojením DLP-SLA.

4.1 Projekční technologie

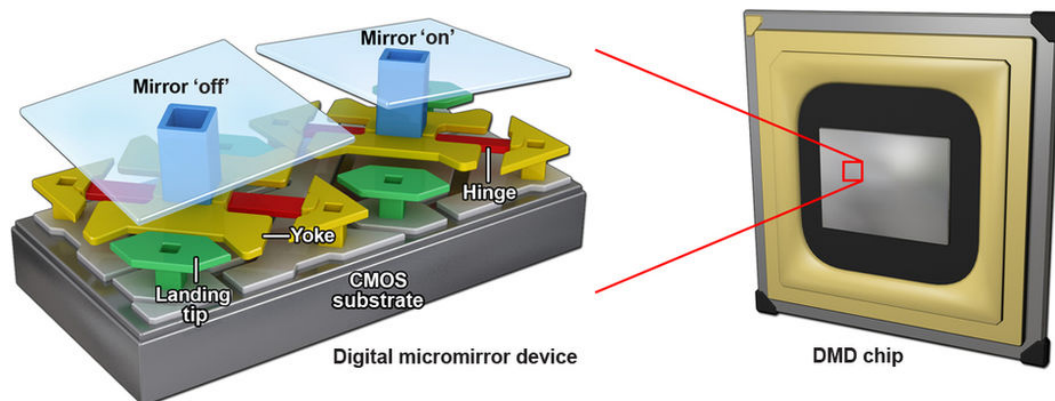
DLP je projekční technologie společnosti Texas Instruments vyvinutá v roce 1987. Hlavní částí DLP jednotky je Digital Micromirror Device (DMD). [5]

DMD je optický mikro-elektricko-mechanický systém (MEMS), jehož plochu tvoří vysoce odrazivá hliníková mikrozrcátka. Jeden pixel výsledného obrazu je standardně charakterizován jedním čtvercovým mikrozrcátkem, přičemž mikrozrcátek může v DMD být až 8 milionů. Záření infračervené, ultrafialové nebo ve viditelném spektru, které DMD odráží, může být produkováno lampou, LED, laserem nebo pomocí laser phosphor. [8], [9]



Obr. 4.1: Pole mikrozrcátek DMD čipu [8]

Mikrozrcátko je připevněno na vahadlu pomocí, v diagonální rovině zrcátka umístěných, dvou torzních závěsů, které jsou na koncích pevně uchyceny. Otáčení je umožněno jen ve střední části. Polohování každého mikrozrcátka je zajištěno dvěma páry elektrod. Jeden pár je připojen na vahadlo, druhý na mikrozrcátko. Každý pár má umístěnu jednu elektrodu na každém konci závěsu. Na oba páry elektrod je po většinu času přiváděno stejné napětí. To zajišťuje neměnnou polohu mikrozrcátka. DMD čipy jsou díky své konstrukci a hmotnosti velmi odolné. Vibrace a běžné nárazy jsou absorbovány bez poškození čipu. [5]

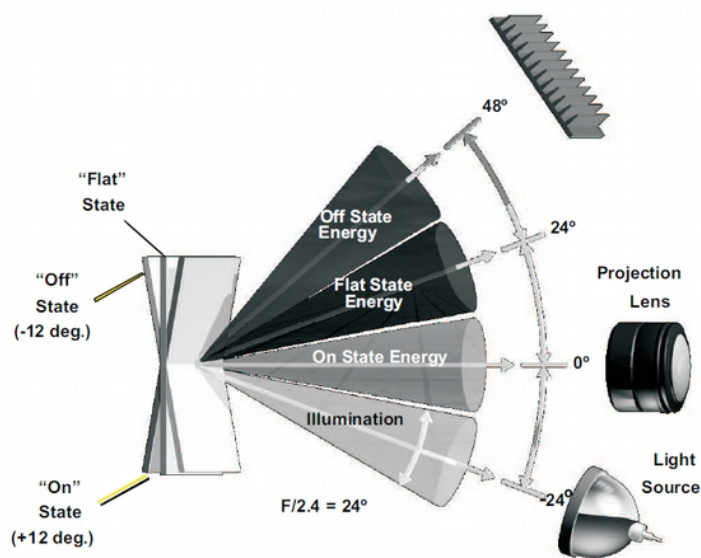


Obr. 4.2: Detailní pohled na dvě mikrozrcátka DMD čipu [10]

Pro změnu polohy mikrozrcátka musí nejprve dojít k nahrání binárního signálu (logická 0 nebo 1), definujícího změnu polohy, do paměťové buňky typu CMOS konkrétního mikrozrcátka, která je spojena s elektrodami mikrozrcátka. K přestavění zrcátka dochází ale až synchronně po přivedení časového pulzu, nazývaného také jako „reset“, do celého pole mikrozrcátek. To má za následek, vlivem elektrostatických sil, uvolnění mikrozrcátka a jeho okamžité přestavění podle nahrané logické hodnoty v paměťové buňce. Nahrání logické 1 do paměti odpovídá poloze $+12^\circ$, logická 0 pak -12° . Nahraná logická hodnota není vymazána během přivedení časovaného pulzu. [9], [11]

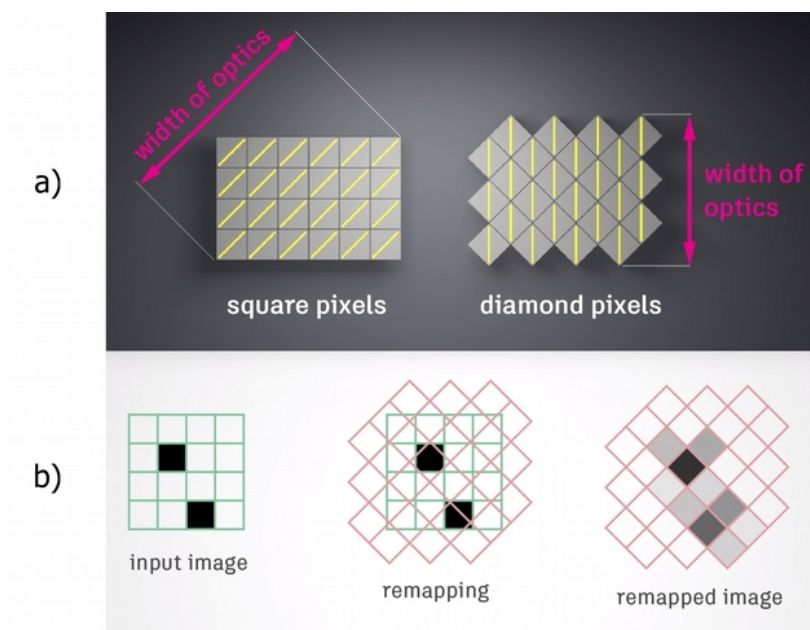
Mikrozrcátka se mohou obvykle naklápět od -12° do $+12^\circ$, přičemž krajní polohy jsou pracovními polohami zrcátka reprezentující průchozí (ON) a neprůchozí (OFF) stav. Při průchozím stavu je světlo odráženo ze zdroje dále do optické soustavy objektivu, při neprůchozím stavu dochází k odrazu světla na světlo pohlcující materiál. Když není DMD napájeno, nachází se mikrozrcátka v nepracovní poloze uprostřed pracovního intervalu. [9]

Pokud je mikrozrcátko v poloze ON, dostáváme jasný obraz. V poloze OFF projektor nesvítí. Těmto polohám, pokud bude zdroj osvětlení svítit bíle, odpovídá bílá barva (světlo) a černá barva (tma). Je ovšem ale také možné dosáhnout promítání v odstínech šedi. Toho je docíleno velmi rychlými změnami polohy mikrozrcátka, které kmitá mezi koncovými polohami a dle frekvence kmitání vytváří konkrétní odstín šedi. Výsledkem je plynule zobrazená vyškálovaná barva, neboť pro lidské oko jsou takto rychlé změny ve svitu nepostřehnutelné. [8], [12] Možností, jak vytvořit barevnou projekci ve viditelném spektru je hned několik, ale vzhledem k zaměření práce na UV záření zde tyto metody popsány nebudou.



Obr. 4.3: Princip odrazu světla na mikrozcátku [12]

DMD mohou být dvojího typu. Tzv. pravoúhlá (orthogonal) DMD, kde jsou zrcátka orientována paralelně a kolmo ke stranám čipu a tzv. kosočtvercová (diamond) DMD, kde jsou zrcátka vůči stranám čipu diagonálně. [13] U pravoúhlých DMD odpovídají pixely vstupního obrázku pixelům (mikrozrcátkům) DMD, u diamond DMD ale musí být pozice těchto vstupních pixelů přepočítána (remapping / resampling) na toto DMD. To vytváří nepřesnosti v obraze, které u videosekvencí nemusí vadit, ale u statických obrázků již mohou být na závadu.



Obr. 4.4: Schématické zobrazení DMD čipu [14]
a) pravoúhlé a kosočtvercové DMD, b) princip přepočítávání pravoúhlých pixelů na diamond DMD

Toto řeší funkce patternování, která pixely nepřepočítává. [14] Na druhou stranu pak ale bude mít promítaný obraz menší velikost, jelikož bude pootočený o 45°.

4.2 Projekční zařízení v AM

Vedle oblastí jako je spektroskopie, machine vision, 3d digitalizace, průhledové (head up) displeje či dobře známé promítání obrazu na plátno se projekční zařízení tedy uplatňují i v AM. [8], [15] A to jak v klasickém 3D tisku, kterým se zabývá tato práce, tak v mikro oblasti. [3]

Jako zdrojů záření k ozařování fotopolymerů může být používáno klasických „pokojevých“ projektorů. Tyto projektory pro promítání statických či dynamických scén v našich obývacích pokojích byly pro svoji rozšířenost a pořizovací náklady vyhledávaným zdrojem záření pro AM aplikace především v hobby sféře. Tato zařízení jsou však primárně určena pro projekci obrazu ve viditelném spektru a na vzdálené plochy. Pro účely zástavby do kompaktního AM zařízení a ozařování fotopolymeru reagujícího na UV záření jsou takovéto projektory nevhodné.

Tento problém řeší speciální průmyslové projektory, jejichž základní parametry, odvozené od standardních projektorů, budou přiblíženy na následujících řádcích.

- Rozlišení projektoru / DMD

Udává úroveň detailů (jemnost) na promítaném obrazu. Rozlišení projektoru se odvíjí od počtu mikrozrcátek na DMD. Rozlišení projektoru nemusí být využito naplno, pokud bitmapa poslaná do projektoru k projekci, bude mít nižší rozlišení než je rozlišení DMD. [8]

Rozlišení projektoru se stalo limitem pro použití v AM aplikacích. V současné době nelze dále rozumně navyšovat počet mikrozrcátek v DMD čipu pro jemnější obraz a přesnější výrobky. Proto výrobci přišli s různými technologiemi, které zjemňují promítaný obraz. Více o tomto tématu bude probráno v kapitole 5.3.2.

- Poměr stran DMD

Poměr stran R je dán použitým DMD. Hodnota získaná podílem počtu mikrozrcátek na šířku a počtem mikrozrcátek na výšku platí jen u orthogonal DMD. U diamond DMD se poměr stran určuje odlišně. [13]

- Úhlopříčka DMD

DMD i celé DLP jsou obvykle pojmenovávány podle své úhlopříčky v palcích. Úhlopříčku lze zjistit ze šířky w a výšky h DMD. [13]

$$l = \sqrt{w^2 + h^2} \quad (1)$$

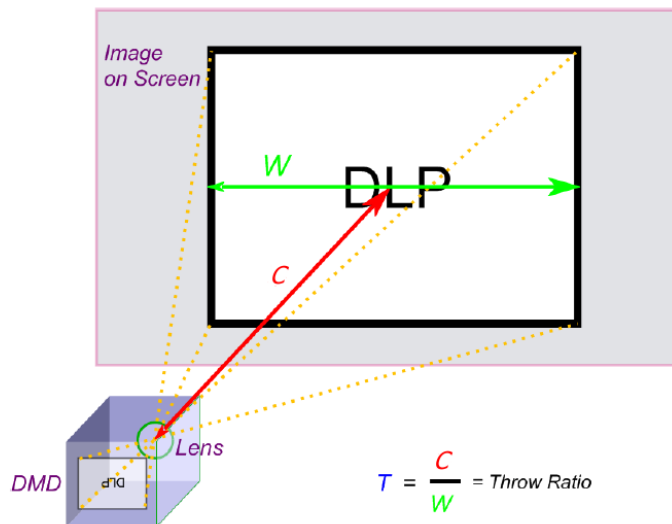
- Offset

Offset udává procentuální posunutí DMD vůči optické ose. Pokud je střed DMD přímo uprostřed optické osy, je offset 0 %. V případě, že optická osa prochází horním okrajem DMD (vzhledem k promítání vzhůru nohama dolním okrajem obrázku), je hodnota offsetu 100 %. Posunutí DMD vůči optické ose je používáno při promítání na plátno z projektoru umístěného na stole, aby nedocházelo k překryvu spodní části obrazu stolem. [13]

- Throw Ratio

Udává bezrozměrný poměr mezi vzdáleností projektoru od promítaného obrazu C a šířkou promítaného obrazu W . Čím je výsledná hodnota nižší, tím projektor dokáže stejně veliký obraz vykreslit na kratší vzdálenost. [13]

$$T = \frac{C}{W} \quad (2)$$



Obr. 4.5: Definice throw ratio [13]

- Ohnisková vzdálenost

Tato hodnota f udává vzdálenost v mm, při které optika projektoru zaostří na bod v nekonečnu. [13]

- Clona a clonové číslo

Udává průměr plochy, která vymezuje oblast, kudy prochází světlo. Velikost clony tedy přímo ovlivňuje množství světla procházející optickou soustavou, v tomto případě směrem od DMD. Velikost clony a tím pádem i optiky je tedy volena s ohledem na velikost samotného DMD. [13]

Jas obrazu vedle rozměru clony závisí ale také i na ohniskové vzdálenosti optiky. Pomocníkem v tomto ohledu je clonové číslo (f-number), které se získá poměrem mezi ohniskovou vzdáleností a velikostí (průměrem) clony D . Clonové číslo optiky je pak uváděno jako „f / hodnota“. Při porovnání dvou objektivů o stejné ohniskové vzdálenosti, ale jiných průměrech clony, bude mít objektiv s větší clonou nižší clonové číslo a bude tedy jasnější. [13]

$$f - number = \frac{f}{D} \quad (3)$$

- Zvětšení a zmenšení

Hodnota zvětšení informuje o tom, kolikrát je promítaný obraz větší než obraz na DMD. [13] Hodnota zvětšení se zvyšuje lineárně se zvětšující se velikostí promítaného obrazu při daném DMD. Přesně naopak funguje zmenšení. Pro tuto publikaci je však, vzhledem k tisku dílů větších než rozměry DMD, přínosná pouze hodnota zvětšení.

Absolutní hodnota zvětšení se získá poměrem mezi šířkou promítaného obrazu W a šířkou DMD w . [13]

$$M = \frac{W}{w} \quad (4)$$

- Velikost obrazového pixelu

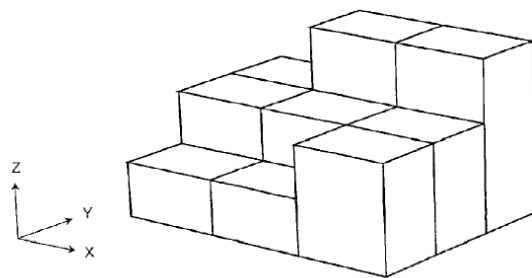
Velikost pixelu na promítaném obraze je dána velikostí pixelu na DMD p (velikost mikrozrcátka) násobenému zvětšením M , které je popsáno výše. [13]

$$P = p \cdot M \quad (5)$$

5 Princip DLP v rámci aditivní výroby

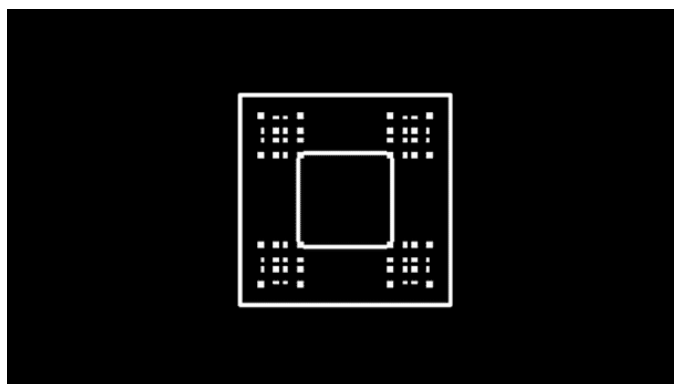
5.1 Příprava dat a jejich projekce

Na příkladu 3D DLP zařízení od společnosti EnvisionTEC je možné vysvětlit princip vytváření dílu a poukázat na odlišný přístup ve tvorbě dílu mezi jednotlivými výrobci.



Obr. 5.1: Schématické znázornění vrstvy voxelů v matici 3x3 [16]

3D CAD model dílu je ve speciálním SW voxelizován (voxel data). Voxel je výraz pro prostorový pixel. To znamená, že u každého pixelu je i informace o jeho výšce. Z vytvořených voxelů jsou složeny bitmapy reprezentující jednotlivé vrstvy. Bitmapy jsou ve stupních šedi (grayscale). Bíle jsou vyobrazena místa, která budou ve vrstvě plně ozařována, černě místa bez ozařování a šedě místa s méně intenzivním ozářením pro umožnění tisku rozdílně vysokých elementů v rámci jedné vrstvy. Vyobrazení takovýchto bitmap je zajištěno DLP čipem. Díky voxelizaci a grayscale je tedy možné vytvářet rozdílně vysoké elementy vytvrzeného resinu a tím dosáhnout vyšší přesnosti a hladkosti povrchu. [5], [17]



Obr. 5.2: Ukázka bitmapy jedné vrstvy modelu Eiffelovy věže [18]

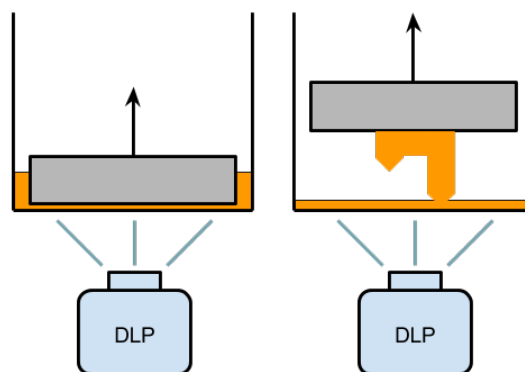
Naproti tomu méně sofistikované systémy 3D CAD model nevoxelizují, ale obvykle ho jen rozloží na jednotlivé vrstvy (Z-slices) o stejné výšce. Vzhledem k velmi malé výšce vrstev resp. výšce voxelů, přibližně o tloušťce listu papíru, je nutné pro vytvoření celého dílu použít stovky či tisíce bitmapových obrázků promítaných skrze projektor. [19]

5.2 Tvorba fyzického modelu

Stejně jako u stereolitografie rozeznáváme u DLP dva odlišné přístupy ke vzniku samotného dílu v nádobě s fotopolymerem. Jsou jimi techniky bottom up (odspodu nahoru) a top down (odshora dolů). Konstrukce a vliv jednotlivých prvků tiskárny budou vysvětleny v kapitole 6.

5.2.1 Bottom up

Vyráběný díl je vytvářován na pohyblivé platformě, která se nejprve ponoří do mělké nádoby s fotopolymerem. Na spodní části nádoby je průhledné kontaktní okno (contact window), skrze které je zespu fotopolymer ozařován. První vrstva fotopolymeru (burn-in layer) se, vlivem nasvícení masky z projektoru, vytvrdí na platformu a platforma se posune o výšku vrstvy směrem nahoru. Zvedáním platformy dochází k odlepování vytvrzené vrstvy od kontaktního okna nádoby a zatečení ještě nevytvrzeného tekutého fotopolymeru do prostoru pod platformou. Projekcí v pořadí další masky je nová vrstva vytvářována na již vytvrzenou vrstvu z předešlého kroku. Cyklus složený ze zvednutí platformy nad kontaktní okno o krok (výšku vrstvy) a projekce dynamické masky je neustále opakován, což má za následek postupné vytváření dílu vrstvu po vrstvě. [5], [19]

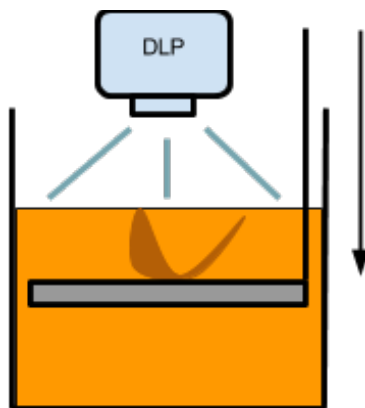


Obr. 5.3: Schématické znázornění bottom up DLP [20]

Vyráběný díl je stavěn vzhůru nohama. Poslední vytvrzená vrstva náleží vršku dílu. Princip stavění dílu je tedy odspodu nahoru, proto tedy výraz bottom up.

5.2.2 Top down

Vyráběný díl je opět vytvrzován po vrstvách na pohyblivé platformě, zdroj záření se však nachází nad nádobou o větším objemu. Nádoba musí pojmout velké množství fotopolymery a také celý vytvrzovaný model. Platforma je ponořena ve fotopolymery. Každá vrstva je vytvrzována mírně pod hladinou, s každou další vrstvou se platforma stále více zanořuje. Před ozařováním nové vrstvy po hladině přejíždí stěrač připravující novou vrstvu resinu. Vyrobený dílec musí na konci procesu celý vyjet z nádoby. [5] U vyráběného dílu odpovídá poslední vytvrzená vrstva, stejně jako v případě metody bottom up, vršku modelu, model však není vyráběn vzhůru nohama, ale tak jak stojí. Díly jsou proto vytvářeny odshora dolů.



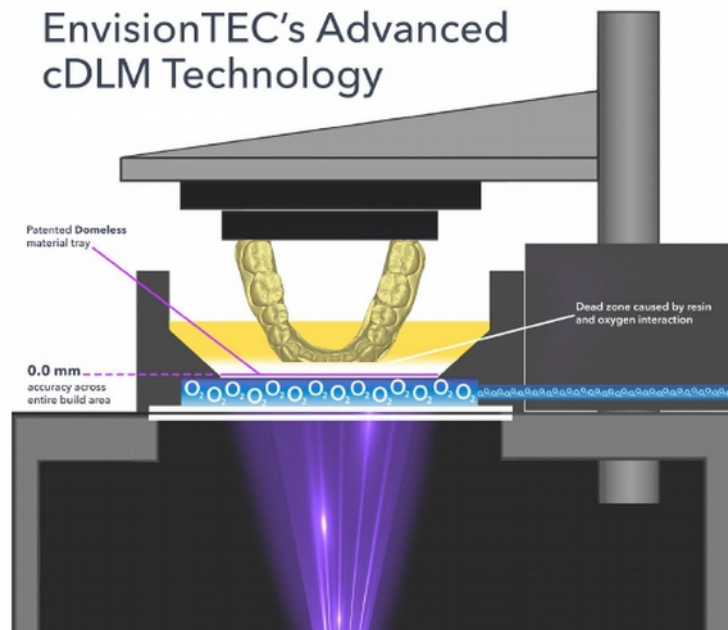
Obr. 5.4: Schématické znázornění top down DLP [20]

5.2.3 Kontinuální výroba

Vyšší požadavky na rychlost výroby dílů, materiálovou izotropii či použití jinak nezpracovatelných materiálů vedly k metodám rychlé kontinuální výroby. [21] Ty jsou na první pohled velmi podobné klasickému DLP bottom up procesu, ale přináší zcela nové techniky a překážky. Do této kategorie patří např. technologie CLIP a cDLM.

Princip kontinuální výroby spočívá v plynulém promítání obrazu z projektoru a zamezení přilepování vrstev na kontaktní okno nádoby. Toho je dosaženo použitím tenké fólie, která propouští kyslík. Kyslík totiž potlačuje polymerizaci. V tenké vrstvě nad fólií tedy nedochází k vytvrzování materiálu. Resin je vytvrzován v prostoru nádoby bez možnosti přilepení. Přiváděný kyslík pod tenkou fólii ovšem způsobuje vyklenutí

fólie směrem nahoru (dome effect) a tím velmi snižuje přesnost tisku. Toto je problém, který se některým subjektům na trhu již podařilo eliminovat. [21]



Obr. 5.5: Princip cDLM - kontinuální výroby společnosti EnvisionTEC [21]

5.3 Parametry AM zařízení

Parametry AM zařízení postavených na technologii DLP jsou definovány obdobně jako u jiných technologií vyrábějících díly postupným vrstvením materiálu.

5.3.1 Stavební rozměry

Udávají maximální vnější rozměry vyráběného dílu, který je možné na zařízení vyrobit. Udávají se jako šířka x hloubka x výška.

5.3.2 XY rozlišení

XY rozlišení definuje přesnost, s jakou jsou jednotlivé bitmapy promítány. Hodnota rozlišení udává skutečnou velikost (obrazového) pixelu v mikrometrech (μm). Čím je hodnota nižší, tím je promítaná vrstva jemnější a přesněji vykreslená. Hodnotu je možné vypočítat pomocí poměru mezi šířkou promítaného obrazu W v μm a počtem promítaných pixelů ve stejném rozměru Q . Jedná se však jen o sloučení výpočtu zvětšení projektoru (4) a výpočtu velikosti obrazového pixelu (5):

$$XY = p \cdot M = \frac{p \cdot W}{w} = \frac{W}{Q} = P \quad , \quad (6)$$

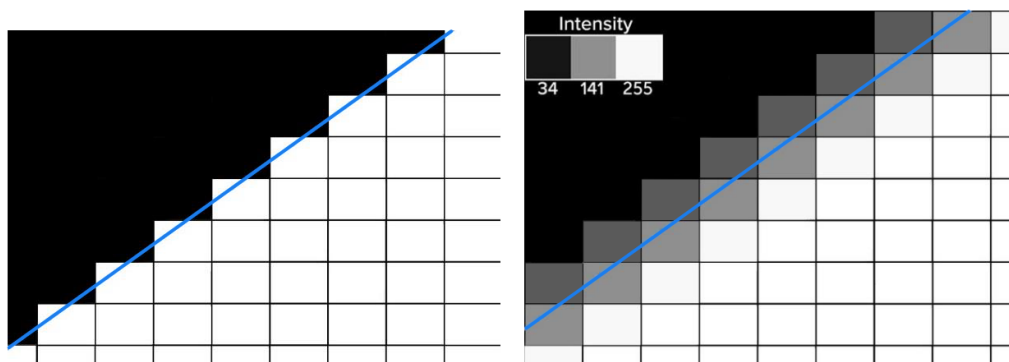
kde $Q = \frac{w}{p}$. (7)

Mezi technologie, které se dále starají o zlepšení XY rozlišení resp. zlepšení přesnosti výrobku v rovině xy obecně, lze zařadit metodu grayscaleingu nebo například zařízení ERM.



Obr. 5.6: Elektromechanické zařízení ERM [17]

Patentované zařízení ERM od envisionTEC je elektromechanické zařízení, které během expozice bitmapy mírně mění polohu projektoru v rovině xy. V obou směrech posouvá projektor o půl pixelu. To má za následek zjemnění efektu schodů na obrysových hranách vyráběných dílů a zlepšení hodnoty XY rozlišení o polovinu. [17]



Obr. 5.7: Princip grayscaleingu [17]

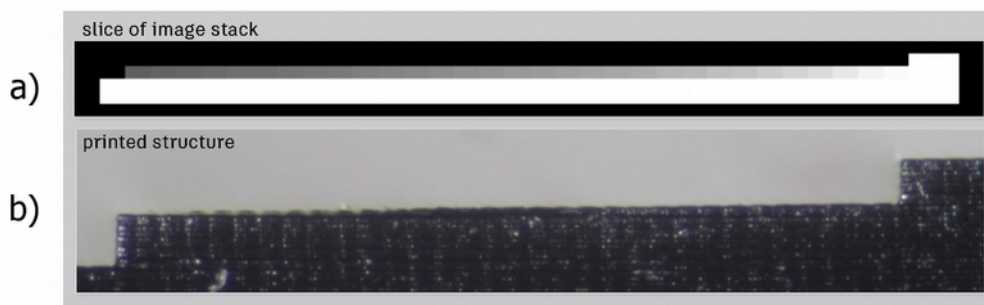
Kontura CAD modelu (modrá linka) je při slicování rozpixelována do schodovitého efektu (obrázek vlevo), škálováním bitmapy do odstínů šedi dochází ke zpřesnění obrysových hran (obrázek vpravo).

Další technologií je grayscaleing. Schodovitý efekt na obrysových hranách vyráběných objektů je potlačován vlivem škálování obrysových pixelů do odstínů šedi. Promítaný pixel v odstínu šedé barvy způsobí ve fotopolymeru jen částečné vytvrzení oblasti pixelu. Velikost vytvrzené oblasti je přímo závislá na odstínu šedé barvy. Efekt grayscaleingu

lingu je tím vyšší, čím je původní obraz jemnější. [17] V hodnotě XY rozlišení se efekt grayscale nepromítá.

5.3.3 Z rozlišení

Jelikož je díl vyráběn po vrstvách, udává Z rozlišení výšku vrstvy v μm . U systé-
mů pracujících s voxely se Z rozlišení udává jako dynamická hodnota, která se u jednot-
livých bodů v jedné vrstvě může lišit. Jedná se tedy také o použití metody grayscale,
tentokrát však v ose z (viz. 5.1). [17]



Obr. 5.8: Aplikace prostorových pixelů [22]
v rámci jedné vrstvy lze vytvořit mírně nakloněnou plochu; boční pohled na:
a) vyškálované vrstvy modelu, b) vyrobený díl

5.3.4 Přesnost

Přesnost jako taková nebývá u DLP zařízení udávána, není zde totiž žádný prů-
myslový standard pro její určení či porovnání. Není dána jen rozlišením v rovině xy
a v ose z, ale i dalšími vlivy, kam patří nepřesnosti v pohybových mechanismech, ne-
přesnosti při odlepování, vlastnosti resinu, optické chyby, orientace dílu, délka oza-
řování, chyby vytvrzeného dílu (smrštění, zkroucení, nabobtnání), nebo způsob
provedení post-processingu. [23]

Post-processing se může skládat z úkonů, jako je odejmutí dílu z platformy,
čištění dílu, odstranění podpor, vyhlazení povrchu dílu či dodatečné vytvrzování. [5]
Samotný post-processing může mít vliv na přesnost dílu, je proto vždy výhodnější díly
vytisknout co nejpřesněji a bez potřeby dodatečných úprav. [17]

5.3.5 Rychlost tisku

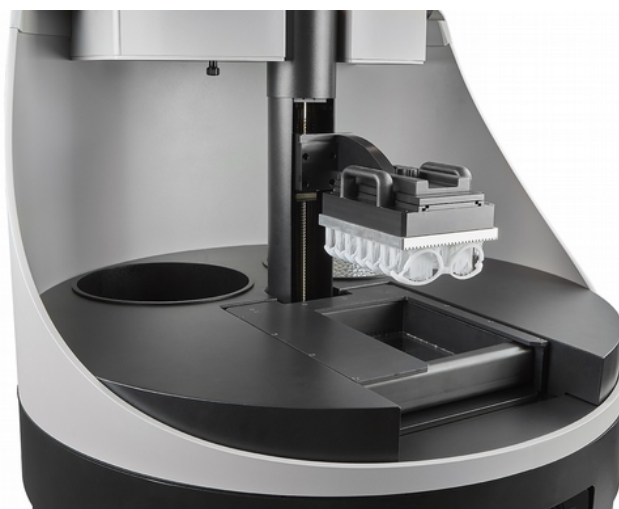
Rychlost tisku je důležitou hodnotou pro efektivní výrobu dílů, často však nebývá
výrobci zařízení udávána. Pokud ano, tak je definována počtem vytvrzených milimetrů
materiálu v ose z za jednu hodinu (mm/h).

6 Prvky 3D DLP bottom up tiskárny a jejich funkce

V této práci se autor zabývá návrhem 3D DLP bottom up tiskárny. Hlavním důvodem je požadavek na kompaktnost zařízení, kterého lze snáze dosáhnout použitím mělké nádoby s malým množstvím fotopolymery. To má výhodu i z hlediska provozních nákladů, kdy není potřeba velkého objemu drahého fotopolymery. Zároveň je možná snadná záměna fotopolymery v nádobě, pokud je vyžadován tisk z jiného materiálu. Z pohledu laboratorního využití zařízení je toto velkým pozitivem.

Fyzický proces tvorby dílů se odehrává mezi pohyblivou platformou a nádobou s resinem. 3D DLP tiskárny však obecně patří, co se týče množství pohyblivých mechanismů, mezi jednodušší AM technologie. A to i při porovnání v rámci kategorie vat photopolymerization. Pokud by se braly v potaz i samotné DMD a optika projektoru, tak by již situace nebyla tak jednoznačná. Nicméně s těmito součástmi nepřijde konstruktér běžné 3D tiskárny fyzicky do styku. Pouze s kompletním projektozem.

Pohyblivými prvky u DLP tiskáren, které mají přímý vliv na pracovní proces výroby, jsou pohybová jednotka osy z (osa Z), případně mechanismus pro snížení separačních sil mezi vytvrzenou vrstvou a kontaktním oknem či stěrač kontaktního okna. Projektor bývá standardně usazen pevně bez možnosti změny stavebního prostoru a tím XY rozlišení. Maximálně je uživateli dovolena kalibrace zaostření projektoru. Ovšem lze narazit i na pohybově více sofistikovaná zařízení. Například taková, která v jednom rámu kombinují výrobní prostor s prostorem vyhrazeným povýrobním operacím.



Obr. 6.1: DWS XCELL 6000PD s myčkou výtisků a UV komorou [24]

Jedním takovým je XCELL 6000PD od společnosti DWS, které je výrobcem označované za první vestavěnou pracovní buňku. SL zařízení totiž do svého pracovního prostoru integruje i myčku výtisků a UV vytvrzovací komoru. Proces výroby a povýrobních operací probíhá bez zásahu uživatele, přičemž veškerá manipulace s dílem je realizována otočnou pohybovou jednotkou osy z. [24]

6.1 Stavební platforma

Platforma je pevně uchycena k ose Z, vykonává proto mnohdy jediný motorizovaný pohyb v rámci celého zařízení. Samotná platforma je jen spodní odnímatelná část pohybujícího se „nástroje“. Na ní, resp. její spodní pracovní plochu, je vytvrzena první vrstva resinu.

Pracovní plocha platformy musí být rovná, a situována rovnoběžně s kontaktním oknem nádoby a kolmo na osu Z. [19] Zároveň musí umožňovat přesnou, rychlou a snadnou montáž a demontáž vůči jejímu držáku. Demontáž a následná montáž platformy je nejčastějším mechanickým úkonem obsluhy, který je vykonáván vždy po dokončení výroby dílu. Vyroběný díl je nutno sejmout z platformy po jejím vyjmutí ze zařízení a to bez poškození její pracovní plochy.

Pracovní plocha může být různě tvarově upravena. Cílem je zamezení zkroucení dílu vlivem vnitřního pnutí v materiálu nebo zajištění propustnosti pro vysoce viskózní resin, aby při pohybu platformy směrem dolů nezvyšoval tlak mezi platformou a nádobou a naopak při pohybu platformy směrem nahoru mohl vyplnit objem pod platformou. Těmito úpravami mohou být souvislá řada příčných drážek nebo pravidelná matice válcových děr. Platforma by měla být objemově úsporná, aby při ponoření do resinu nedocházelo k vytlačování velkého množství resinu kolem platformy.

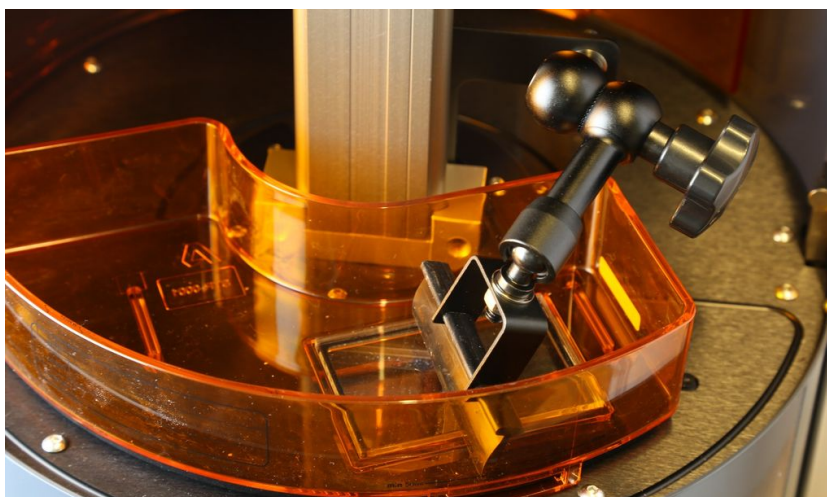


Obr. 6.2: Platforma s tvarově upravenou pracovní plochou [25]
Zařízení Flashforge Hunter.

6.2 Nádoba

Nádoba je nejen rezervoárem resinu, ale hlavně prvkem, kde se odehrává celý proces změny kapaliny v pevné těleso. K vytvrzování první vrstvy resinu dochází mezi ponořenou pracovní plochou platformy a horní plochou transparentního kontaktního okna. V dalších vrstvách už vždy mezi spodní rovinou předchozí vytvrzené vrstvy a kontaktním oknem. Mezera mezi těmito pomyslnými plochami je právě rovna požadované výšce vrstvy.

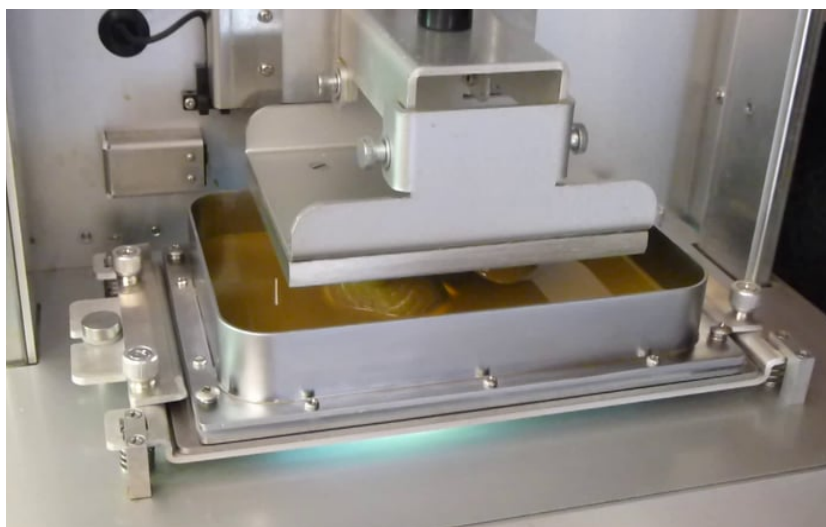
Při vytvrzování resinu dochází nejen k jeho přilepení na platformu nebo předešlou vrstvu, ale i na kontaktní okno, které může být ze skla nebo plexiskla. Proto se tyto materiály překrývají polydimethylsiloxanen (PDMS) z rodiny silikonů, který tento problém s přilepením vytvrzované vrstvy, díky své elasticitě a nízké adhezi, částečně řeší. Na druhou stranu však vlivem kontaktu s vytvrzovaným fotopolymerem dochází velmi rychle k zamlžení PDMS, v exponovaných místech někdy dokonce i k jeho destrukci. PDMS je pak nutné vyměnit, v některých případech je ale měněna celá nádoba. Některá zařízení používají stěrač pro zvýšení životnosti PDMS, který přejíždí po PDMS před vytvrzováním každé vrstvy pro doplnění kyslíku do jeho povrchové vrstvy. [26], [27] Odlepování jednotlivých vrstev od okna je velmi problematická záležitost, jejíž nedostatečné dořešení má rapidní dopad na kvalitu dílů, případně může vést až k destrukci dílu.



Obr. 6.3: Nádoba s otočným mechanismem a stěračem pro čištění PDMS [28]
Zařízení Autodesk Ember.

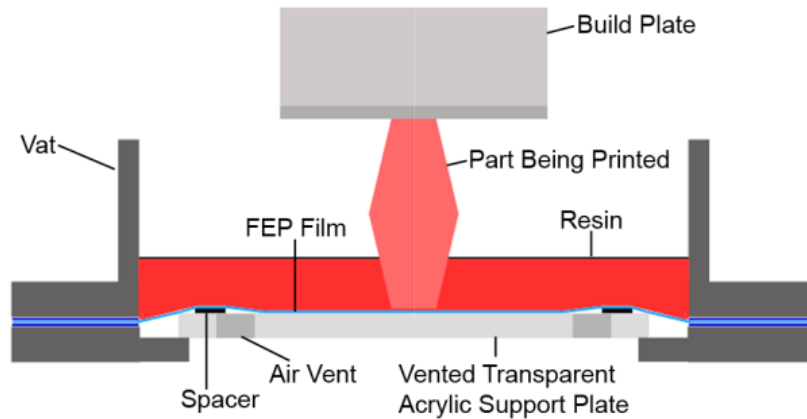
Obvyklé řešení problému přilepení dílu k PDMS je řešeno pomocí rozličných mechanismů [26], které, nejčastěji vázané na nádobu, motorizovaně nebo jen na principu přemáhání pružinových prvků snižují separační síly. Pružinové systémy obvykle pracují na principu postupného přemáhání skupiny předepjatých pružin. Ty v nezátíženém stavu přitlačují nádobu na rám tiskárny. Přilepený díl pak pohybuje celou nádobou směrem nahoru než dojde k odloupení dílu od nádoby.

Motorické systémy v synchronním sledu s osou Z pohybují nádobou v různých směrech. Například v horizontálním směru nejčastěji podél osy x , naklápěním nádoby ve svislém směru nebo natáčením podél svislé osy.



*Obr. 6.4: Platforma, a nádoba s FEP fólií a motorickým systémem naklápění [29]
Zařízení Makex M-One.*

Nyní díky rozmachu pokročilých materiálů s unikátními vlastnostmi již pro určité materiály a tiskové parametry není nutné používat takovýchto mechanismů, které do systému vnášejí nežádoucí nepřesnosti. Jedním z takových materiálů je FEP (fluorinated ethylene-propylene), který je v podobě tenké flexibilní fólie používán jako materiál kontaktního okna nádoby. Zjednodušeně řečeno se jedná o průhledný TeflonTM. Použitím FEP dochází k postupnému odlepování vrstvy, jelikož se fólie vlivem tahu od platformy vyklene směrem nahoru. Tato flexibilita je však zároveň největší nevýhodou řešení, jelikož vlivem tíhy fotopolymery a tlaku od ponořované platformy dochází k vyklenutí fólie, tentokrát ale na opačnou stranu. To má za následek snížení přesnosti výroby dílů. Fólie tak musí být značně předepnuta, nebo podepřena transparentním materiálem. [26]



Obr. 6.5: Schéma nádoby s průlinčitou FEP fólií [26]
Nádoba je napínána destičkou plexiskla s ventilačními otvory pro nenucený přívod a odvod vzduchu.

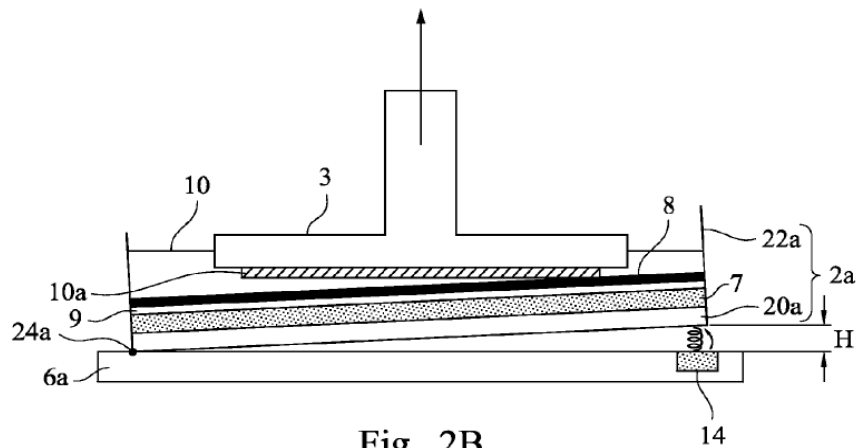
Pro zdůraznění potřeby kvalitního předepnutí fólie lze uvést, že společnost EnvisionTEC u svých nádob provádí kontrolu tohoto předepnutí. Principem je mechanické vybuzení předepnuté fólie, což vede k akustické odezvě fólie, podobně jako u hudebního bubnu. Tyto tóny jsou měřeny digitálním frekvenčním čítačem. Zvuk musí vyhovovat předepsaným hodnotám, jinak nemůže být nádoba expedována k zákazníkovi. [19]



Obr. 6.6: Naměřená hodnota akustického projevu fólie nadepsaná na nádobě [19]

Lze se setkat i s řešením, kdy je v nádobě na skleněném nebo plexisklovém podkladu přítomno PDMS a na něm ještě i FEP fólie. Údělem fólie je oddělit silikon od resinu, aby silikon netrpěl na optickou degradaci. [27] Může být použito měkkého nebo tvrdého silikonu. Měkký silikon je flexibilní a velmi lepkavý, tudíž fólie k němu přilne. Díky mechanické poddajnosti PDMS i fólie je možné dosáhnout nízkých separačních sil. Tvrdý PDMS je již poměrně tuhý a nelepí, takže je nutné fólii k němu přilepit, například transparentní oboustrannou páskou. Separací síly jsou, díky znatelně

nižší poddajnosti PDMS větší, na druhou stranu je ale možné tisknout větší díly bez rizika zvlnění fólie. [30]



Obr. 6.7: Schéma nádoby se složeným kontaktním oknem [31]
transparentní spodní deska (20a), vrstva elastického materiálu (např. silikon) (7), fólie odolná poškození od dopadajících těles (9) a chemicky odolná fólie s nízkou povrchovou energií (8)

6.3 Pohybová osa Z

Osa Z se stará o přesné krokování po vrstvách. Pohybová jednotka musí být umístěna přesně (kolmo na nádobu), aby požadovaný krok byl realizován se stejnou hodnotou. Při postupné výrobě vrstev se osa Z po dokončení vrstvy zvedá o hodnotu větší než je výška vrstvy a následně se o malý kus vrací zpět na hodnotu výšky vrstvy. To z toho důvodu, aby se vytvrzená vrstva plně odlepila od kontaktního okna. [19] Zároveň také proto, aby tekutý resin mohl zatéct do vzniklého prostoru pod platformou. Při nepřetržitém způsobu výroby se osa Z plynule pohybuje směrem nahoru.

7 Komerční 3D tiskárny

V této kapitole jsou stručně popsány parametry a technologické principy několika komerčních AM zařízení pracujících na principu fotopolymerizace v nádobě.

7.1 Flashforge Hunter

DLP 3D tiskárna Hunter s cenou \$ 3 599 nabízí Full HD projektor s vlnovou délkou 405 nm a životností 50 000 hodin vlastní výroby a technologií pro kontrolu a zpětnovazební regulaci intenzity osvětlení. Zařízení obsahuje algoritmy pro grayscaling a korekci zkreslení kontur. K výrobě dílů dochází mezi hliníkovou nádobou na fotopolymer s FEP folií a platformou s vroubkovanou tiskovou plochou. Zařízení je ovládáno skrze dotykový barevný display a SW FlashPrint. [25], [32]



Obr. 7.1: Flashforge Hunter [25]

Tab. 7.1: Parametry zařízení Flashforge Hunter [32]

| | | | |
|--------------------------------|--------------|----------------------|-------------|
| Technologie | DLP | Rozlišení projektoru | 1920x1080 |
| Stavební rozměry [mm] | 120x67,5x150 | Vnější rozměry [mm] | 360x310x560 |
| Z rozlišení [μm] | 50 - 250 | Hmotnost [kg] | 17,8 |
| XY rozlišení [μm] | 62,5 | Konektivita | USB, Wi-Fi |

7.2 Formlabs Form 2

SL 3D tiskárna Form 2 disponuje systémem automatického doplňování fotopolymeru a detekcí vstupního materiálu. Laser má výkon 250 mW a vlnovou délku 405 nm. Výrobce nabízí velké množství vlastních resinů. Nádoba tiskárny je automaticky vyhřívána na 35 °C a posunována do strany pro odlepení vrstvy. Nádoba také disponuje stěračem, který se stará o promíchávání resinu pro odstranění částic z oblasti tisku. Tiskárna reaguje na příkazy skrze dotykový barevný display, tiskne se pomocí SW PreForm. Od 3 350 € je možné pořídit základní sadu s resinem a dokončovací sadou. [33]



Obr. 7.2: Formlabs Form 2 [33]

Tab. 7.2: Parametry zařízení Formlabs Form 2 [33]

| | | | |
|------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|
| Technologie | SL (SLA) | Vnější rozměry [mm] | 350x330x520 |
| Stavební rozměry [mm] | 145x145x175 | Hmotnost [kg] | 13 |
| Výška vrstvy [μm] | 25, 50, 100 | Napájení [W] | 65 |
| Velikost paprsku [μm] | 140 | Konektivita | USB, Wi-Fi, ethernet |

7.3 EnvisionTEC Perfactory® 4 Mini XL LED

Výrobce DLP tiskárny nabízí dvě verze, které se liší optikou projektoru. Na výběr je zařízení s optikou o ohniskové vzdálenosti 60 mm a 75 mm. Podle zvolené optiky se liší velikost stavební plochy a XY rozlišení. EnvisionTEC používá technologie ERM a voxelizace, takže výška vrstvy je dynamickou hodnotou a XY rozlišení dosahuje 2x lepších hodnot. Tiskárna obsahuje Full HD projektor s LED zdrojem osvětlení s životností 20 000 hodin. Výrobce slibuje snadnou a rychlou výměnu stavebního materiálu a ekonomické využití materiálu bez použití nádoby. Zařízení je dodáváno s potřebným SW a dokáže vyrábět díly ze široké škály materiálů. [34]



Obr. 7.3: EnvisionTEC Perfactory 4 Mini XL LED [34]

Tab. 7.3: Parametry zařízení EnvisionTEC Perfactory 4 Mini XL LED [34]

| | | | |
|-----------------------|-------------|---------------------|--------------|
| Technologie | DLP | Vnější rozměry [mm] | 730x480x1350 |
| Stavební rozměry [mm] | 115x72x220 | XY rozlišení [μm] | 60 |
| | 84x52,5x220 | (bez ERM) | 44 |
| Z rozlišení [μm] | 15 - 150 | XY rozlišení [μm] | 30 |
| | | (s ERM) | 22 |
| Rozlišení projektoru | 1920x1080 | Hmotnost [kg] | 85 |

7.4 Autodesk Ember

Výrobce prezentuje 3D tiskárnu jako open zařízení. Uživatel zařízení má přístup do veškerého nastavení tiskárny, ke kódům firmwaru, CAD datům a datům elektroniky, může používat jakékoliv kompatibilní resiny. Zařízení využívá DLP WXGA projektoru s 5W LED o životnosti 20 000 hodin a vlnové délce 405 nm. Zařízení minimalizuje separační síly pomocí mechanismu, který pohybuje nádobou otáčivým vratným pohybem kolem svislé osy. Kalibrace osy Z a platformy je vyřešena pomocí kulového čepu na platformě. Vyráběný model je voxelizován v SW Print Studio. [35] K zařízení je možné přidat i stěrač pro čištění PDMS po vytvrzení každé vrstvy. [28]



Obr. 7.4: Autodesk Ember [35]

Tab. 7.4: Parametry zařízení Autodesk Ember [35]

| | | | |
|--------------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------------------|
| Technologie | DLP | Rychlost tisku [mm/h] | 18 (při vrstvě 25 μm) |
| Stavební rozměry [mm] | 64x40x134 | Vnější rozměry [mm] | 325x340x434 |
| Z rozlišení [μm] | 10 - 100 | Hmotnost [kg] | 10 |
| XY rozlišení [μm] | 50 | Napájení [W] | 100 |
| Rozlišení projektoru | 1280x800 | Konektivita | USB, Wi-Fi, Ethernet |

7.5 Kudo3D Bean

Pro redukci separačních sil zařízení používá upravenou technologii nazývanou PSP-D, která vychází z patentované technologie PSP. [36] Původní PSP zahrnovalo systém pasivního odlepování vytvrzené vrstvy od nádoby, která byla vyrobena z ohebného materiálu s vrstvou silikonu a teflonovou fólií navrchu. [30] Promítání obrazu se děje prostřednictvím 2K LCD panelu a 40 W LED s vlnovou délkou 405 nm. Osa Z je kalibrována pomocí optického senzoru. Kalibrace rovnoběžnosti je možná přes kulový čep, přes který je uchycena platforma k ose Z. Zařízení je financováno skrze crowdfunding, základní sada tiskárny vychází na příspěvek ve výši \$ 449. [36]



Obr. 7.5: Kudo3D Bean [36]

Tab. 7.5: Parametry zařízení Kudo3D Bean [36]

| | | | |
|--------------------------------|------------|-----------------------|----------------------------------|
| Technologie | LCD | Rychlost tisku [mm/h] | až 20 (vrstva 50 μm) |
| Stavební rozměry [mm] | 121x68x150 | Vnější rozměry [mm] | 200x200x400 |
| Z rozlišení [μm] | 10 | Hmotnost [kg] | 6,67 |
| XY rozlišení [μm] | 50 | Rozlišení | 2048x1080 |

8 Komponenty použité ve 3D tiskárně

Na řádcích níže jsou uvedeny komponenty a prvky, které byly před stavbou 3D DLP tiskárny nakoupeny nebo již byly k dispozici.

8.1 Projektor

Pro aplikaci kompaktní DLP 3D tiskárny je použito DLP projektoru, který byl pořízen ještě před započatím práce na této publikaci. Jedná se o vývojový modul DLP® LightCrafter™ E4500 MKII™ PLUS společnosti EKB, který je postaven na čipsetu DLP4500 od společnosti Texas Instruments. [37]



Obr. 8.1: DLP projektor s čipsetem DLP4500 [37]

Diamond DMD o úhlopříčce pole mikrozrcátek 0,45“ nabízí rozlišení (počet mikrozrcátek) 912 x 1140. Mikrozrcátek je tedy více než 1 milion, přičemž jedno mikrozrcátko má úhlopříčku 7,6 μm . Projektor zpracovává bitmapové obrázky o rozlišení až WXGA (1280 x 800 [37], poměr stran $R = 16:10$), jejichž pravoúhlé pixely přepočítává na kosočtvercová mikrozrcátka. DMD je řízeno digitálním kontrolerem DLPC350 umístěným na konektorové desce. [11]

Místo trojice RGB LED je zde použito jediné UV LED o výkonu 5,5 W a vlnové délce 385 – 405 nm. Světelný výkon může být až 2 W. Offset projektoru je 0 % a throw ratio činí 1.1. Projektor dokáže promítat jak černobílé bitmapy, tak i osmi bitové bitmapy ve stupních šedi (grayscale). [37] Každé mikrozrcátko tedy může zobrazovat intenzitu světla až v 256-ti odstínech šedi.

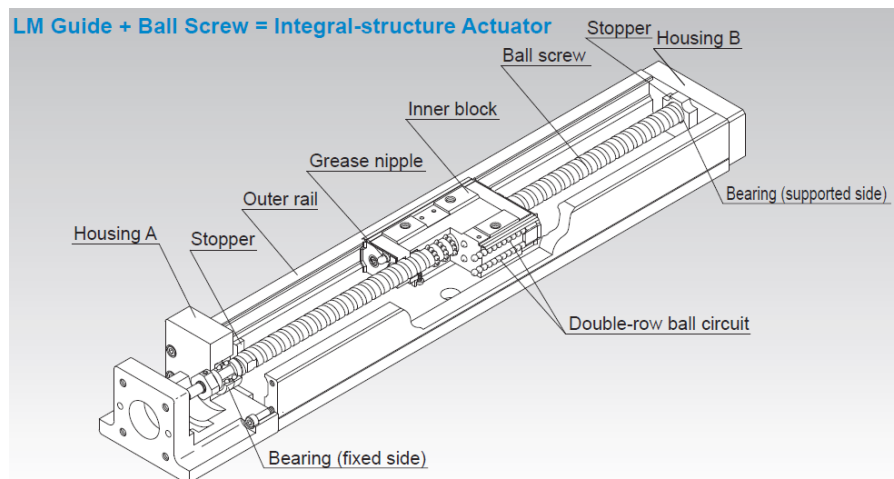
Projektor disponuje malým ventilátorem pro chlazení. Zaostřování objektivu je možné pomocí čepu na tubusu objektivu. Bylo ověřeno, že projektor při promítání černé barvy resp. nepromítání mírně propouští světlo. To si vyžaduje konstrukční úpravy, aby nedocházelo k ozařování fotopolymery během odlepování vytvrzených vrstev.

8.2 Pohybová jednotka osy Z

Pohybová jednotka nebyla v počátku prací početně navrhována, jelikož nejsou známy zátěžné charakteristiky vznikající při 3D tisku fotopolymery. Pro úlohu je proto vybrána pohybová jednotka složená z krokového motoru, brzdy a lineární jednotky s kuličkovým šroubem, která byla použita při stavbě jiné větší 3D tiskárny v diplomové práci „Konstrukce 3D tiskárny na fotopolymer“ Bc. Pavla Macha [38]. Jednotka se jeví jako dostatečně dimenzovaná pro použití v kompaktní 3D DLP tiskárně.

8.2.1 Lineární jednotka

Lineární jednotka THK KR3306A-0300-H0-00A0 s kuličkovým šroubem disponuje výškou 33 mm, stoupáním šroubu 6 mm, zdvihem 300 mm a celkovou délkou 470 mm. Hmotnost jednotky činí 3,2 kg. Saně jsou na každé straně v rámu vedení tvaru U valivě uloženy na dvou oběžných kuličkových tratích. Opakovatelná přesnost polohování jednotky je 5 μm , nejvyšší rychlost pohybu pak 470 mm/s. [39]



Obr. 8.2: Schéma lineární jednotky THK [39]

8.2.2 Motor

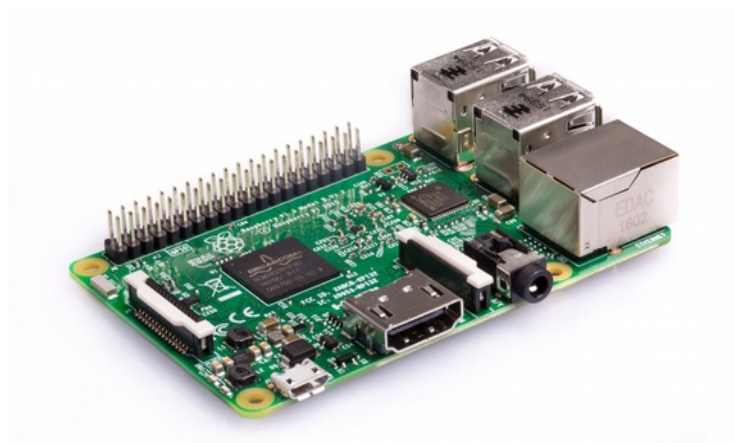
Pohyb krokového motoru s integrovanou elektromagnetickou brzdou a enkodérem Fastech EziSERVO® BK-60L je řízen budičem (driverem) krokového motoru s uzavřenou smyčkou. Motor o velikosti 60 mm a délce 90 mm má zádržný moment 2,4 Nm a s brzdou váží 1 960 g. [40]

8.3 Posuvný stůl projektoru

V [38] byl pro flexibilní uchycení projektoru použit lineární posuvný stůl SLW-1040-HR-HK. Vedení saní stolu je realizováno skrze lineární kluzné vedení drylin® W. Pohyb saní je zajištěn trapézovým šroubem TR 10 x 2 s ručním ovládáním. Stůl o zdvihu 350 mm je možné aretovat v požadované poloze. [41]

8.4 Prvky pro řízení tiskárny

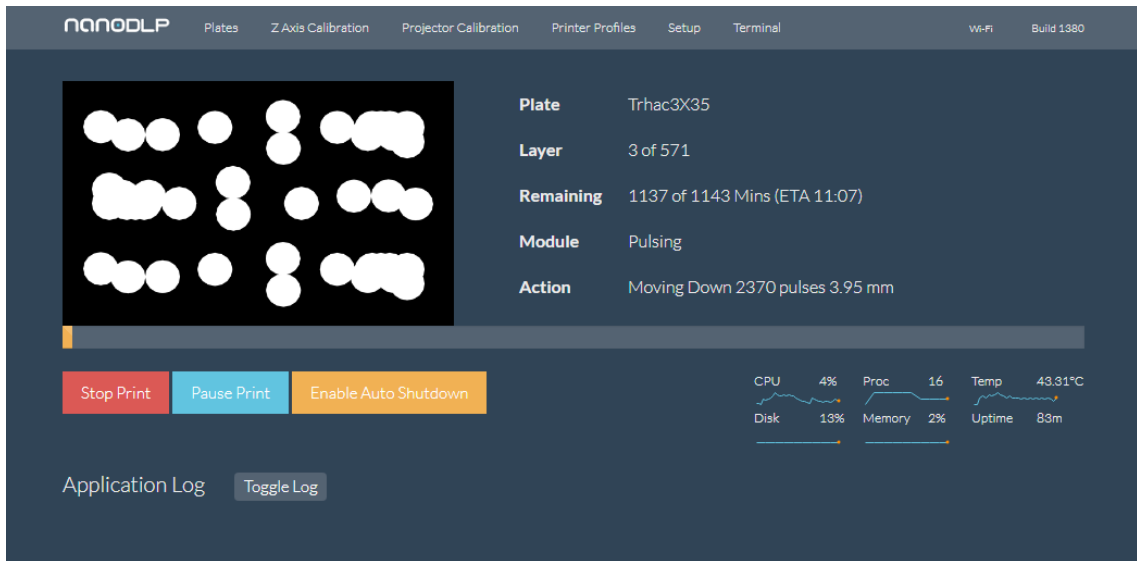
K řízení procesu 3D tisku na zařízení je použito SW nahraného, skrze paměťovou kartu, do jednodeskového počítače [42] Raspberry PI 3 Model B V1.2. Tento mikropočítač obsahuje vše, s čím se běžně setkáváme u klasických PC nebo notebooků, jen v menším a méně výkonnějším provedení. Důležitá je přítomnost HDMI konektoru pro spojení s projektor. Informace o činnosti 3D tiskárny zobrazuje řádkový LCD panel DS-C2004A3.



Obr. 8.3: Mikropočítač Raspberry PI 3 [42]

SW obstarávající veškerou činnost aditivní výroby na zařízení je NanoDLP. Do SW se nahrají 3D polygoniální data (SLT, SLC), která vestavěný algoritmus (slicer) rozdělí na jednotlivé vrstvy, tyto bitmapy jsou pak synchronně s pohybem osy Z posílány skrze HDMI konektor v Raspberry PI do projektoru. SW NanoDLP běží

na Raspberry PI je, po připojení přes Wi-Fi, přístupný přes webový prohlížeč klientského zařízení.



Obr. 8.4: Software NanoDLP pro DLP a SL tiskárny

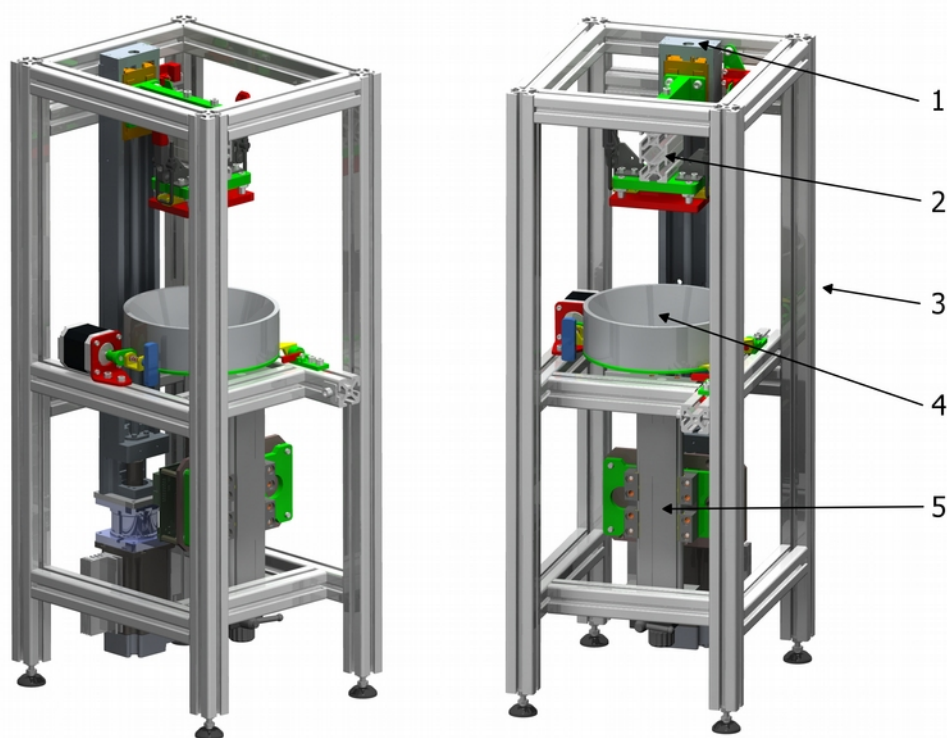
8.5 Napájecí zdroje

Pro napájení všech komponent jsou použity dva zdroje napájení, jelikož je potřeba hned několika napájecích napětí pro připojené komponenty. Pro napájení Raspberry PI (5 V) a projektoru (12 V) je použito zdroje napájení RPD-65C. Zdroj RPS-120 je použit pro napájení motoru s brzdou osy Z (24 V). U zdrojů je nutná výkonnostní rezerva pro další potencionální spotřebiče elektrické energie.

9 Konstrukční návrh zařízení

Kompaktní 3D DLP tiskárna je navrhována za použití komponent uvedených v kapitole 8. Konstrukční práce na zařízení lze rozdělit do několika etap podle posloupnosti navrhování jednotlivých prvků. Konstrukční návrh je prováděn v CAD programu Creo Parametric 3.0. Normalizované spojovací prvky jsou brány z knihovny ProStandards. 3D CAD data jednotlivých prvků třetích stran jsou stažena skrze webové portály traceparts (<https://www.traceparts.com/en>), GrabCAD (<https://grabcad.com/>). Data některých prvků byla dostupná ještě před započítím práce na konstrukčních návrzích.

9.1 Konstrukční práce 1



Obr. 9.1: 1. návrh – kompletní zařízení

1) pohybová jednotka osy z, 2) sestava platformy, 3) rámová konstrukce, 4) nádoba s naklápěcím mechanismem, 5) posuvný stůl s projektorem

Na úplném počátku konstrukčních prací byly navrhovány základní vnitřní prvky, které se přímo starají o samotný proces aditivní výroby, tzn. nádoba a sestava platformy. Sestava platformy se skládá ze stavební platformy (platforma), konzoly, systému uchycení příp. kalibrace. Tyto prvky jsou následně propojeny s pohybovou jednotkou osy z a zároveň je k nim napasován projektor uchycený na posuvný stůl. Na základě roz-

místění a velikosti jednotlivých prvků je pro ně navržen nosný rám. Konstrukční práce tedy pomyslně probíhají zevnitř zařízení směrem ven, tak aby byla rámová konstrukce přesně uzpůsobena pro sestavu prvků a bylo dosaženo kompaktních rozměrů celého zařízení.

9.1.1 Nádoba s uchycením

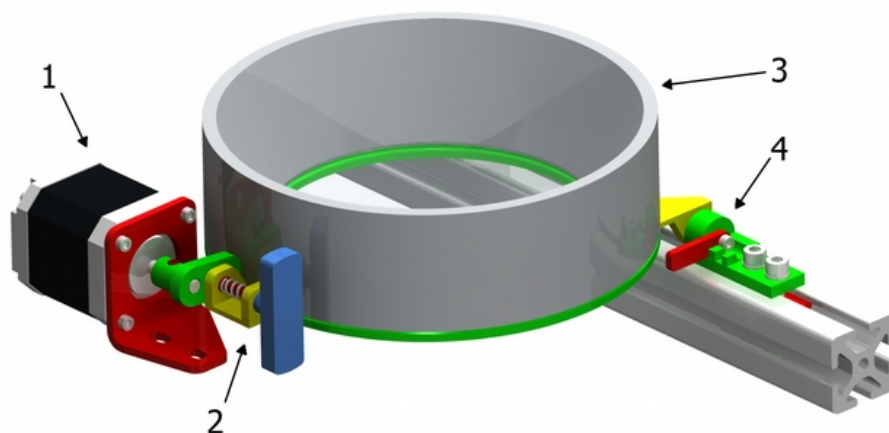
Jako základ kontaktního okna nádoby je zvolena skleněná tabulka. Sklo totiž při vystavení účinkům UV záření nedegraduje. Nejdůležitějším parametrem pro výběr skla je hodnota propustnosti UV záření. Ta musí být co největší. Z tohoto důvodu je možné vybírat mezi sklem křemenným nebo borosilikátovým. Pro aplikaci bylo vybrána dostupná válcová tabulka borosilikátového skla. BOROFLLOAT® borosilikátové sklo o tloušťce 8 mm má pro požadovaný rozsah vlnových délek propustnost cca 90 %. [43] Pro účely kontaktního okna nádoby postačí menší tloušťka skla s vyšší propustností UV záření. Rozměry použité skleněné tabulky činí $\varnothing 125 \times 5,2$ mm.

Jelikož má skleněná tabulka válcový tvar, je jako vstupní materiál pro nádobu volena kulatina z hliníkové slitiny o průměru 160 mm. Konstrukční návrh počítá se soustružením z obou čelních ploch. Z jedné strany pro usazení skleněné tabulky přes těsnící o-kroužek a z druhé pro samotný vnitřní tvar nádoby na fotopolymer. Tabulka skla je k nádobě přitažena kovovým protikusem pomocí šroubových spojů.

Pro první návrh tiskárny je zamýšleno používat nádobu se samotným sklem nebo s PDMS na skleněné tabuli. Pro zmenšení separačních sil při odlepování vrstev vytvrzeného materiálu je navrženo použít motoricky řízený systém pohybu nádoby. Systému s předepjatými pružinami nemůže být použito z důvodu vyšší váhy nádoby, protože by to vedlo ke vnášení rázů do rámu zařízení při návratu nádoby do výchozí polohy po odlepení vrstvy dílu.

Systémem, který pohybuje nádobou, může být např. naklápěcí mechanismus řízený rotačním elektromotorem, pomocí kterého se nádoba po vytvrzení vrstvy naklopí směrem dolů. V této práci je navrženo nádobu na jednom jejím konci uložit do pantů a na druhé straně v ní pomocí motoru vyvozovat sílu k překonání separačních sil. Za účelem zjednodušení řídicího programu bylo vyžadováno použití krokového motoru. Byl proto zvolen dostupný typ NEMA 17, který je instalován rovnoběžně s rotační osou pantů. Síla z rotačního výstupu motoru je transformována na nádobu skrze třecí čep, který je v horizontální rovině uchycen na nádobě. Čep pak vykonává posuvný pohyb

v drážce náboje motoru při otáčivém vratném pohybu motoru. Montáž nádoby na naklá-
pěcí mechanismus je realizována trojicí frézovaných dílů, které jsou přichyceny k tělesu
nádoby.



Obr. 9.2: 1. návrh – nádoba s naklápěcím mechanismem
1) krokový motor, 2) předepjatý čep nádoby s madlem, 3) nádoba,
4) pant s výsuvným čepem

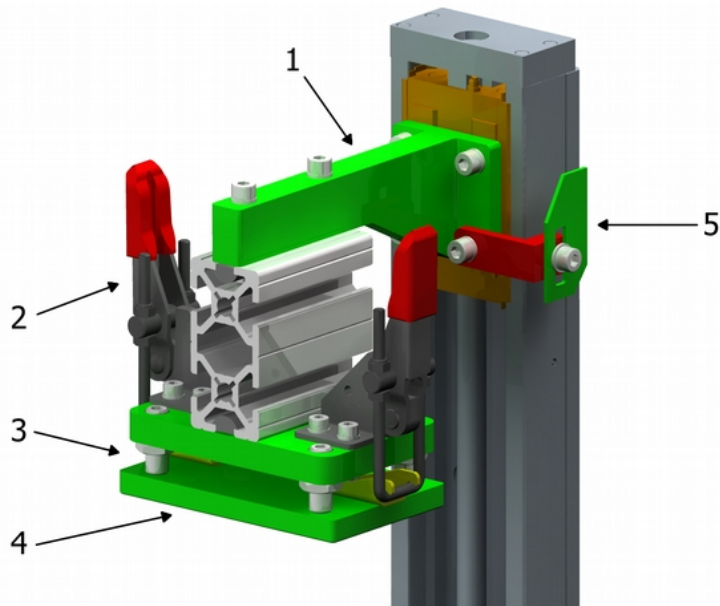
Rychlé montáže a demontáže nádoby z rámu tiskárny je dosaženo povytažením
čepu nádoby z náboje motoru na jedné straně a povytažením čepů pantů na straně druhé.
Čep nádoby i pantové čepy jsou zajištěny proti samovolnému vysunutí ze záběru.

9.1.2 Sestava platformy

Kalibrační systém platformy je v počáteční fázi řešení konstrukce tiskárny celý
převzat z návrhu provedeném v prvním roce SGS ([44], viz. 1.1). Stavební platforma
a konzola pro uchycení sestavy platformy na osu Z jsou z důvodu důrazu na kompaktní
rozměry navrhované tiskárny nově navrženy.

Systém pro kalibraci polohy stavební platformy je řešen pomocí kalibrační ob-
délníkové desky a čtyř stavěcích šroubů s hrotem. Ty je možné nezávisle na sobě vysou-
vat z rohů kalibrační desky. Šrouby s hroty dosedají do lůžek ve stavební platformě.
Stavební platforma je ke kalibrační desce přitažena dvojicí třmenových rychloupínačů.

Rozměry nové platformy jsou navrženy s ohledem na vnitřní průměr nádoby, to
činí 95 x 59,4 mm. Pracovní oblast platformy (v rovině xy) je proto volena jako 90 x
56,3 mm (poměr stran 16:10 dle poměru stran promítaného obrazu). Platforma je z dů-
vodu změny vnějších rozměrů uzpůsobena pro uchycení pomocí stávajících třmenových
rychloupínačů.



Obr. 9.3: 1. návrh – sestava platformy
 1) konzola, 2) třmenový rychloupínač, 3) kalibrační mechanismus,
 4) stavební platforma, 5) překážka pro optickou závoru

9.1.3 Umístění projektoru a rozlišení obrazu

Projektor je možné umístit pod nádobu do horizontální roviny s odrazem pomocí zrcátka. To by však mělo za následek nárůst rozměrů zařízení do strany. Vzhledem k velké délce osy Z je vhodnější umístění projektoru svisle pod nádobu.

XY rozlišení je při využití celé pracovní oblasti stavební platformy a plném rozlišení zobrazeného obrazu:

$$XY_{min} = \frac{W_{max}}{Q} = \frac{90 \cdot 10^3 \mu m}{1280} = 70,3 \mu m \quad (8)$$

Pro získání porovnatelné tabulkové hodnoty XY rozlišení je nutné tuto hodnotu zaokrouhlit na $XY_{min} = 70 \mu m$. Tomu pak odpovídá šířka promítaného obrazu:

$$XY_{min} = \frac{W_{max}}{Q} \Rightarrow W_{max} = XY_{min} \cdot Q = 70 \mu m \cdot 1280 = 89,6 mm \quad (9)$$

a výška promítaného obrazu:

$$H_{max} = W_{max} \cdot \frac{1}{R} = 89,6 mm \cdot \frac{10}{16} = 56 mm \quad (10)$$

DLP projektor má být, pro dosažení vypočteného rozměru pracovní oblasti, od horní plochy kontaktního okna umístěn maximálně do vzdálenosti dané hodnotou throw ratio:

$$T = \frac{C_{max}}{W_{max}} \Rightarrow C_{max} = T \cdot W_{max} = 1,1 \cdot 89,6 \text{ mm} = 98,56 \text{ mm} \quad , \quad (11)$$

kde C je vzdálenost od čočky projektoru po horní plochu kontaktního okna.

Zároveň je myšleno na možnost přiblížení projektoru ke kontaktnímu oknu nádoby s cílem zlepšení XY rozlišení při menším maximálním rozměru vyráběného dílu. Nejmenší ostrý obraz, který dokáže projektor zobrazit, má šířku $W_{min} \approx 70 \text{ mm}$. Tomu odpovídá rozlišení:

$$XY_{max} = \frac{W_{min}}{Q} = \frac{70 \cdot 10^3 \mu m}{1280} = 54,69 \mu m \quad . \quad (12)$$

Zaokrouhlením maximálního XY rozlišení $XY_{max} = 55 \mu m$ dostáváme hodnotu minimální šířky obrazu:

$$XY_{max} = \frac{W_{min}}{Q} \Rightarrow W_{min} = XY_{max} \cdot Q = 55 \mu m \cdot 1280 = 70,4 \text{ mm} \quad , \quad (13)$$

minimální výšky obrazu:

$$H_{min} = W_{min} \cdot \frac{1}{R} = 70,4 \text{ mm} \cdot \frac{10}{16} = 44 \text{ mm} \quad , \quad (14)$$

a vzdálenost projektoru od horní plochy kontaktního okna:

$$C_{min} = T \cdot W_{min} = 1,1 \cdot 70,4 \text{ mm} = 77,44 \text{ mm} \quad . \quad (15)$$

9.1.4 Rámová konstrukce

Rámová konstrukce zařízení je z důvodu jednoduché montáže a variability při dostavbách či přestavbách tiskárny navržena z extrudovaných hliníkových profilů. Protože není dopředu známé namáhání od pracovního procesu, jsou s ohledem na použití rozměrné pohybové jednotky osy z voleny těžší verze profilů 30x30 od společnosti Maytec. Svislé profily měří 640 mm, vodorovné profily po stranách měří 235 mm, a vodorovné profily vpředu a vzadu jsou dlouhé 186 mm. Profily jsou navzájem spojovány vnitřními spojovacími prvky. Svislé profily jsou doplněny stavitelnými nohami.

Profily rámu jsou spolu propojeny tak, aby umožňovaly nesení nádoby, osy Z a posuvného stolu projektoru. Pro možnost vyrovnání nádoby do horizontální roviny je jeden nosný profil nádoby upevňen ne mezi svislé profily, ale přímo na jejich stěny zevnitř rámu. To vyžaduje délkově odlišné profily: 290 mm pro profil na straně a 156 mm pro profil z přední strany.



Obr. 9.4: 1. návrh – rám zařízení

9.1.5 Posuvný stůl

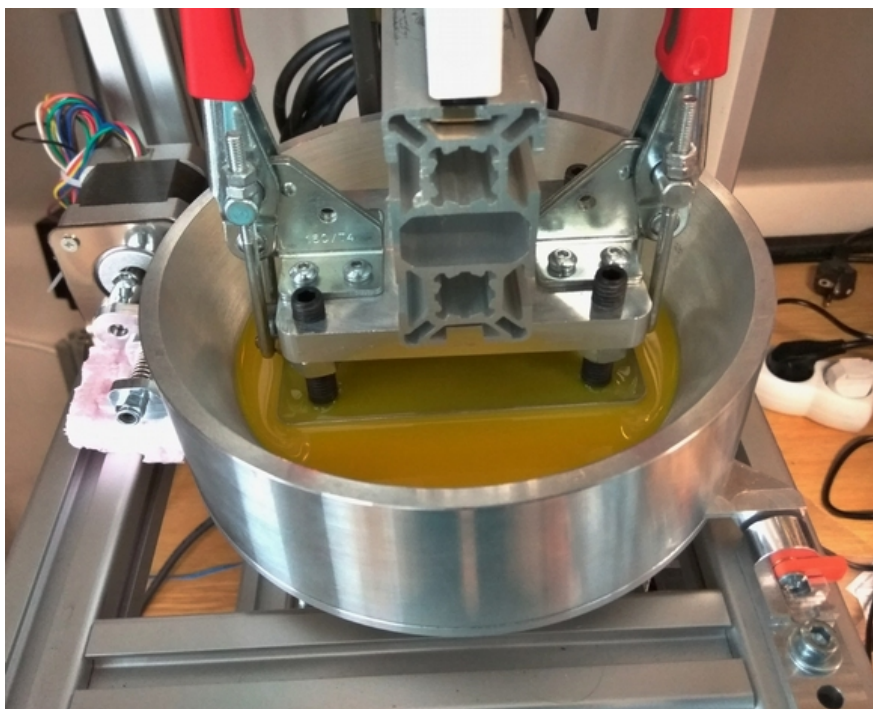
Posuvný stůl je uchycen v prostřední části rámové konstrukce. Jelikož projektor není symetrické konstrukce (optická osa přesně mezi montážními dírami), je stůl stranově vyosen. Na základě výpočtu vzdálenosti projektoru od kontaktního okna a s ohledem na nutnou konstrukční vůli je navržen posuvný stůl zkrátit. A to z 350 mm na hodnotu 130 mm.

9.1.6 Další prvky

Pro definici nulového bodu zařízení (osy Z) jsou saně osy Z doplněny o optickou překážku pro koncový optický snímač polohy. Snímač je upevněn na rámu v úrovni horní úvratí pohybové jednotky. Pro chlazení krokového motoru osy Z je použito dvou pasivních hliníkových chladičů a jednoho ventilátoru.

9.1.7 Realizace prvního konstrukčního návrhu

První konstrukční návrh 3D DLP tiskárny je realizován v plném rozsahu. Zařízení je rovněž oživeno, ačkoli některé elektronické komponenty (řídící mikropočítač, napájecí zdroje) nejsou zatím zabudovány do rámu tiskárny. Na tiskárně jsou vyráběny zkušební díly z fotopolymerů.



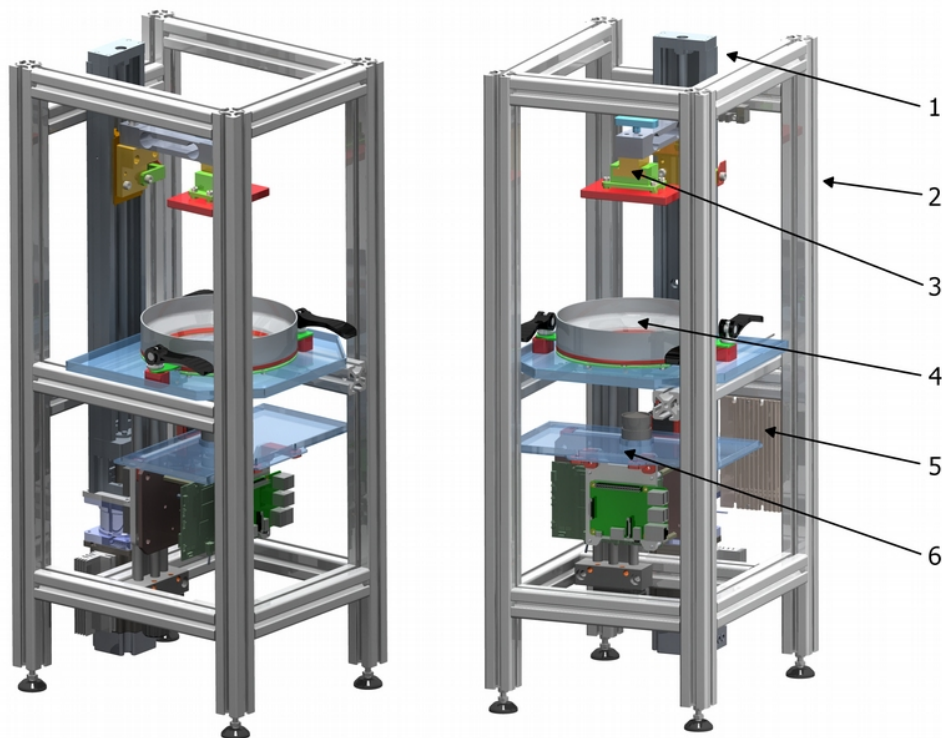
Obr. 9.5: 1. návrh – nádoba a sestava platformy během pracovní činnosti

9.2 Konstrukční práce 2

V druhé etapě konstrukčních prací je kladen důraz na zmenšení a zjednodušení konstrukce sestavy platformy. Původní návrh zabírá příliš mnoho prostoru v ose z. Operace kalibrace rovnoběžnosti s kontaktním oknem a čištění sestavy platformy od resinu byly příliš komplikované. Rovněž je kladen požadavek na aplikaci systému detekce chyb během tisku za pomoci tenzometrického snímače separačních sil.

Nádoba z prvního konstrukčního návrhu je upravena pro pevné uchycení na rám zařízení. Zároveň je navrhována nádoba nová, která by umožňovala upnutí FEP fólie s podepřením i bez podepření. Pro snížení zahřívání elektroniky projektoru od motoru osy Z a jednodušší zapojení či odpojení kabelů je navrženo pootočení projektoru o 180° kolem svislé osy. Současně dochází k integraci dalších elektronických prvků do prostoru tiskárny.

Je proveden návrh zakrytování prostoru pod nádobou pro eliminaci rizika poškození elektroniky při případném úniku fotopolymery z nádoby, ať už vlivem defektu v nádobě nebo neopatrnou manipulací s nádobou.



Obr. 9.6: 2. návrh – kompletní zařízení

1) pohybová jednotka osy z, 2) rámová konstrukce, 3) sestava platformy,
4) nádoba s krytem, 5) budič motoru, 6) sestava projektoru

9.2.1 Sestava platformy

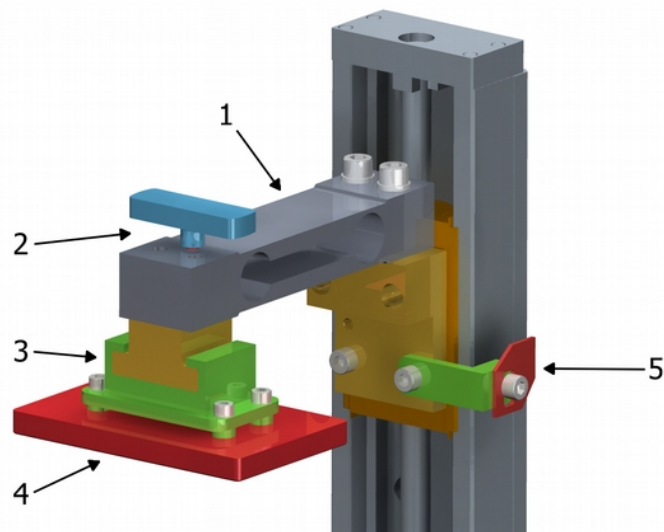
V tomto návrhu je opuštěno od kalibrace rovnoběžnosti na sestavě platformy. Kalibrace vodorovnosti a rovnoběžnosti mezi platformou a kontaktním oknem je prováděna pomocí stavitelných nohou na rámu a kalibračního systému nádoby.

Jako konzoly spojující stůl osy Z a stavební platformu je použito tenzometrického snímače. Snímač TAL201 s tělem z hliníkové slitiny je vyráběn v mnoha variantách lišících se maximální zatížitelností. [45] Pro připojení tenzometru ke stolu osy Z je použito frézovaného bloku z hliníkové slitiny.

Jelikož je stavební platforma demontována po každém skončeném tisku, je důležité zajistit jednoduchou obsluhu. Zároveň je však nutné vymezit vůle v tomto rozebíratelném spojení, aby vlivem separačních sil nedocházelo k nepřesnostem nebo chybám při tisku.

Spojení tenzometrického snímače a stavební platformy je vyřešeno pomocí dvou do sebe zapadajících tvarových kusů, kde jeden je přichycen na snímač a druhý k platformě. Vůli je nutné vymezovat především v ose z, proto je zde využito čepu s tlačnou pružinou, který dosedá na tvarový kus uchycený na platformě. Uvolnění

stavební platformy ze sestavy se děje překonáním síly tlačné pružiny pomocí madla nad snímačem. Řešení vyžaduje provrtání otvoru skrze snímač.

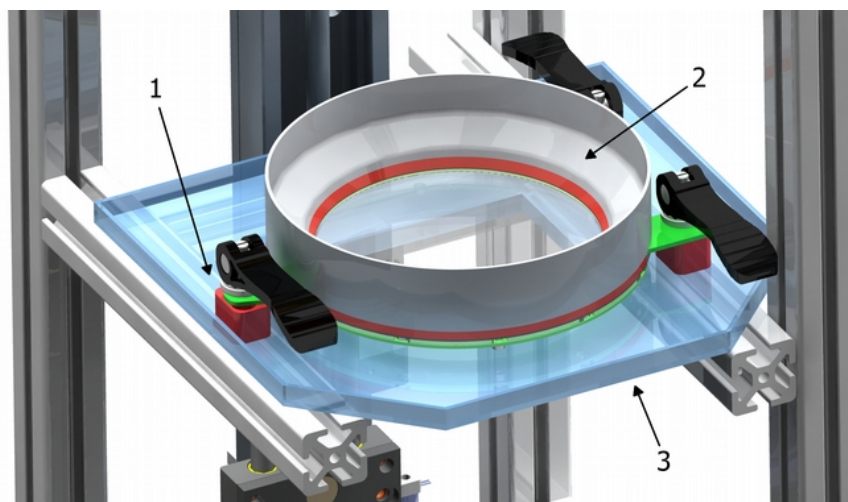


Obr. 9.7: 2. návrh – sestava platformy

1) tenzometrický snímač, 2) předepjatý čep s madlem, 3) tvarové spojení platformy, 4) stavební platforma, 5) překážka pro optickou závoru

9.2.2 Nádoba s uchycením

Naklápěcí mechanismus nádoby není při pracovní činnosti tiskárny využíván, proto je vhodné navrhnout pevné uchycení na rám pro bezvúlové uložení nádoby. To je vyřešeno trojicí podložek pevně uchycených k rámu zařízení. Nádoba se k podložkám upíná pomocí plechových dílů, které nahrazují frézované držáky v původním řešení. Rychlá rozebiratelnost spojení je zaručena použitím excentrických rychloupínek.



Obr. 9.8: 2. návrh – nádoba s krytem

1) pevné uchycení nádoby, 2) upravená nádoba, 3) kryt vnitřního prostoru

Zároveň je navrhována nová nádoba ze stejného polotovaru jako nádoba současná. Mezi důvody pro návrh nové nádoby je možné zařadit požadavek pro uchycení FEP fólie bez skleněné tabulky či celkové odlehčení nádoby vedoucí ke zvětšení vnitřního objemu nádoby při nižší celkové výšce. Nádoba je složena ze tří hlavních částí. Mezi dvě spodní mezikruhové desky se upíná FEP fólie. Spolu s fólií je možné mezi desky pod fólii upnout i podpěrné plexisklo, které brání prohýbání fólie. Takovýto rámeček s FEP fólií se montuje k samotnému tělesu nádoby, ke kterému jsou opět uchyceny plechové díly zajišťující montáž nádoby k podložkám na rámu.

9.2.3 Integrace elektronických komponent

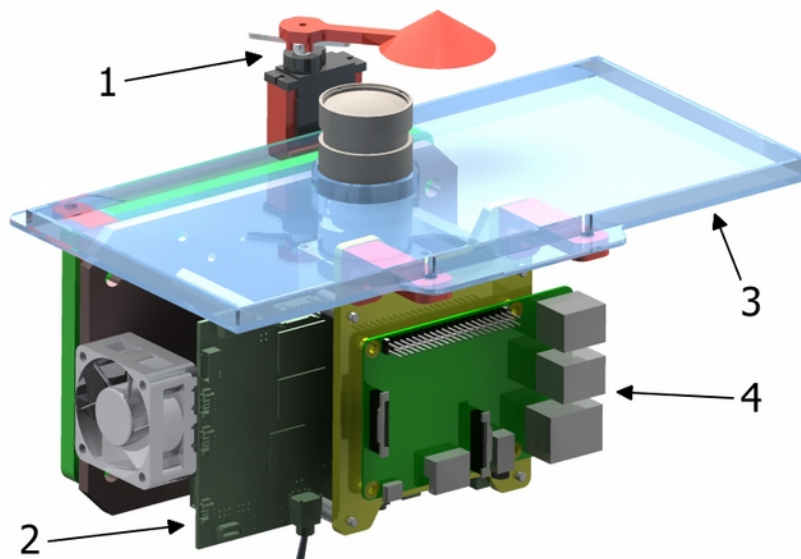
Jelikož projektor mírně propouští světlo i během nečinnosti, je na desku držící projektor na posuvném stole přichycen mikro servomotor MG90S s kovovými převody, který otáčí stínící klapkou. Tím je zabráněno vytvrzení fotopolymeru mezi expozicemi.

Mikropočítač Raspberry PI 3 je v návrhu přichycen k projektoru paralelně s jeho řídicí deskou, což umožní zkrátit kabely mezi mikropočítačem a projektorem. Pro spojení snímače s mikropočítačem Raspberry PI 3 je použito čtyřvstupového modulu PhidgetBridge. Zároveň dochází k zástavbě budiče osy Z do rámu zařízení.

9.2.4 Krytování vnitřního prostoru

Pro ochranu elektronických prvků před účinky fotopolymeru, který by mohl vytéct z nádoby, je navrženo systému dvou krytů z plexiskla. První z nich, který se montuje mezi rám a podložky nádoby, pokrývá většinu pracovního prostoru pod nádobou. V jeho prostředku je obdélníkový otvor, kterým prochází záření z projektoru. Otvor je navrženo překrýt tabulkou křemenného nebo borosilikátového skla, případně tabulkou transparentního plexiskla. Tabulka je ke krycímu plexisklu přilepena, stejně jako okraje plexiskla, aby kryt fungoval jako nepropustná vana zadržující fotopolymer.

Druhý kryt z plexiskla funguje jako druhý stupeň ochrany při poruše prvního krytu. Kryt je situován nad projektor, přičemž skrz něj je prostrčen objektiv projektoru. V případě změny polohy projektoru vůči nádobě je kryt přesouván spolu s projektorem.



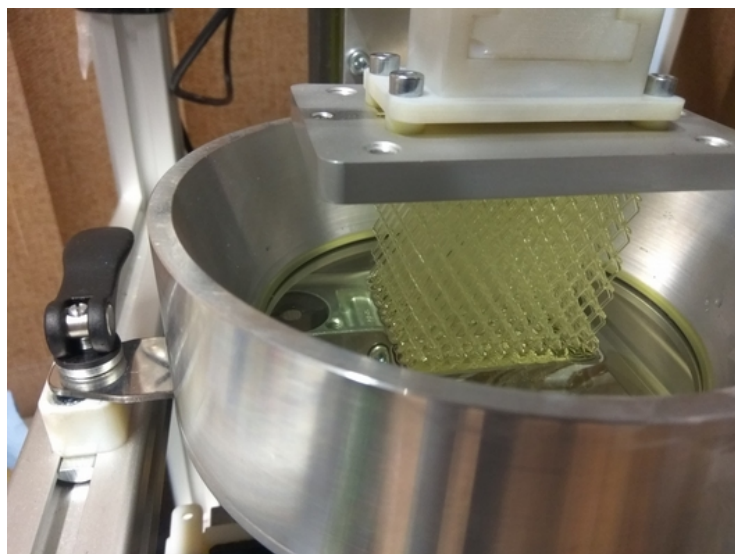
Obr. 9.9: 2. návrh – sestava projektoru

1) servomotor s klapkou, 2) DLP projektor, 3) kryt elektroniky,
4) mikropočítač Raspberry PI 3

9.2.5 Realizace druhého konstrukčního návrhu

Návrhy na novou sestavu platformy a integraci elektronických prvků jsou realizovány. Nová sestava platformy díky nižší hmotnosti snižuje zatížení osy Z a vzhledem ke své nízké výšce umožňuje využít většího zdvihu pohybové jednotky osy z.

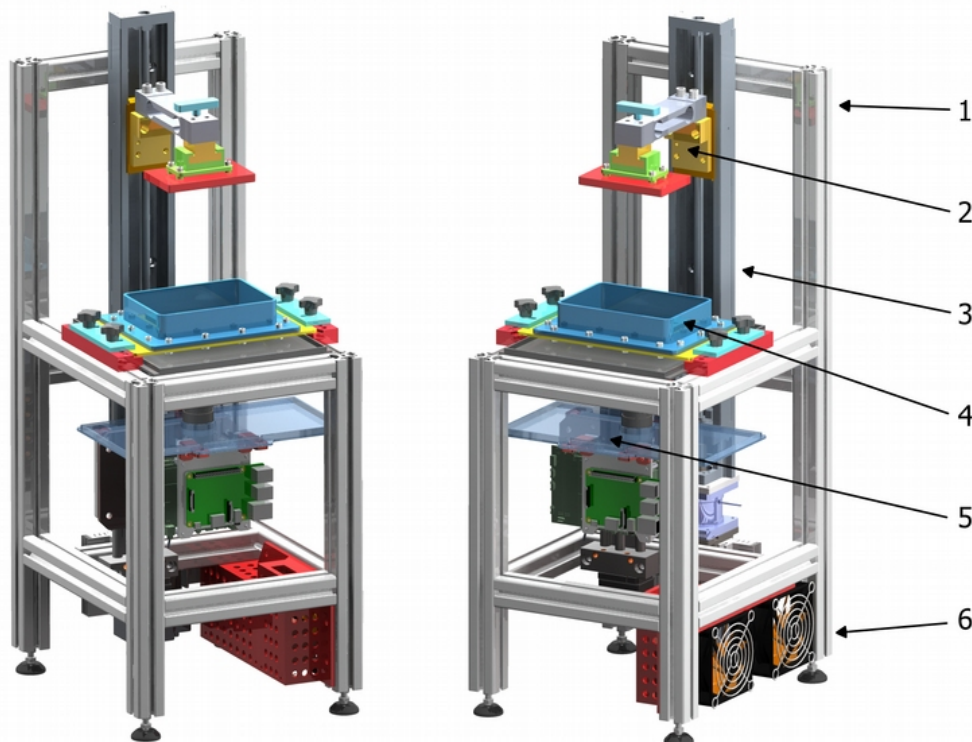
U stávající nádoby je provedena změna uchycení z pohyblivého na pevné. Vnitřní kryty zařízení ani nová nádoba nejsou vyrobeny. U nádoby ještě není dořešen systém pro napínání fólie bez použití podepírajícího plexiskla.



Obr. 9.10: 2. návrh – výroba dílu s novou sestavou platformy

9.3 Konstrukční práce 3

Operace vyjímání a instalace nádoby do rámu tiskárny jsou značně neergonomické. Tato činnost vyžaduje koordinovanou spolupráci obou rukou uživatele, nádobu je třeba během manipulace v rámu tiskárny pootáčet. S hmotností nezaplňené nádoby cca 1 200 g se tak nejedná o příjemnou činnost. Proto je navržena úprava rámové konstrukce, která má vliv i na systém kalibrace nádoby.



Obr. 9.11: 3. návrh – kompletní zařízení

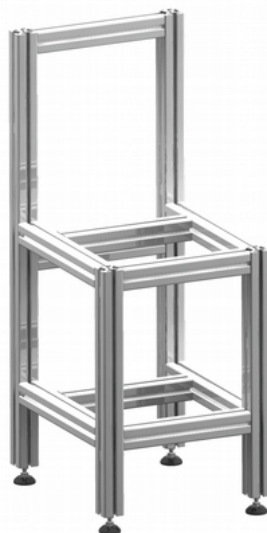
1) rámová konstrukce, 2) sestava platformy, 3) pohybová jednotka osy z, 4) nádoba s kalibrací polohy a krytem, 5) sestava projektoru, 6) chlazený box s napájecími zdroji

Z důvodu komplikovanosti řešení napínání fólie u návrhu válcové nádoby je přikročeno k návrhu nové nádoby standardního obdélníkového tvaru. Nádoba by měla lépe využít prostor v tiskárně a její upínání a demontování by mělo být jednoduché a rychlé.

S tím, jak zařízení již pracuje a tiskne díly, je vyžadována další integrace elektronických částí do rámu tiskárny. V tomto kroku je proveden první nástin montáže obou napájecích zdrojů do rámu tiskárny.

9.3.1 Rámová konstrukce

Je navrženo odebrat horní části předním svislých profilů. Ty totiž zasahují nad pracovní plochu tiskárny do oblasti, ve které uživatel zařízení manipuluje s nádobou. S tím souvisí i odebrání vodorovných profilů, které svislé profily v horní části zařízení propojují.



Obr. 9.12: 3. návrh – rám zařízení

Profil o délce 290 mm, který se u stávající rámové konstrukce stará o kalibraci polohy nádoby je nahrazen profilem s délkou 235 mm, který je umístěn mezi svislými profily stejně jako profil na druhé straně rámové konstrukce. Rám je nyní podle roviny yz symetrický.

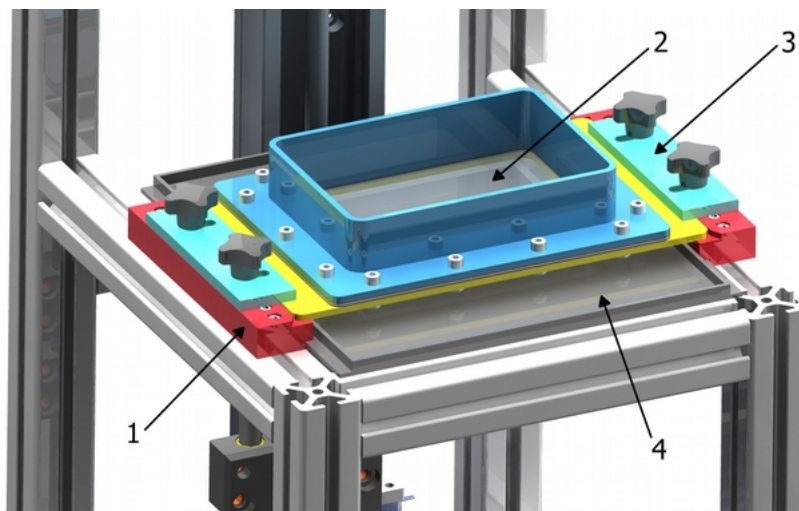
9.3.2 Nádoba s uchycením

Nová nádoba je navrhována s ohledem na co nejjednodušší výrobu na strojním zařízení FS TUL. Vzhledem k relativně velkým rozměrům nádoby by výroba byla problematická na současném strojním parku obráběcích strojů a docházelo by k neekonomickému úběru materiálu. Nádoba je tedy navržena z dílů z nerezových plechových dílců, které se řežou na laserovém stroji a ohýbají na ohraňovacím lisu.

Nádoba je složena ze dvou částí, mezi které se přes ploché těsnění upíná FEP fólie. Části jsou k sobě přitaženy sadou šroubových spojů. Spodní část je tvořena silným plechem, přes který se nádoba upíná do tiskárny. Horní část je plechový svařenec složený ze spodní plechové desky, ke které se navařuje plech tvořící stěnu nádoby. Tato stěna je výpalek, který je ohnut na ohraňovacím lisu. Alternativou je výroba stěny nádo-

by z ocelové bezešvé trubky dle ČSN 42 5720, která je na konečný rozměr doobrobena a poté svařena se spodním plechovým dílcem.

V tomto návrhu je kladen důraz na nový kalibrační systém nádoby a napínání FEP fólie. Obojí je možné zajistit novým držákem nádoby. Tento držák je po vzoru nové nádoby navrhován s ohledem na jednodušší a rychlejší výrobu. Proto je zde využito operací řezání a vrtání plechu, řezání a lepení plexiskla a 3D tisk plastu.

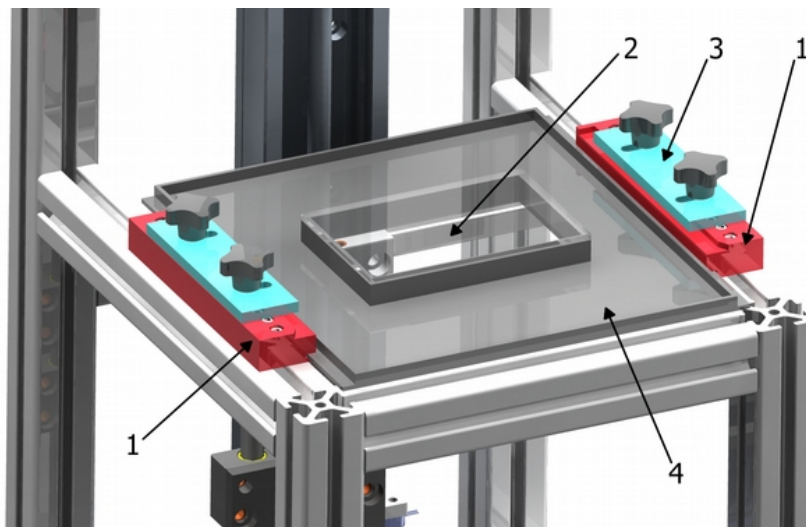


Obr. 9.13: 3. návrh – upnutá nádoba
1) kalibrační blok, 2) složená nádoba s FEP fólií, 3) deska pro upnutí nádoby, 4) kryt vnitřního prostoru

Hlavní částí držáku nádoby je kalibrační blok, který se po jednom kuse nachází na levé i pravé straně v pracovní části rámové konstrukce. Kalibrační blok má za úkol umožnit uživateli tiskárny přesnou kalibraci polohy nádoby za pomoci dvojice šroubů na každé straně kalibračního bloku. Jeden šroub je stavěcí, který se stará o odtahování bloku od rámu a druhý, který se vlivem spojení s profilovou maticí naopak stará o přitahování bloku k rámu. To má za následek tuhé spojení kalibračního bloku s rámovou konstrukcí a poměrně jednoduchou kalibraci rovnoběžnosti se stavební platformou.

Kalibrační blok je materiálově složen ze dvou částí: hlavní plastové části a vyztužující plechové desky, která napříč pracovním prostorem tiskárny propojuje levý blok s blokem pravým. V plastové části jsou zalisovány matice pro stavěcí šrouby a dotahovací křídlové matice, které slouží k přitahování nádoby na držák. Nad plechovou deskou je v blocích usazena i vana z plexiskla překrývající většinu pracovního prostoru tiskárny. Jedná se o slepovaný díl, který ve svém středu na vyvýšené pozici disponuje transparentním plexi či tabulkou skla, které se stará o podepření a napínání fólie s předem daným přesahem. S nádobou je při montáži a demontáži na držák manipulováno

ve svislém směru. Nádoba je upnuta pomocí dvou posuvných plastových desek a čtveřice křídlových šroubů.



Obr. 9.14: 3. návrh – držák nádoby

1) kalibrační blok, 2) tabulka skla/plexiskla pro napínání FEP fólie, 3) deska pro upnutí nádoby, 4) kryt vnitřního prostoru

9.3.3 Integrace elektronických komponent

Oba napájecí zdroje je plánováno umístit do zvláštního plastového boxu, který je oddělí od zbytku vnitřního prostoru tiskárny. Napájecí zdroje jsou do boxu vkládány bez plechových krytů, jako kryt zdrojů slouží právě plastový box a budoucí vnější kryty tiskárny. Box je po celé své ploše opatřen otvory. Osazením odtahových ventilátorů mezi zdroje a budoucí vnější kryt tiskárny je dosaženo odvodu tepla od zdrojů. Plastový box je konstruován pro výrobu na 3D tiskárně.

9.3.4 Realizace konstrukčního návrhu

Úprava rámové konstrukce je plánována. Její přínos je z pohledu ergonomie značný. V případě problémů s tuhostí rámové konstrukce je možné rám doplnit kovovými úhelníky.

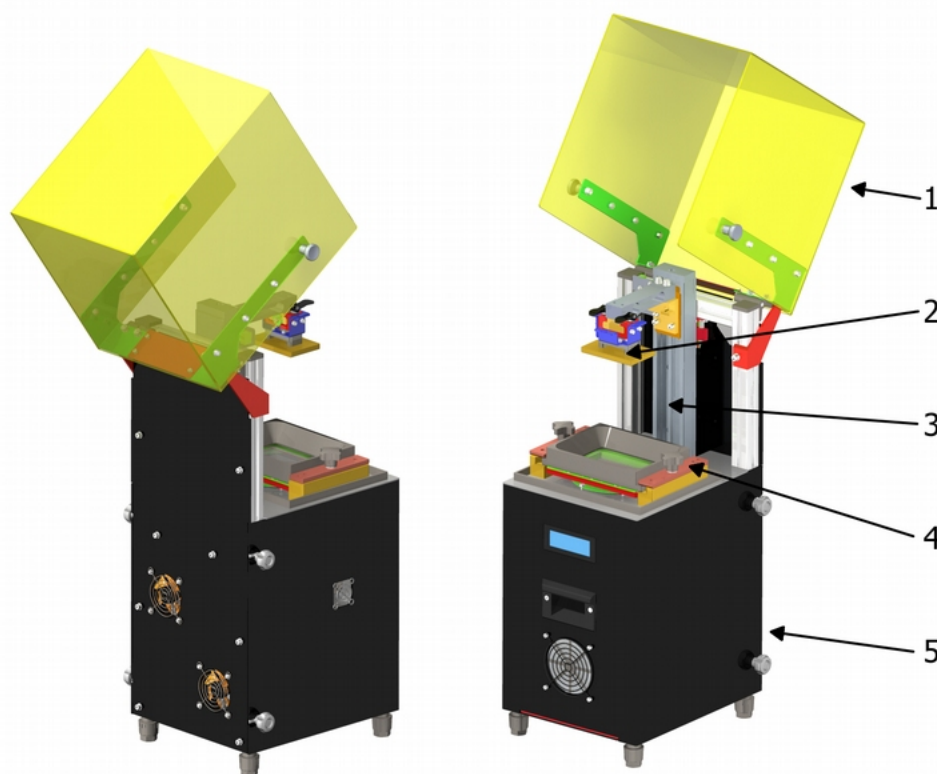
Bylo rozhodnuto, že nádoba s kalibračním držákem a napínáním FEP fólie nebude vyráběna. Důvody jsou shrnuty v následující kapitole. Z důvodu značné spotřeby podpůrného materiálu pro stavbu plastového boxu pro napájecí zdroje a tím pádem vysoké výrobní ceny je také odstoupeno od výroby boxu. U plastového výtisku je nutné počítat s omezenou životností dílu vlivem tepelného zatížení od napájecích zdrojů a UV záření, což je z hlediska funkce boxu nepřijatelné.

9.4 Konstrukční návrh 4

V pořadí čtvrtá etapa konstrukčních prací na tiskárně je v rámci této práce i etapou poslední. K dokončení 3D DLP tiskárny je potřeba navrhnout kryt celého zařízení z materiálu absorbujícího UV záření, završit integraci všech elektronických komponent do rámu zařízení a dořešit systém jejich chlazení. Současně je však potřeba optimalizovat nebo předělat některé prvky, které byly navrženy v předešlých úsecích konstrukční práce, ale u kterých byly zjištěny nějaké nedotaženosti.

Aby elektronické součástky nebo plastové dílce uvnitř tiskárny nedegradovaly vlivem UV záření, je navržena komora oddělující oblast projekce obrazu (od objektivu po kryt pracovního prostoru) od zbytku vnitřní části zařízení.

Na základě vyhodnocení funkčnosti plastového boxu napájecích zdrojů je navrhován nový systém uchycení napájecích zdrojů. Zároveň dochází k poslední fázi integrace elektronických komponent do vnitřního prostoru tiskárny a přemístění mikropočítače dál od projektoru pro snížení vzájemného tepelného ovlivňování.



Obr. 9.15: 4. návrh – kompletní zařízení
1) výklopný horní kryt, 2) sestava platformy, 3) pohybová jednotka osy z,
4) kryt pracovního prostoru s nádobou, 5) spodní kryt zakrývající vnitřní část
zařízení s elektronikou

System platformy je poupraven pro zlepšení ergonomie při manipulaci. Současně je změněn způsob vymezení vůle mezi tvarovými díly pro zamezení nutnosti vrtání otvoru do tělesa tenzometrického snímače. Je také navrženo několik variant stavební platformy lišících se tvarovou úpravou pracovní plochy. Během pracovní činnosti na zařízení bylo zjištěno, že kalibrace rovnoběžnosti pracovních ploch skrze nádobu je nepraktická v porovnání s konkrétním způsobem kalibrace stavební platformy. Tato kalibrace funguje na principu uvolnění stavební platformy ze sestavy platformy a její přitlačení na kontaktní okno nádoby s opětovnou fixací na konzolu platformy. Proto v tomto návrhu dochází k přesunutí kalibrace rovnoběžnosti mezi pracovní plochou stavební platformy a kontaktním oknem nádoby na sestavu platformy.

Kalibračních bloků držáku nádoby již není nadále potřeba. A jelikož vana z plexiskla s napínáním FEP fólie plně neodděluje pracovní prostor od vnitřního prostoru tiskárny, je přistoupeno k návrhu nového krytu pracovního prostoru s pevnými držáky pro upnutí nádoby. Oddělení těchto prostorů je nutné pro zamezení prosvítání UV záření z prostoru projektoru a snížení prašnosti uvnitř tiskárny.

Protože je 3D DLP tiskárna navrhována jako versatilní zařízení pro laboratorní výzkum, je nutné umožnit uživateli použít odlišné resiny a tiskové parametry. Toho může být dosaženo optimálními vlastnostmi kontaktního okna nádoby. Jediná konfigurace (materiálové složení) kontaktního okna však toto zaručí jen stěží. Proto byla navrhována nádoba, která umožní záměnu odlišných kontaktních oken podle požadovaných vlastností.

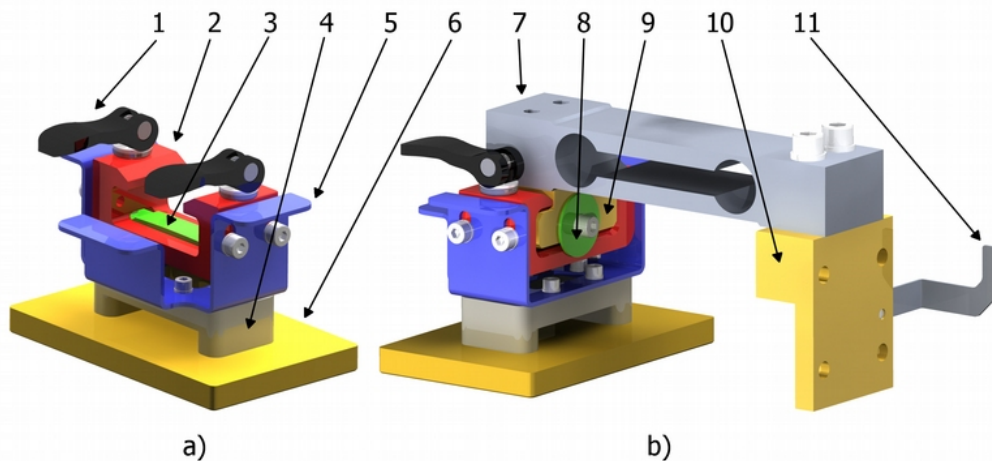
Optimalizace se týká i návrhu upravené rámové konstrukce, kterou je vhodné opatřit kovovými úhelníky pro dosažení přesného sestavení rámové konstrukce pro zaručení správných vazeb mezi osou Z, stavební platformou a kontaktním oknem nádoby.

9.4.1 Sestava platformy

Nová sestava platformy vychází z předešlého řešení. Tzn., že jsou stále použity dva do sebe zapadající frézované tvarové díly. Jeden je upnutý na tenzometrický snímač, druhý však už není přichycen přímo na stavební platformu, ale je k němu pomocí čtyř šroubů přitážen ohnutý plech. K plechu je přes distanční vložku uchycena stavební platforma. Distanční vložka je použita proto, aby při ponoření platformy do naplněné nádoby nedocházelo ke kontaktu fotopolymery s funkčními tvarovými díly a šroubovými spoji.

Platformu je, při povolení šroubů držících ohnutý plech, možné přitlačit na kontaktní okno nádoby a tím zkalibrovat rovnoběžnost mezi prvky. Použití ohnutého plechu má své opodstatnění. Vlivem ohnutí plechu na několika místech vznikají plochy, za které je možné sestavu platformy uchopit nebo ji opřít.

Pro zamezení nutnosti vrtat otvor pro čep vymezující vůli do tělesa tenzometrického snímače je navrženo nové neinvazivní řešení. Tím je použití přitlačného hranolu. Tento hranol je po sestavení platformy přitlačován na spodní rovinnou část horního tvarového dílu. Jelikož je tento přitlak vyvozen skrze spodní tvarový díl, který je zavěšen na horním tvarovém dílu, dochází tak k sevření horního tvarového dílu a tím k vymezování vůle mezi díly. K vyvození tohoto přitlaku slouží dva excentrické rychloupínáky, které zajišťují rychlé utažení i povolení. Při plném otevření rychloupínáků dokonce vzniká značná vůle mezi díly umožňující bezproblémovou montáž.

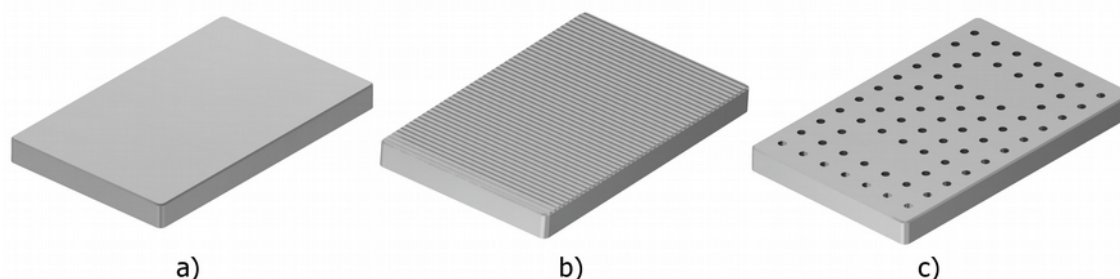


Obr. 9.16: 4. návrh – a) část sestavy platformy, b) sestava platformy s konzolou
 1) excentrická rychloupínka, 2) tvarová objímka, 3) přitlačný hranol,
 4) distanční vložka, 5) kalibrační plech, 6) stavební platforma, 7) tenzometrický snímač, 8) montážní doraz, 9) tvarový držák, 10) držák konzoly,
 11) překážka pro optickou závoru

Přitlačný hranol není ve skutečnosti hranol, jelikož jeho horní styková plocha není rovinná ale válcová s velkým rádiusem. Důvodem pro toto řešení je dosažení optimálního styku mezi díly. Použitím dvou rychloupínáků totiž nelze dosáhnout plošného styku mezi díly. Snahou proto je docílení čárového styku s rovnoměrným rozložením tlaku v povrchových vrstvách dílů.

Stavební platforma je navržena s třemi tvarově odlišnými pracovními plochami. První varianta má pracovní plochu hladkou, druhá obsahuje drobné drážky ve směru osy y a třetí je po celé ploše opatřena maticí malých svislých otvorů. Platforma s dráž-

kami má sloužit pro vícebodové přilepení první vrstvy. Platforma s dírami je spíše určena pro visocevizkózní resiny. Takovýto špatně tekoucí resin má problémy s přemisťováním během pohybu platformy. Díry po celé ploše stavební platformy tak dokáží resin propustit a tím zrychlit tisk a snížit tlak mezi platformou a kontaktním oknem nádoby.



Obr. 9.17: 4. návrh – varianty stavební platformy

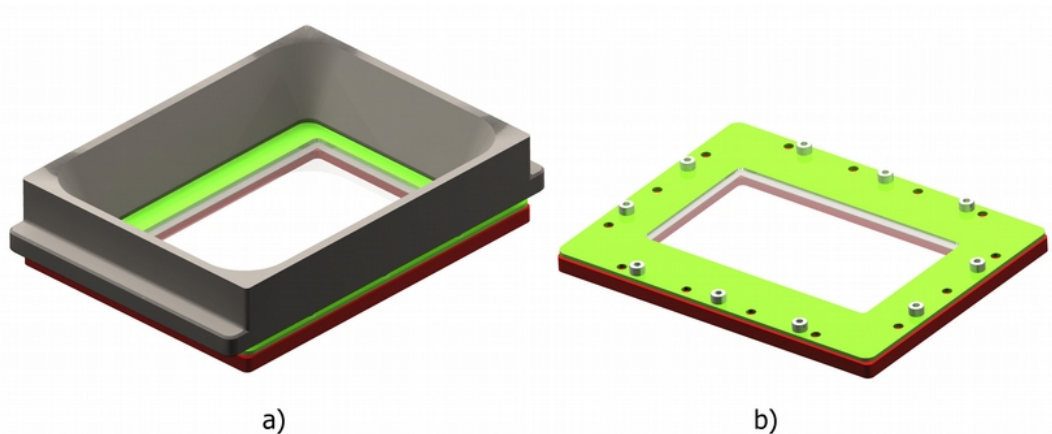
a) hladká plocha, b) drážkovaná plocha, c) plocha s maticí otvorů

Odnímatelnou část sestavy platformy je plánováno spolu s vytištěnými díly používat v myčce naplněné izopropylalkoholem. Všechny díly platformy tedy musí být chemicky odolné vůči této kapalině.

9.4.2 Nádoba s uchycením

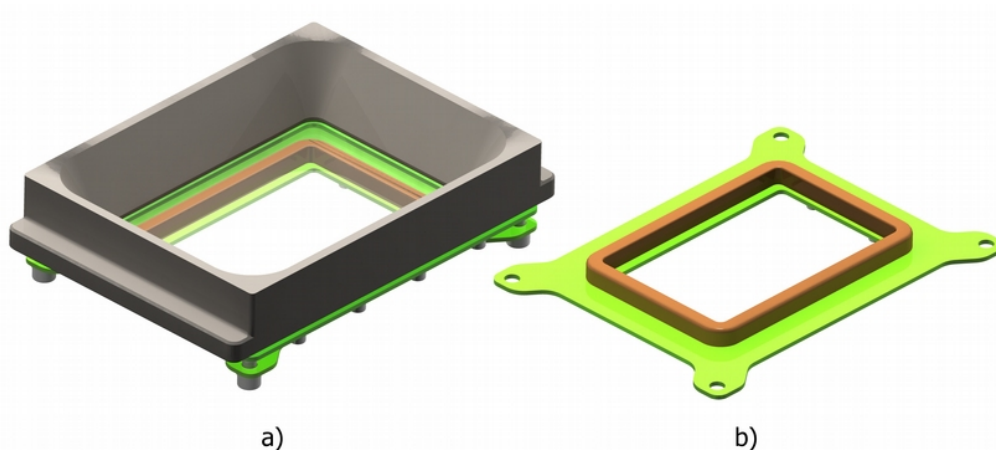
Pro dosažení nižších výrobních nákladů je nová nádoba navržena tak, že horní těleso tvořící stěny nádoby je vyhotoveno v jediném konstrukčním provedení. Zaměnitelnost odlišných kontaktních oken je dosažena dvěma vyměnitelnými spodními částmi nádoby. Stěna nádoby je, oproti předchozímu návrhu, navržena pro výrobu frézováním z hliníkové slitiny. Důvodem pro tuto změnu je potřeba většího množství závitových otvorů pro montáž vyměnitelných spodních částí. Zároveň je možné dosáhnout výrazně vyšší tuhosti nádoby, aniž by hrozilo zkroucení konstrukce vlivem svařování materiálů.

Spodní část nádoby tvořící kontaktní okno složené z tabulky křemenného skla a PDMS je složeno z frézované vaničky a přitlačné plechové desky. Do vaničky se přes plochá těsnění vkládá tabulka skla. To se poté k vaničce přitlačí plechovou deskou. Plechová deska není v prostoru kontaktního okna vyplněna. Do tohoto prostoru je plánováno nalévat směs sloužící k tvorbě PDMS. Tato sestava je přes ploché těsnění připojena k hornímu tělesu nádoby. Zároveň je možné mezi horní těleso nádoby a spodní sestavu kontaktního okna vložit FEP fólii, která tak bude po celé ploše přilepena k PDMS.



Obr. 9.18: 4. návrh – nádoba s tabulkou skla a PDMS
 a) sestavená nádoba, b) sestavená vanička s tabulkou skla a PDMS

Druhou variantou kontaktního okna je systém s napínáním FEP fólie. FEP fólie je upnuta k hornímu tělesu nádoby přes ploché těsnění pomocí plechové desky. Upnutá fólie je napínána za pomoci frézovaného rámečku, který je uchycen na plechové desce. Tato deska je k hornímu tělesu nádoby přitahována čtveřicí šroubů, které umožňují variabilní napnutí fólie. Je tedy možné používat fólie o různých tloušťkách.

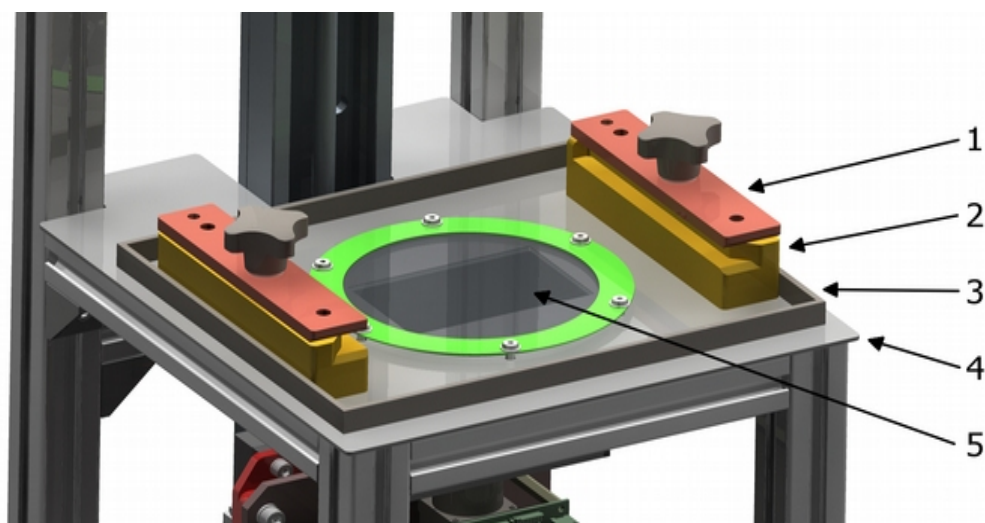


Obr. 9.19: 4. návrh – nádoba s napínáním fólie
 a) sestavená nádoba, b) napínací rámeček nádoby

Nádoba je k tiskárně fixována přes dva hliníkové bloky, které jsou připevněny na krytu pracovního prostoru (viz. 9.4.3). K hliníkovému bloku je přes křídlový šroub připevněna přítlačná deska. Nádoba se z přední strany tiskárny vsouvá do mezery mezi blokem s deskou a fixuje se dotažením křídlových šroubů.

9.4.3 Kryt pracovního prostoru

Aby bylo dosaženo plného překrytí vnitřního prostoru tiskárny a tím oddělení tohoto prostoru od pracovního prostoru, je navržen kryt z nerezové oceli, v jehož středu, kde svítí projektor, je usazena tabulka skla. Pro aplikaci je vybrána na KSA dostupná válcová tabulka borosilikátového skla. Sklo utěsňuje prostor a přitom propouští UV záření. Vzhledem k požadavku na odnímatelnost skleněné tabulky, kvůli čištění od prachu, je tabulka skla přitlačována na kryt za pomoci plechové mezikruhové desky a sady šroubových spojů. Matice šroubových spojů jsou k desce krytu zesponu přivařeny.



Obr. 9.20: 4. návrh – kryt pracovního prostoru

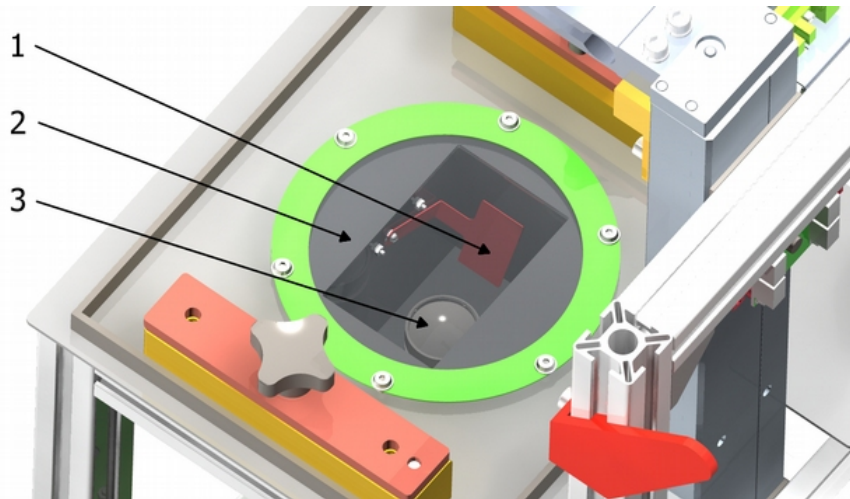
1) přitlačná deska pro upnutí nádoby, 2) podpěrný blok nádoby, 3) záchytná vana krytu, 4) deska krytu, 5) tabulka borosilikátového skla

K vodorovným hliníkovým profilům, na kterých plechový kryt leží, jsou přes kryt přimontovány hliníkové bloky sloužící k upnutí nádoby. Kolem hliníkových bloků a skleněné tabulky je ke krytu přilepena čtveřice latí z plexiskla, které dohromady tvoří vaničku. Ta je určena k odchytu fotopolymeru, který by mohl uniknout z poškozené nádoby při tisku, při neopatrné manipulaci s nádobou, nebo během jeho doplňování do nádoby.

9.4.4 Umístění a krytování projektoru

UV záření u některých materiálů způsobuje jejich degradaci. Pro zamezení negativního vlivu UV záření především na elektronické komponenty je přistoupeno k návrhu tzv. optické komory. Ta je koncipována jako neprůhledná komora, která je na své vrchní straně uchycena ke krytu pracovního prostoru. Z druhé strany do ní vstupuje objektiv

projektoru. Klapka překrývající objektiv mezi expozicemi je zde nahrazena jinou klapkou, která se nachází přímo v optické komoře. Polohování klapky je zajištěno použitím totožného servomotoru. Systém naklápění klapky je navrhován s ohledem na co nejkratší čas natáčení a limitující rozměry komory. Z toho důvodu se osa hřídele servomotoru nachází vodorovně a v optické ose projektoru, aby klapka byla natáčena v co nejmenším úhlu (cca 65°).



Obr. 9.21: 4. návrh – komora projektoru
 1) klapka v průchozí poloze, 2) tabulka borosilikátového skla,
 3) objektiv DLP projektoru

Klapka musí zajišťovat překrytí promítaného obrazu objektivem v celém rozsahu posuvu projektoru. Tento rozsah je dán rozdílem limitních vzdáleností projektoru od kontaktního okna:

$$E_t = C_{max} - C_{min} = 89,6 \text{ mm} - 77,44 \text{ mm} = 21,12 \text{ mm} \quad . \quad (16)$$

Vzhledem k napínání FEP fólie v nádobě je nutné počítat i s přesahem, o který se projektor musí blíže přisunout k nádobě. Ten je volen jako $e = 3 \text{ mm}$. Skutečný rozsah posuvu projektoru pak činí:

$$E_s = E_t + e = 21,12 \text{ mm} + 3 \text{ mm} = 24,12 \text{ mm} \quad . \quad (17)$$

Pro horní úvrať zvětšenou o přesah daný napínáním fólie je volena vůle mezi výstupní čočkou objektivu projektoru a spodní plochou klapky v pracovní poloze $c_{min} = 7 \text{ mm}$.

Maximální vůle mezi objektivem a klapkou pak může činit:

$$c_{max} = c_{min} + E_s = 7 \text{ mm} + 24,12 \text{ mm} = 31,12 \text{ mm} \quad . \quad (18)$$

Klapka pro zakrytí obrazu v této vzdálenosti musí být široká alespoň:

$$W_k = \frac{c_{max}}{T} = \frac{31,12 \text{ mm}}{1,1} = 28,29 \text{ mm} \quad , \quad (19)$$

a hluboká alespoň:

$$H_k = W_k \cdot \frac{1}{R} = 28,29 \text{ mm} \cdot \frac{10}{16} = 17,68 \text{ mm} \quad . \quad (20)$$

Umístění projektoru vychází z předešlých řešení (viz. 9.1.3 a 9.2), z čehož plyne, že projektor je možné skrze posuvný stůl posunovat do polohy odpovídající požadovanému XY rozlišení resp. velikosti vyráběného dílu. Tomu musí být uzpůsobena i optická komora s klapkou, aby bylo zajištěno pohlcování záření komorou a překryv objektivu klapkou v jakékoliv poloze projektoru.

9.4.5 Rámová konstrukce

Rám tiskárny z hliníkových profilů je navrženo v několika místech vyztužit profilovými úhelníky. To má vést nejen ke zvýšení tuhosti konstrukce, ale i k dosažení přesné montáže. Jelikož je nádoba pevně uchycena na rám, kalibrace vodorovnosti kontaktního okna probíhá skrze rám tiskárny. Z tohoto důvodu a požadavku na jednoduchost kalibrace je navrženo nahradit stávající stavitelné nohy, které se seřizují stranovým klíčem, nohami s ručním seřízením.

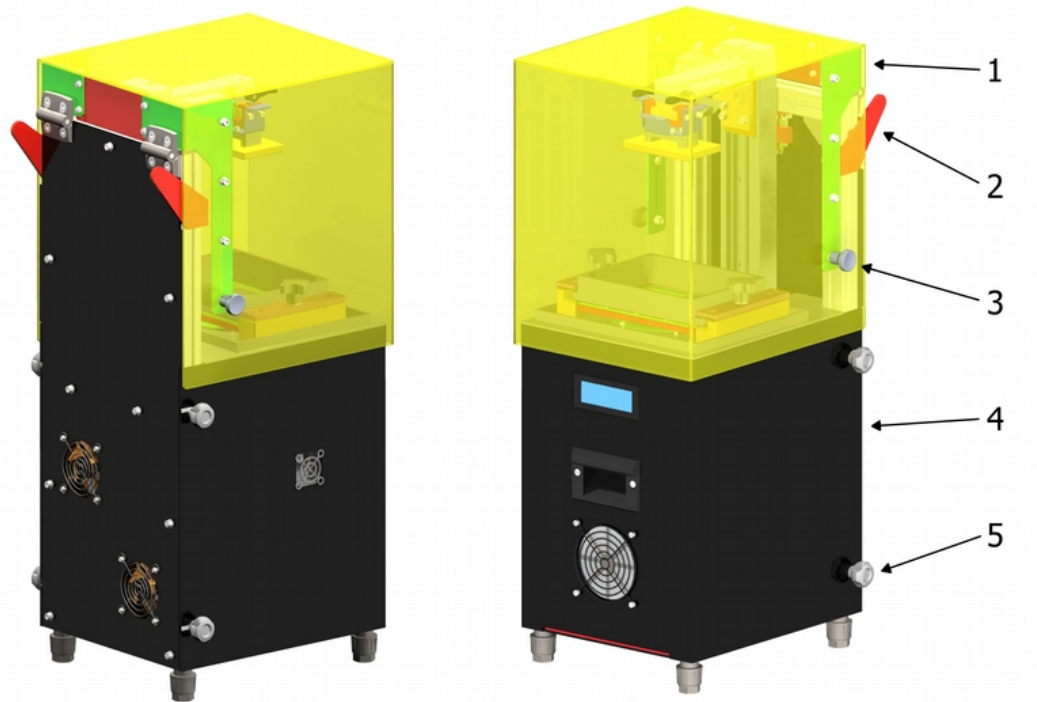
9.4.6 Kryt tiskárny

Kryt zařízení musí absorbovat UV záření. Aby zároveň bylo vyhověno požadavku na jednoduchou výrobu, je jako materiál krytu zvoleno plexisklo. Spodní kryt je volen z neprůhledného plexi, vrchní snímatelný kryt z částečně transparentního plexi.

Spodní kryt bude snímán jen při údržbě, změnách v řízení tiskárny nebo při změně polohy projektoru. Jelikož změna polohy projektoru může být častěji prováděným úkolem, je nutné zajistit rychlé a bezproblémové sundávání resp. nasazování krytu. Toho je v tomto návrhu dosaženo konstrukcí spodního krytu jen ze tří desek. Spodní vodorovné desky, zadní desky a přední desky ohnuté do tvaru písmene U. U přední ohnuté desky je navrženo uchycení pomocí čtyř matic, po jejichž mírném povolání lze celou desku díky vestavěnému madlu jednoduše sejmout. Demontáž zadní nebo spodní desky již vyžaduje kompletní demontáž šroubových spojů.

Vzhledem k tomu, že veškerá manuální činnost uživatele probíhá v pracovním prostoru tiskárny, a to vždy po dokončení výroby dílu a před výrobou dílu nového, musí být horní kryt uzpůsoben pro rychlé a časté odkrývání pracovního prostoru. Jakákoli větší manipulace s horním krytem je nežádoucí. Proto je kryt navržen s uchycením

na rám pomocí dvojice pantů. Uživatel tak jen pomocí madla vyklopí kryt nahoru resp. sklopí kryt dolů. Pro dlouhodobý bezproblémový provoz krytu je kryt v místech uchycení na panty vyztužen plechovými výlisky. Míru vyklopení krytu je možné nastavit pomocí dvojice plastových dorazů. Krytování horní části zadní stěny (za osou Z) je vyřešeno pomocí jedné desky. Ta navazuje na zadní desku spodního krytu.



Obr. 9.22: 4. návrh – kryt zařízení

1) výklopný horní kryt, 2) doraz horního krytu, 3) madlo horního krytu, 4) spodní kryt s madlem a ventilátory, 5) matice spodní ohnuté desky

9.4.7 Integrace elektronických komponent a chlazení

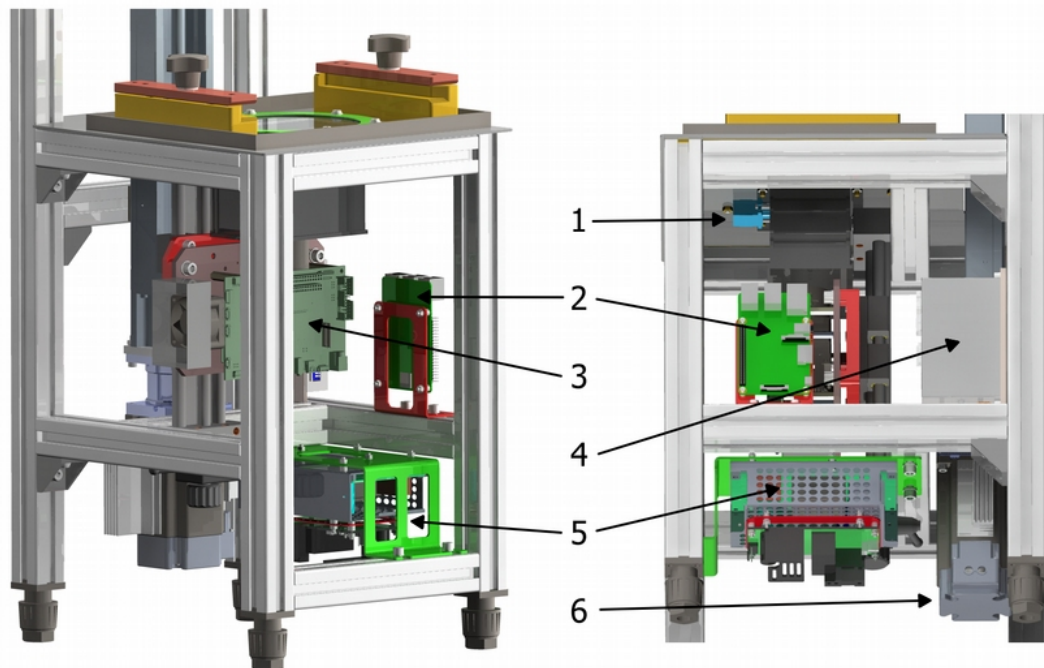
V závěrečném konstrukčním návrhu je řešeno umístění všech potřebných elektronických komponent do rámu zařízení s ohledem na jejich efektivní chlazení.

Napájecí zdroje i nadále zůstávají na stejném místě ve vnitřním prostoru tiskárny. Dochází však k odlišnému návrhu jejich uchycení na nosný rám. Zdroje jsou k sobě přimontovány šroubovými spoji a celá tato sestava napájecích zdrojů je skrze plechový výlisek připevněna do rámu zařízení.

Mikropočítač i driver krokového motoru jsou přesunuty do volného prostoru npravo od projektoru. PhidgetBridge sloužící k připojení tenzometrického snímače je situován za osu Z, aby byl v dosahu propojovacího kabelu od snímače. Koncový optický snímač polohy (osy Z) je z estetických důvodů částečně zakrytován. LCD panel

zobrazující informace z mikropočítače je umístěn do přední desky spodního krytu. Skrze zadní desku spodního krytu je vyveden centrální vypínač tiskárny a konektor pro přivedení elektrické energie.

O chlazení všech elektronických komponent se stará čtveřice ventilátorů. Jak již bylo zmíněno, projektor disponuje vlastním ventilátorem. Distribuce chladného vnějšího vzduchu k 40 mm ventilátoru projektoru je zajištěna skrze malý otvor ve spodním ohnutém plexi a papírový tunel mezi ventilátorem a plexisklem.



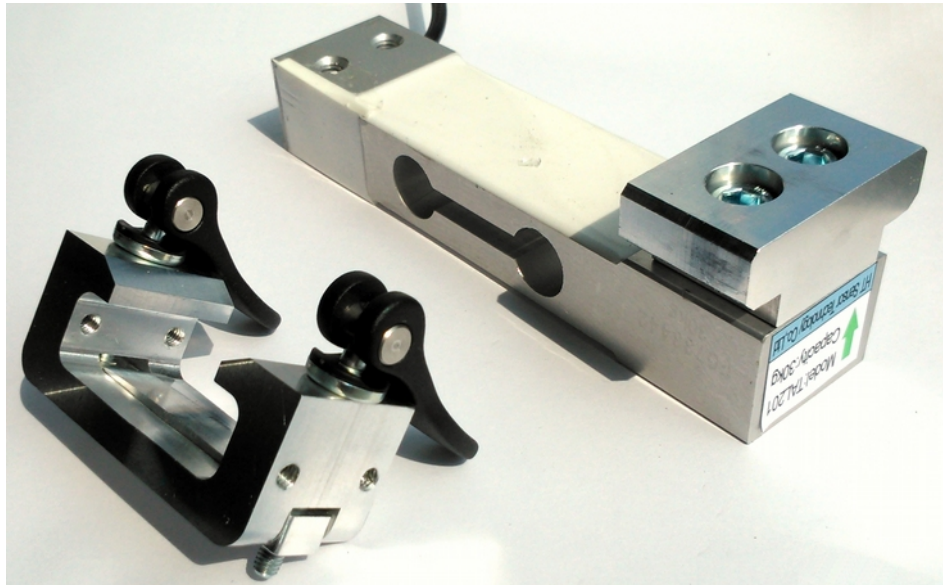
Obr. 9.23: 4. návrh – elektronické komponenty

1) servomotor klapky, 2) mikropočítač Raspberry PI 3, 4) budič motoru osy Z, 5) napájecí zdroje, 6) krokový motor osy Z s brzdou

Druhý sací ventilátor o rozměru 92 mm je situován do čela spodního plexi tvaru písmene U. V zadním plexi spodního krytu se pak nacházejí dva výstupní 70 mm ventilátory. Takovýmto rozmístěním ventilátorů má být dosaženo proudění vzduchu skrze celý vnitřní prostor tiskárny od přední části směrem dozadu. Nasátá chladná vzdušina je vedena v několika proudech skrze napájecí zdroje a projektor, okolo mikropočítače a motoru osy Z včetně budiče motoru. Sací 92 mm ventilátor je vybaven prachovým filtrem. Všechny větrací otvory v zařízení jsou překryty mřížkami pro zamezení vniknutí větších předmětů nebo poranění obsluhy.

9.4.8 Realizace konstrukčního návrhu

Návrhy provedené v tomto úseku konstrukčních prací jsou realizovány postupně s vyhlídkou na kompletní vyhotovení celého návrhu. V době dokončování této práce dochází k vyhotovení obráběných dílů platformy, tj. tvarových spojovacích dílů s přítlačným hranolem. Dále je realizován nákup všech potřebných spojovacích dílů. Dílce z plechu jsou postupně řezány na laserovém stroji. Kompletní výroba zařízení je umožněna díky vyhotovené výrobní dokumentaci zahrnující výrobní a sestavné výkresy.



Obr. 9.24: 4. návrh – konzola s tvarovými spojovacími díly platformy

10 Závěr

Aditivní výroba zahrnuje velké množství rozličných výrobních technologií a přináší s sebou požadavek na rozšíření spektra použitelných konstrukčních materiálů, použití odlišných konstrukčních a technologických postupů pro tvorbu předvýrobního modelu či aplikaci specifických povýrobních operací. Technologie DLP tvoří jen malou část z této veliké oblasti aditivní výroby, nicméně se mezi dalšími technologiemi rozhodně neztrácí. DLP technologie má své limity a rozsah použitelnosti, vlivem čehož najde uplatnění v oborech, kde je kladen důraz na výrobu přesných nekovových výrobků o malém množství.

Na řádcích výše jsou uvedeny specifika a je provedeno zařazení technologie DLP v rámci aditivní výroby. Důraz je kladen na vysvětlení souvislosti mezi aditivní výrobou z fotopolymerů a projekčními DLP zařízeními a jak jejich koexistence, ztělesněná 3D DLP tiskárnami, ovlivňuje parametry tisku a kvalitu vyráběných dílů. Je podrobně popsáno, co je úkolem jednotlivých funkčních skupin tiskárny (nádoba, sestava platformy, projektor, atd.), a na jaké jejich parametry musí být brán zřetel. U vybraných komerčních stereolitografických zařízení je poukázáno na dosahované tiskové parametry a rozličnost jejich konstrukce či rozměrů.

V práci jsou uvedeny důvody, které vedly k volbě druhu DLP technologie na navrhovaném zařízení. Konstrukční návrh tiskárny probíhal ve čtyřech na sebe navazujících úsecích, přičemž každý z nich vývoj posouval kupředu. Ať už díky realizaci vyhotoveného návrhu nebo poukázáním na nedostatky řešení a vhodnost sjednání nápravy. Podrobně jsou rozebrány nejdůležitější navrhované prvky a celky všech čtyř konstrukčních úseků a míra jejich realizace ve stavěném zařízení.

Tab. 10.1: Porovnatelné parametry navrhované 3D DLP tiskárny

| | | | |
|--|----------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Technologie | DLP | Vnější rozměry [mm] | 312x351x705 |
| Stavební rozměry [mm] (mezní hodnoty) | 89,6x56x185 70,4x44x185 | XY rozlišení [μm] | 70, 65, 60, 55 |
| Z rozlišení [μm] | volitelně | Konektivita | USB, Wi-Fi, ethernet |
| Rozlišení projektoru | 1280x800 | | |

V době dokončování této práce probíhala postupná realizace konečného konstrukčního návrhu. Výsledkem po završení stavebních prací by mělo být kompletně krytované zařízení se všemi mechanickými a elektronickými prvky integrovanými v rámu zařízení. Zařízení schopné, po nahrání modelu a tiskových parametrů přes internetové rozhraní, automatické výrobní činnosti, až do okamžiku dokončení výroby dílu. Uživateli je umožněno volit si parametry výroby nejen systémově v ovládacím softwaru, ale i vhodnou volbou kontaktního okna nádoby a stavební platformy či přenastavením polohy projektoru vůči pracovnímu prostoru tiskárny. To z tiskárny dělá jedinečné zařízení schopné víceúčelového provozu, které je tak žádoucí pro laboratorní výzkum a vývoj.

Zařízení je možné po sestavení nadále upravovat a vylepšovat tak jeho činnost. Mezi konstrukční úpravy lze zařadit osazení pracovního prostoru kamerou (např. Raspberry PI Camera) pro možnost kontinuální kontroly procesu tisku skrze rozhraní SW nanoDLP. Tiskárna může být dále vybavena snímačem vyklopení horního krytu, který při otevření krytu během pracovní činnosti výroby přeruší tisk a vypne projektor pro zamezení ozáření obsluhy UV světlem. Posuvné saně projektoru mohou být osazeny mechanickými dorazy nebo koncovými snímači pro přesné nastavení koncových poloh posuvu projektoru.

Z pohledu softwarových úprav lze zmínit aplikaci režimu patternování (viz. 4.1) pro zamezení přepočítávání obdélníkových pixelů obrazu na kosočtvercová mikrozrcátka DMD. Dále funkci grayscale pro zjemnění kontur či přípravu dat na základě voxelizace vstupního 3D modelu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *Wohlers Report 2016: 3D printing and additive manufacturing state of the industry : annual worldwide progress report*. Fort Collins: Wohler Associates, 2016. ISBN 978-0-9913332-2-6.
- [2] *ISO/ASTM 52900:2015(en)*. BSI, 2015, 30 s. Dostupné také z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en:term:2.1.2>
- [3] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.
- [4] *The Ultimate Guide to 3D Printing Thermosets for Manufacturing and Production* [online]. envisionTEC, 2017, 2017-05-02, 9 s. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://envisiontec.com/wp-content/uploads/2017/04/3sp-white-paper-2017-the-ultimate-guide-to-3d-printing-for-manufacturing-and-production.pdf>
- [5] CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Fourth edition of Rapid prototyping: principles and applications. New Jersey: World Scientific, 2015. ISBN 978-981-4571-40-1.
- [6] BÁRTOLO, Paulo. *Stereolithography: materials, processes and applications*. New York: Springer, 2011. ISBN 978-0-387-92903-3.
- [7] HALLORAN, John W. Ceramic Stereolithography: Additive Manufacturing for Ceramics by Photopolymerization. In: *Annual Review of Materials Research*. 2016, 46(1), s. 19-40. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-031841. ISSN 1531-7331. Dostupné také z: <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-matsci-070115-031841>
- [8] *Getting Started With TI DLP® Display Technology: Application Report* [online]. Texas Instruments, 2015, 2018-05, 20 s. [cit. 2018-05-14]. DLPA059C. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/wp/dlpa059c/dlpa059c.pdf>
- [9] LEE, Benjamin. *Introduction to ±12 Degree Orthogonal Digital Micromirror Devices (DMDs)* [online]. Texas Instruments, 2008, 2018-02, 13 s. [cit. 2018-03-10]. DLPA008B. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/dlpa008b/dlpa008b.pdf>

- [10] ALLEN, John. Application of patterned illumination using a DMD for optogenetic control of signaling. *Nature Methods*. 2017, (14). Dostupné také z: <https://www.nature.com/articles/nmeth.f.402.pdf>
- [11] *DLP4500 (0.45 WXGA DMD)* [online]. Texas Instruments, 2013-04, 2018-02, 58 s. [cit. 2018-03-11]. DLPS028C. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dlp4500.pdf>
- [12] *DLP™ System Optics* [online]. Texas Instruments, 2010-07, 26 s. [cit. 2018-03-08]. DLPA022. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/dlpa022/dlpa022.pdf>
- [13] *Geometric Optics for DLP®* [online]. Texas Instruments, 2013-12, 16 s. [cit. 2018-03-08]. DLPA044. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/dlpa044/dlpa044.pdf>
- [14] KRANZ, Steve. Pattern mode: How to increase the resolution of some Texas Instrument DLP projectors. In: *YouTube* [online]. c2018, 2016-06-17 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=yxUSxvGSLEQ>
- [15] DLP Products. *Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments - TI.com* [online]. Texas Instruments, c1995-2017 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/dlp-chip/overview.html>
- [16] ENVISIONTEC GMBH. *Method for producing a three-dimensional object by means of mask exposure*. Spojené státy americké. US 8815143 B2 Patent. Přihlášeno 2017-01-12. Uděleno 2014-08-26. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US8815143/fr>
- [17] *Advanced DLP: For Superior 3D Printing* [online]. envisionTEC, 2017, 8 s. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://envisiontec.com/wp-content/uploads/2016/12/Why-EnvisionTEC-DLP-3D-Printing-is-Better-rebranded.pdf>
- [18] SLA 3D Printing: Difference in Laser and DLP Light Pattern Generation. In: *Blog - Kudo3D Inc.* [online]. Dublin (USA): Kudo3D, c2014-2017 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.kudo3d.com/sla-3d-printing-difference-in-laser-and-dlp-light-generation/>
- [19] *3D Printing 101: Stay Flat and Parallel* [online]. envisionTEC, 2017, 6 s. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://envisiontec.com/wp-content/uploads/2017/03/3D-Printing-101-Stay-Flat-and-Parallel-03132017.pdf>

- [20] KOVALENKO, Iaroslav. *Vývoj prototypu 3D tiskárny na fotopolymery*. Liberec, 2017, 28 s. Pojednání o disertační práci ke státní doktorské zkoušce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojí, Katedra výrobních systémů a automatizace.
- [21] *The Ultimate Guide to High-Speed 3D Printing with Continuous Technology* [online]. envisionTEC, 2018, 10 s. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://envisiontec.com/wp-content/uploads/2018/02/cDLM-White-Paper-02072018.compressed.pdf>
- [22] KRANZ, Steve. Sub-pixel resolution for DLP 3D printing. In: *YouTube* [online]. c2018, 2016-07-11 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=5qTAMPrHLow>
- [23] *Understanding 3D Printer Accuracy: Cutting Through the Smoke and Mirrors* [online]. envisionTEC, 2017-08-24, 16 s. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://envisiontec.com/wp-content/uploads/2017/08/Accuracy-versus-Resolution-0824172.pdf>
- [24] DWS Introduces XCELL 6000 Work Cell SLA 3D Printer. In: *3DPrint.com: The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing* [online]. 3DR Holdings, c2018, 2018-01-15 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://3dprint.com/199886/dws-xcell-6000-sla-3d-printer/>
- [25] Flashforge Hunter DLP 3D Printer. *3dedge...* [online]. 3dedge.eu, c2017 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://3dedge.eu/en/industrial/28-flashforge-hunter-dlp-3d-printer.html>
- [26] HLOCKE. The best of both worlds: Flexvat with raised edge vented acrylic FEP support plate. In: *Projects, Interests And Etcetera* [online]. 2017-04-18 [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <http://projectsinterestsandetcetera.com/the-best-of-both-worlds-flexvat-with-raised-edge-vented-acrylic-fep-support-plate/>
- [27] Why Cured Layers Could Stick to the Resin Container. In: *Blog - Kudo3D Inc.* [online]. Dublin (USA): Kudo3D, c2014-2017, 2016-09-03 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://www.kudo3d.com/why-cured-layers-could-stick-to-the-resin-container/>
- [28] HOBISH, Sam. Swiper Kits now available for purchase. In: *Ember Blog* [online]. AUTODESK, c2015, 2016-03-14 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: learn.ember.autodesk.com/swiper-kits-now-available-for-purchase

- [29] MAIN, Andrea. New Makex M-ONE Teflon FEP Vat. In: *Vimeo: The high-quality home for video hosting and watching* [online]. Vimeo, c2018, 2015-08-01 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://vimeo.com/135124634>
- [30] Understanding Kudo3D's PSP Resin Container. In: *Blog - Kudo3D Inc.* [online]. Dublin (USA): Kudo3D, c2014-2017, 2016-08-10 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://www.kudo3d.com/understanding-kudo3d-ppsp-resin-container/>
- [31] SYAO, Kao-Chih. *Stereolithography Apparatus*. Spojené státy americké. US 9452567 B2 Patent. Přihlášeno 2014-08-08. Uděleno 2016-09-27. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US9452567>
- [32] Flashforge Hunter DLP Resin 3D Printer. *3D Printers Online Store* [online]. 3D Printers Online Store, c2013-2018 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.3dprintersonlinestore.com/flashforge-hunter-dlp-3d-printer>
- [33] Form 2: Desktop Stereolithography (SLA) 3D Printer. *High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals* [online]. Formlabs, c2018 [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/>
- [34] P4 Mini XL LED Series. *3D Printers: Desktop, Professional and Industrial* [online]. envisionTEC, c2017 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://envisiontec.com/3d-printers/perfactory-family/p4-mini-xl-led-series/#>
- [35] *Precision Desktop 3D Printer: Autodesk - Ember* [online]. Autodesk, c2018 [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <https://ember.autodesk.com/>
- [36] Bean 3D Printer: The Ultimate Consumer SLA 3D Printer by Kudo3D. In: *Kickstarter* [online]. Kickstarter, c2018 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.kickstarter.com/projects/kudo3d/bean-3d-printer-the-ultimate-consumer-sla-3d-print>
- [37] DLP® LightCrafter™ E4500 MKII™ Plus 2W UV High Power. *Welcome to EKB Technologies Ltd - DLP e-store* [online]. c2018 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: https://ekb.3dcartstores.com/DLP-LightCrafter-E4500-MKII-Plus-2W-UV-High-Power- p_73.html
- [38] MACH, Pavel. *Konstrukce 3D tiskárny na fotopolymer*. Liberec, 2014. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Petr Zelený.

- [39] *LM Guide Actuator Model KR* [online]. 209-8E. Tokyo: THK co., 2011, 2013-07-16, 92 s. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://tech.thk.com/upload/catalog_claim/pdf/cat_kr_en.pdf
- [40] *Ezi-Servo® BK: Closed Loop Stepping System* [online]. Rev.02. Fastech co., 2013, 20 s. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: http://www.raveo.cz/sites/default/files/download/2014/11/EziSERVO_BK_catalog.pdf
- [41] *DryLin® General Drive Technology: linear modules SLW* [online]. igus®, s. 1261-1274 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://www.igus.com/contentData/Product_Files/Download/pdf/2016%20drylin%20section.pdf
- [42] Products - Raspberry Pi. *Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi* [online]. RASPBERRY PI FOUNDATION [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/products/>
- [43] BORO FLOAT® Borosilicate Windows. *Optics - Imaging - Photonics - Optomechanics - Lasers* [online]. Barrington (USA): Edmund Optics, c2018 [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/optics/windows-diffusers/ultraviolet-uv-infrared-ir-windows/BOROFLOATreg-Borosilicate-Windows/>
- [44] KOVALENKO, Iaroslav. *Vývoj a výroba kompaktního prototypu DLP 3D tiskárny*. Liberec, 2015, 9 s. Závěrečná zpráva o řešení SGS projektu za rok 2015 - část I. Technická univerzita v Liberci.
- [45] TAL201: PARALLEL BEAM LOAD CELL. In: *SparkFun Electronics* [online]. SparkFun Electronics ® [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://cdn.sparkfun.-com/datasheets/Sensors/ForceFlex/20140804152573167316.jpg>
- [46] KERNS, Jeff. 3D Printing: The Machine that Started It All. In: *Machine Design* [online]. Informa USA, c2018, 2017-08-23 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.machinedesign.com/3d-printing/3d-printing-machine-started-it-all>

Seznam příloh

| | |
|--|-----------|
| A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD..... | 85 |
| B DODATEČNÉ ILUSTRACE..... | 86 |
| C FOTOGRAFIE ZAŘÍZENÍ..... | 87 |
| D SEZNAM NAKUPOVANÝCH DÍLŮ..... | 88 |
| E SEZNAM VÝKRESŮ..... | 90 |

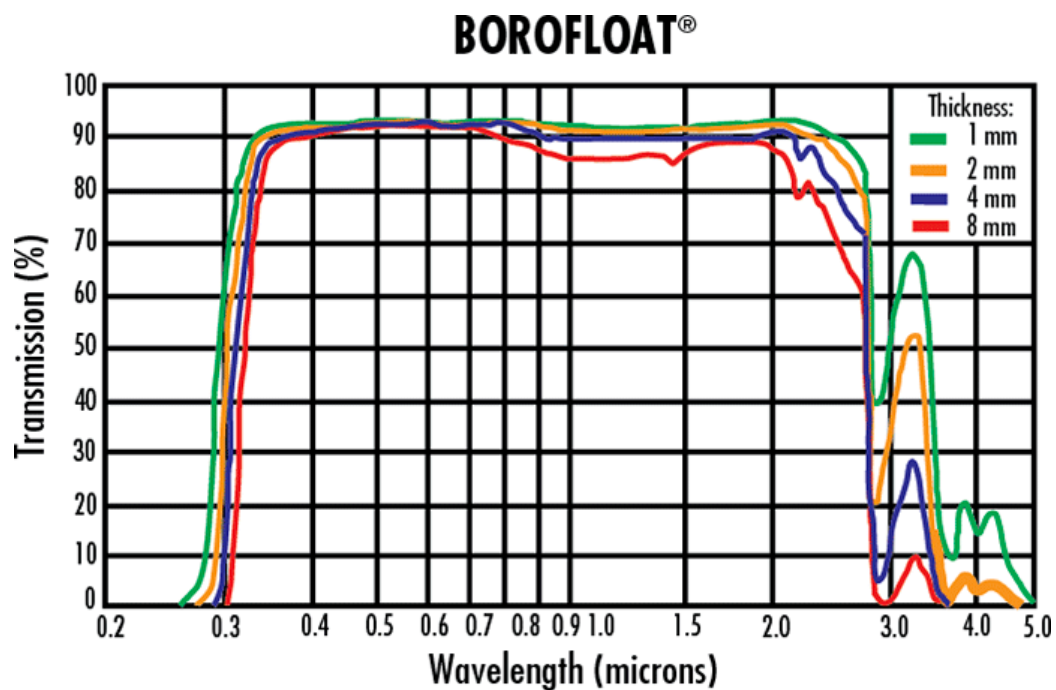
A Obsah příloženého CD

- text diplomové práce
 - dp_2018_Jakub_Taich.pdf
 - kopie_zadani_dp_2018_Jakub_Taich.pdf
- ilustrace
 - fotografie zařízení
 - fotografie vyrobených dílů
 - renderované obrázky
- technická dokumentace
 - pracovní soubory
 - výkresy v PDF
 - vyřezávané díly v DWG
 - modely ve 3D PDF
 - modely ve STEP
- katalogové listy

B Dodatečné ilustrace

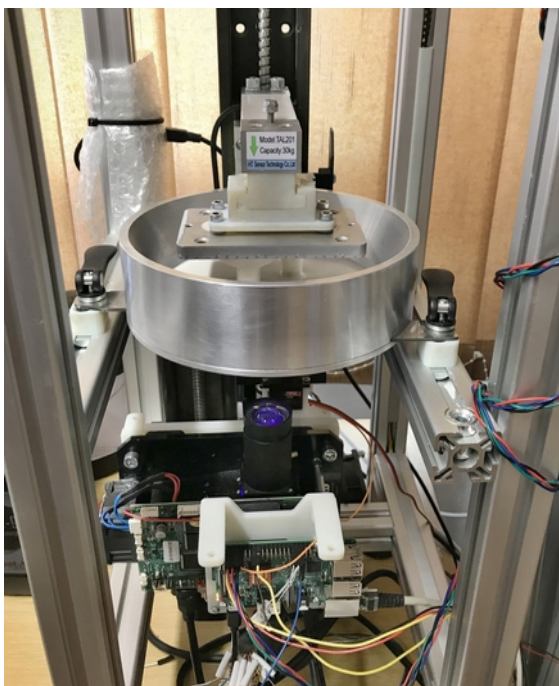


Obr. B.1: Zařízení SLA-1 od 3D Systems [46]



Graf B.1: Specifikace borosilikátového skla BOROFLOAT [43]
Procentuální závislost průchodnosti záření na vlnové délce záření u různě tlustého borosilikátového skla.

C Fotografie zařízení



Obr. C.1: 2. návrh – pohled do pracovního prostoru a na elektroniku zařízení



Obr. C.2: 2. návrh – pohled z boku na realizované zařízení

D Seznam nakupovaných dílů

Tab. D.1: Seznam jednorázově pořizovaných dílů a prvků (*x* = velký formát)

| Druh dílu | Počet | Výrobce | Bližší označení |
|-------------------------------|-------|---------------|------------------|
| Lineární jednotka KR3306A | 1 | THK | 0300-H0-00A0 |
| Krokový motor BK-60L | 1 | EziSERVO | 1405M2024 |
| Spojka motoru | 1 | - | - |
| Posuvný stůl drylin® SLW | 1 | Igus | SLW-1040-HR-HK |
| Projektor DLP® LightCrafter™ | 1 | EKB | E4500 MKII™ PLUS |
| Napájecí zdroj RPD-65C | 1 | MEAN WELL | - |
| Napájecí zdroj RPS-120 | 1 | MEAN WELL | - |
| Servomotor MG90S | 1 | TowerPRO | - |
| Mikropočítač Raspberry PI 3 | 1 | - | Model B |
| LCD panel DS-C2004A3 | 1 | - | - |
| Tenzometrický snímač TAL201 | 1 | - | - |
| PhidgetBridge | 1 | - | 4-Input |
| Paměťová karta | 1 | - | Micro SDHC |
| Ventilátor | 2 | - | 70 x 70 x 15 mm |
| | 1 | - | 90 x 90 x 25 mm |
| Koncový optický snímač polohy | 1 | - | - |
| Kolébkový vypínač | 1 | - | - |
| Ethernet konektor | 1 | - | - |
| Síťový konektor | 1 | - | - |
| Prachový filtr | 1 | - | 92 x 92 mm |
| Mřížka ventilátoru | 1 | - | 92 mm |
| | 2 | - | 70 mm |
| | 1 | - | 40 mm |
| Tabulka borosilikátového skla | 1 | Edmund optics | Ø 125 x 5 mm |

| | | | | |
|-------------------------------------|----|------------|--------------------|-----------------|
| Tabulka křemenného skla | 1 | UVC Servis | 130 x 80 x 3 mm | |
| Neprůhledné plexisklo | x | Zenit | GS 9H01 / XT 9N870 | |
| Průhledné plexisklo | x | Zenit | GS 1C33 (žluté) | |
| Hliníkový profil 30x30 4F, 3SP | 2 | Maytec | L = 640 mm | |
| | 2 | | L = 350 mm | |
| | 4 | | L = 235 mm | |
| | 8 | | L = 186 mm | |
| Rámový úhelník GD-Zn 28x28 | 8 | | | 1.46.204.2828.1 |
| Ručně stavitelná noha | 4 | | | 1.44.203008 |
| Závitová redukce M14/M8, L15 | 4 | | | 1.35.1140815 |
| Profilový konektor standard | 8 | | | 1.21.3F1 |
| T - matice, následující vložení, M4 | 6 | | | 1.32.4FM4 |
| T - matice, následující vložení, M5 | 25 | | | 1.32.4FM5 |
| T - matice, následující vložení, M6 | 34 | | | 1.32.4FM6 |
| T – šroub, M6x20 | 4 | | | 1.34.FM62 |
| Krycí víčko čtvercové 30x30 | 2 | | | 1.42.20303.2 |
| Excentrická páka M4x30 | 2 | Kipp | K0006.9501104X30 | |
| Křížový šroub M8x30 | 2 | | K0148.508X30 | |
| Hříbovitý knoflík M6 | 2 | | K0250.206 | |
| Miskové madlo | 1 | | K0242.1082041 | |
| Plastový závěs | 2 | | K0435.251515 | |
| Hvězdicová úchytka | 4 | | K1093.23006 | |

Tab. D.2: Seznam spotřebního materiálu (x = velký formát)

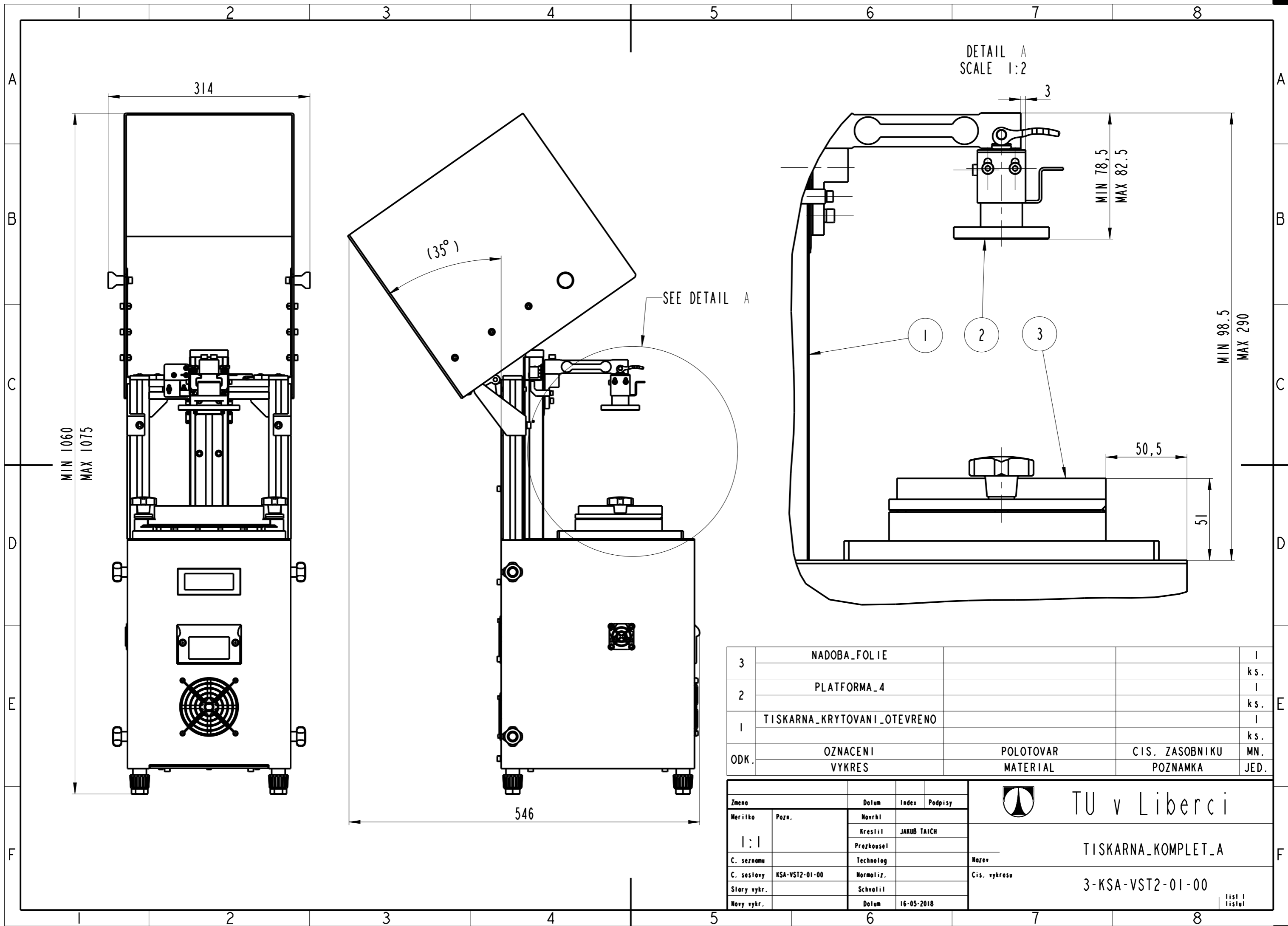
| Druh dílu | Počet | Výrobce | Bližší označení |
|---------------------|-------|---------|-----------------|
| FEP fólie | x | - | - |
| Ploché těsnění EVA | x | - | - |
| Ploché těsnění PTFE | x | - | - |

E Seznam výkresů

Tab. E.1: Soupis označení modelů a čísel výkresů ($x = KSA-VST2$)

| Sestavné výkresy | | Výrobní výkresy | |
|-------------------------|-----------|-------------------------|-----------|
| tiskarna_komplet_a | 3-x-01-00 | kryt_spodek_podlozka | 4-x-03-01 |
| tiskarna_komplet_b | 3-x-02-00 | kryt_vrch_bocnice | 4-x-03-02 |
| tiskarna_krytovani | 2-x-03-00 | kryt_spodek_drzak | 4-x-03-03 |
| tiskarna_komponenty | 1-x-04-00 | kryt_spodek_podlaha | 4-x-03-04 |
| tiskarna_ram | 2-x-05-00 | kryt_deska_podlozka_a | 4-x-04-01 |
| osa_z | 3-x-06-00 | kryt_deska_podlozka_b | 4-x-04-02 |
| posuvny_stul | 3-x-07-00 | kryt_deska_prilozka | 4-x-04-03 |
| konzola_2 | 3-x-08-00 | motor_deska | 4-x-06-01 |
| kryt_stred | 3-x-09-00 | projektor_deska_3 | 3-x-07-01 |
| kryt_deska_svarenc | 3-x-10-00 | konzola_drzak | 4-x-08-01 |
| kryt_projektor | 3-x-11-00 | konzola_mezikus_2 | 4-x-08-02 |
| optosenzor_2 | 3-x-12-00 | optobrana_3 | 4-x-08-03 |
| zdroje_sestava | 3-x-13-00 | konzola_doraz | 4-x-08-04 |
| raspberry_drzak_3 | 3-x-14-00 | kryt_deska_upinka | 4-x-09-01 |
| phidgetbridge_komplet_2 | 3-x-15-00 | projektor_klapka_3 | 4-x-09-02 |
| kryt_spodek_vzadu | 3-x-16-00 | kryt_deska | 4-x-10-01 |
| kryt_spodek_celo | 3-x-17-00 | kryt_projektor_spodek | 4-x-11-01 |
| kryt_vrch | 3-x-18-00 | kryt_projektor_vrch | 4-x-11-02 |
| platforma_4 | 3-x-19-00 | kryt_projektor_bok | 4-x-11-03 |
| platforma_deska_komplet | 3-x-20-00 | kryt_projektor_bok_uzky | 4-x-11-04 |
| platforma_drzak_komplet | 3-x-21-00 | optosenzor_drzak_3 | 4-x-12-01 |
| nadoba_folie | 3-x-22-00 | zdroj_deska | 4-x-13-01 |
| nadoba_vrch_folie | 3-x-23-00 | zdroj_mezikus | 4-x-13-02 |
| nadoba_spodek_folie | 3-x-24-00 | raspberry_drzak | 4-x-14-01 |

| | | | |
|--------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| nadoba_sklo | 3-x-25-00 | kryt_spodek_bocnice | 4-x-16-01 |
| nadoba_spodek_sklo | 3-x-26-00 | kryt_spodek_tvarovany | 3-x-17-01 |
| | | kryt_vrch_celo | 4-x-18-01 |
| | | kryt_vrch_deska | 4-x-18-02 |
| | | kryt_vrch_vyztuha | 4-x-18-03 |
| | | kryt_vrch_vypln | 4-x-18-04 |
| | | platforma_plech_2 | 3-x-19-01 |
| | | platforma_deska_4 | 4-x-20-01 |
| | | platforma_deska_5 | 4-x-20-02 |
| | | platforma_deska_6 | 4-x-20-03 |
| | | platforma_podlozka | 4-x-20-04 |
| | | platforma_drzak_2 | 4-x-21-01 |
| | | platforma_drzak_deska_2 | 4-x-21-02 |
| | | nadoba_vrch_deska | 4-x-23-01 |
| | | nadoba_spodek_podstava | 4-x-24-01 |
| | | nadoba_spodek_napinak | 4-x-24-02 |
| | | nadoba_vrch_stena_2 | 3-x-25-01 |
| | | nadoba_podstava_sklo | 3-x-26-01 |
| | | nadoba_spodek_deska_sklo | 4-x-26-02 |



MIN 1060
MAX 1075

314

(35°)

SEE DETAIL A

DETAIL A
SCALE 1:2

MIN 78,5
MAX 82,5

MIN 98,5
MAX 290

50,5

51

546

| | | | | |
|------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------|
| 3 | NADOBA_FOLIE | | | 1 |
| | | | | ks. |
| 2 | PLATFORMA_4 | | | 1 |
| | | | | ks. |
| 1 | TISKARNA_KRYTOVANI_OTEVRENO | | | 1 |
| | | | | ks. |
| ODK. | OZNACENI VYKRES | POLOTOVAR MATERIAL | CIS. ZASOBNIKU POZNAMKA | MN. JED. |

| | | | |
|-------------|----------------|------------|-------------|
| Zmena | Datum | Index | Podpisy |
| Meritko | Pozn. | Navrhl | |
| 1:1 | | Kreslil | JAKUB TAICH |
| C. seznamu | | Prezkoušel | |
| C. sestavy | KSA-VST2-01-00 | Technolog | |
| Stary vykr. | | Normaliz. | |
| Novy vykr. | | Schválil | |
| | | Datum | 16-05-2018 |

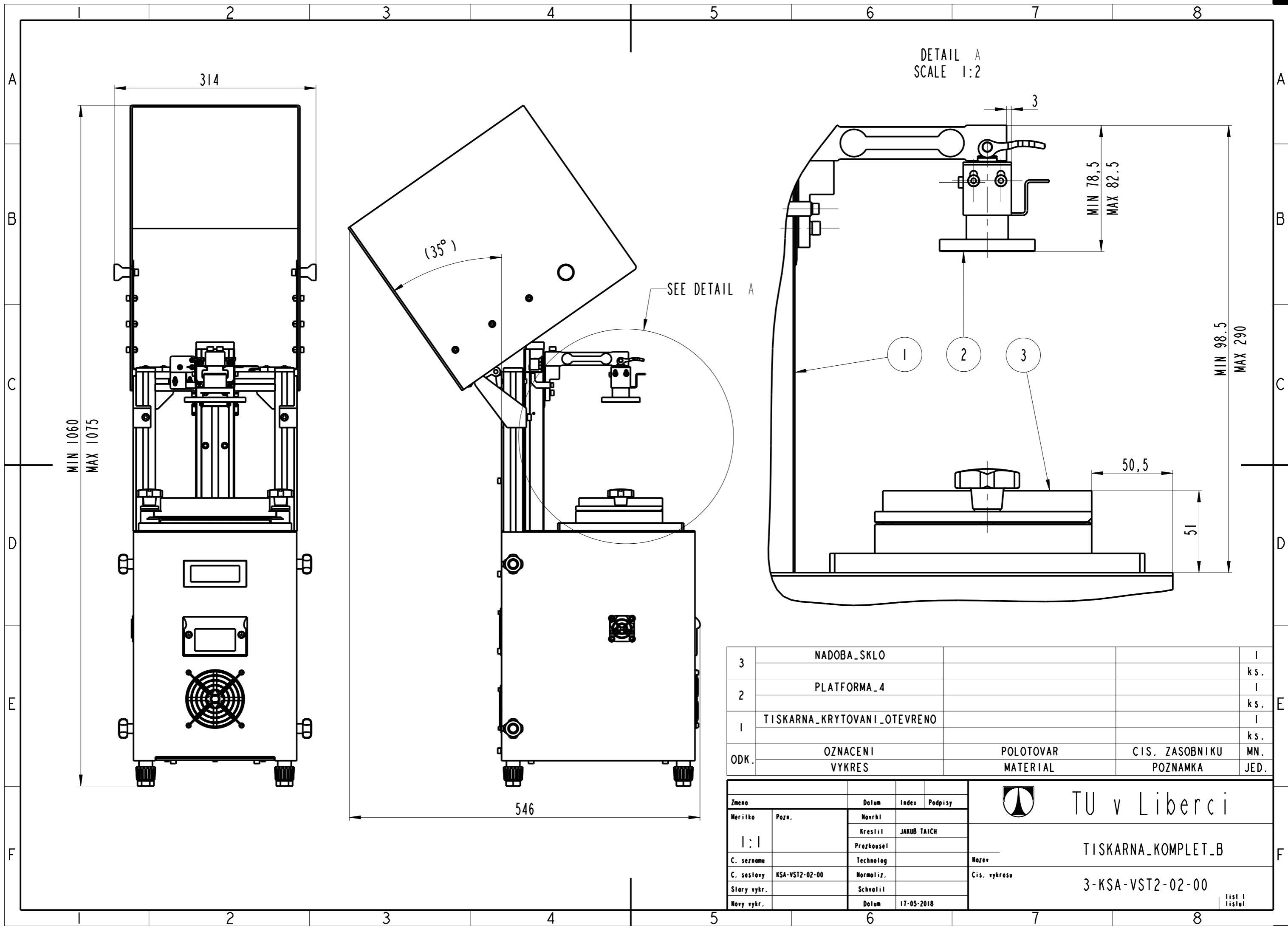


TU v Liberci

TISKARNA_KOMPLET_A

3-KSA-VST2-01-00

list 1
listul



| | | | | |
|------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------|
| 3 | NADOBA_SKLO | | | 1 |
| | | | | ks. |
| 2 | PLATFORMA_4 | | | 1 |
| | | | | ks. |
| 1 | TISKARNA_KRYTOVANI_OTEVRENO | | | 1 |
| | | | | ks. |
| ODK. | OZNACENI VYKRES | POLOTOVAR MATERIAL | CIS. ZASOBNIKU POZNAMKA | MN. JED. |

| Zmena | Datum | Index | Podpisy |
|-------------|----------------|------------|-------------|
| Meritko | Pozn. | Navrhl | |
| 1:1 | | Kreslil | JAKUB TAICH |
| | | Prezkoušel | |
| C. seznamu | | Technolog | |
| C. sestavy | KSA-VST2-02-00 | Normaliz. | |
| Stary vykr. | | Schválil | |
| Novy vykr. | | Datum | 17-05-2018 |


TU v Liberci

TISKARNA_KOMPLET_B

3-KSA-VST2-02-00

list 1
 listul