

# Vývoj prototypu 3D tiskárny na fotopolymery

## Disertační práce

*Studijní program:*

P2301 Strojní inženýrství

*Studijní obor:*

Výrobní systémy a procesy

*Autor práce:*

**Ing. Iaroslav Kovalenko**

*Školitel práce:*

prof. Ing. Přemysl Pokorný, CSc.

Katedra výrobních systémů a automatizace



## Prohlášení

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

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

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

Disertační práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS/STAG se shodují.

23. října 2019

Ing. Iaroslav Kovalenko

# VÝVOJ PROTOTYPU 3D TISKÁRNY NA FOTOPOLYMERY

## Abstrakt

Aditivní výroba je velice rychle se rozvíjející oblast inženýrství, která se postupně přestává používat výhradně pro prototypování. Historicky první 3D tiskárny stavěné na vytváření fotopolymery dostaly nový impuls s rozvojem projekčních technologií. Možnost promítání celé tisknuté vrstvy najednou odstranila největší nevýhodu tiskáren tohoto typu, a to neskutečně dlouhou dobu tisku.

Představená disertační práce se zabývá vývojem a stavbou 3D tiskárny na zpracování fotopolymerních materiálů, která kontroluje stav tisku v reálném čase. Tiskárna pracuje na principu technologie generování obrazu DLP projektorem. Ultrafialové záření ze zdroje světelné energie prochází deskou mikroskopických zrcadel a formuje obraz vrstvy tištěného modelu. Obraz se promítá na tenkou vrstvu fotopolymery, která se působením UV záření polymerizuje. Platforma, na níž se vytváří model, se v každém kroku posouvá o jednu vrstvu modelu nahoru. Platforma je zavěšena na konzolu, která je poháněna servopohonem s krokovým motorem se zpětnou vazbou a kuličkovým šroubem. Mezi konzolou a platformou je zabudovaný tenzometrický siloměr, který neustále měří sílu vznikající při odlepování vytvrzené vrstvy modelu ode dna nádrže s fotopolymery. Při vzniku neodpovídajícího silového průběhu během tisku hlásí řídicí systém chybu a přerušuje tisk. Tím se snižují časové a materiálové náklady na tisk.

Tiskárna, postavená v rámci této práce, se používá pro tisk keramických a kompozitních materiálů na základě fotopolymery. Je zapojena do výzkumných projektů zabývajících se tiskem ze skla, kovu a keramiky. Na tiskárně probíhají testy metod a způsobů tisku různorodých fotopolymerních materiálů.

**Klíčová slova:** 3D tisk, DLP, SLA, detekce chyb, měření sil, fotopolymer, keramika

# DESIGN OF 3D PRINTER PROTOTYPE FOR PHOTOPOLYMER MATERIALS

## Abstract

Additive manufacturing is a rapidly developing engineering branch that has been becoming more and more popular beyond the prototyping. Historically first 3D printers designed for photopolymer solidifying have received new impulse with the development of projection technologies. The possibility of the projection of the whole printed layer eliminated the main disadvantage of the 3D printers of this kind, namely the enormously long printing time.

This thesis deals with the design and construction of a 3D printer for photopolymer materials processing with the real-time monitoring of a printing process. The printer operates on the principle of image generation using a DLP projector. Ultraviolet light goes from a source through digital micromirror device and forms the image of the layer of printed model. The image projected on the thin layer of photopolymer solidifies under the influence of ultraviolet light. A platform, which serves as a foundation for a formed model, moves at each step up for a distance equal to the thickness of one layer. The platform is fixed to a bracket, which is driven by a servo drive with step motor with feedback and a ball screw. A strain gauge fixed between the bracket and the platform constantly measures a force that appears during the unsticking of a solidified layer from the bottom of a tank with photopolymer. In the case of unpredictable values of unsticking force during printing, a fault detection system reports a fault and interrupts the printing process. The implemented system reduces time and material costs required for printing.

The constructed 3D printer is used for the printing of photopolymer-based ceramics and composite materials. It is involved in research projects focused on the printing from glass, metal and ceramics. Moreover, it is used in testing of methods and approaches to the printing of various photopolymer materials.

**Keywords:** 3D printing, DLP, SLA, fault detection, force measurement, photopolymer, ceramic



## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli panu profesorovi Miroslavovi Olehlovi, a to za veškerou pomoc, kterou jsem během těchto let od něj dostával, a který si už bohužel nebude moci tuto poslední verzi mé práce přečíst.

Panu profesorovi Přemyslovi Pokornému, který se stal mým druhým školitelem, patří můj velký dík za jeho čas, cenné rady a podporu.

Rád bych také poděkoval mému konzultantovi panu doktorovi Petrovi Zelenému, který mě seznámil s 3D tiskem obecně, a který mě podporoval při vývoji navrženého zařízení.

Druhému mému konzultantovi panu doktorovi Jiřímu Šafkovi děkuji za jeho čas, který si pro mě vždy, i přes svoji pracovní vytíženost, udělal, za jeho trpělivost a cenné rady, které jsem během společných schůzek dostal.

Další odstavec patří mojí manželce, která mě neustále podporovala a motivovala se nevzdat a dopsat tuto práci.

Velké poděkování patří také lidem, se kterými jsem pracoval během řešení úkolů na této práci. Jsou to především kolegové pan inženýr Jakub Taich a pan doktor Michal Moučka, kteří přinesli do řešení konstrukce tiskárny neskutečně důležité a potřebné návrhy.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům, kteří, i přestože jsou velmi daleko, mě neustále pomáhali a podporovali.

# Obsah

Seznam zkratk a symbolů . . . . .	9
Seznam obrázků . . . . .	12
Seznam tabulek . . . . .	14
<b>1 Úvod</b>	<b>16</b>
1.1 Cíle disertační práce . . . . .	17
1.2 Motivace . . . . .	19
<b>2 Přehled současného stavu</b>	<b>20</b>
2.1 Aditivní výroba a 3D tisk . . . . .	20
2.2 Fotopolymerizace v nádobě . . . . .	22
2.2.1 Klasická stereolitografie . . . . .	23
2.2.2 Stereolitografie s promítáním masky . . . . .	24
2.3 Digital Light Processing . . . . .	25
2.3.1 Deska mikroskopických zrcadel . . . . .	25
2.4 Typy DLP tiskáren . . . . .	27
2.4.1 Tisk směrem dolů . . . . .	27
2.4.2 Tisk směrem nahoru . . . . .	28
2.5 Fotopolymery pro 3D tisk . . . . .	30
2.5.1 Radikálová polymerizace . . . . .	31
2.5.2 Rychlost polymerizace . . . . .	32
2.5.3 Kyslíková inhibice . . . . .	33
2.5.4 Kationtová polymerizace . . . . .	34
2.5.5 Fotoiniciátory . . . . .	35
2.5.6 Monomery a oligomery . . . . .	38
2.5.7 Síťování polymerů . . . . .	38

2.6	Použití 3D tisku v biomedicíně . . . . .	40
2.7	3D tisk z keramických materiálů . . . . .	40
2.7.1	Keramické materiály pro SL 3D tisk . . . . .	41
2.7.2	Proces tisku keramiky DLP technologií . . . . .	43
2.7.3	Tepelné zpracování - sintrování . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Konstrukce DLP tiskárny</b>	<b>47</b>
3.1	Komponenty tiskárny . . . . .	47
3.1.1	Projekční zařízení . . . . .	47
3.1.2	Pohon . . . . .	50
3.1.3	Řídicí jednotka . . . . .	51
3.2	Rám . . . . .	54
3.3	Tisková platforma . . . . .	54
3.4	Tisková nádoba na fotopolymer . . . . .	56
3.5	Řídicí software . . . . .	57
3.5.1	Nastavitelné parametry tisku . . . . .	59
<b>4</b>	<b>Detekce chyb během procesu tisku</b>	<b>62</b>
4.1	Základní princip navržené metody . . . . .	63
4.2	Algoritmy detekce chyb . . . . .	67
4.2.1	Výhody systému NDE . . . . .	69
4.2.2	Nevýhody systému NDE . . . . .	71
4.3	Realizace navrženého algoritmu NDE . . . . .	71
4.3.1	Snímač síly . . . . .	72
4.3.2	Měřicí deska . . . . .	73
4.3.3	Kalibrace . . . . .	73
4.3.4	Program . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Experimenty a aplikace</b>	<b>78</b>
5.1	Srovnání distribuce UV energie na povrchu platformy . . . . .	78
5.2	Měření síly při odlepování modelu a simulace chybového stavu . . . . .	81
5.3	Experimentální zkoušky smrštění tištěných keramických modelů po spékání . . . . .	84

<b>6 Závěr</b>	<b>87</b>
6.1 Zhodnocení výsledků . . . . .	87
6.2 Doporučení pro pokračování výzkumu . . . . .	88
<b>Literatura</b>	<b>90</b>
<b>Přílohy</b>	<b>98</b>
<b>A Odborný životopis autora</b>	<b>A-1</b>
<b>B Publikační činnost autora</b>	<b>B-1</b>
<b>C Fotografická dokumentace</b>	<b>C-1</b>
<b>D Komentované zdrojové kódy</b>	<b>D-1</b>
D.1 Nastavení PhidgetBridge . . . . .	D-1
D.2 Hlavní funkce . . . . .	D-3
D.3 Kalibrace . . . . .	D-5
D.4 Čtení dat z Json souboru . . . . .	D-7
D.5 Sběr dat . . . . .	D-8

# Seznam zkratk a symbolů

## Seznam zkratk

AM	Aditivní výroba (Additive manufacturing)
API	Rozhraní pro programování aplikací
BJ	Technologie vstřikování pojiva (Binder Jetting)
BP	Biotisk (Bioprint)
CLIP	Continuous Liquid Interface Production
CMOS	Complementary metal–oxide–semiconductor
DLP	Digital Light Processing
DMD	Digitální mikrozrcadlové zařízení (Digital Micromirror Device)
DMLS	Technologie přímého spékání laserem (Direct Metal Laser Sintering)
EFF	Technologie vytlačování materiálu (Extrusion Forming)
ET	Testování vířivými proudy (Eddy Current Testing)
EUV	Extrémní ultrafialové záření (Extreme ultraviolet radiation)
FDM	Fused Deposition Modeling
FEP	Fluorovaný ethylen-propylen
FPI	Fluorescenční penetrační zkoušky (Fluorescent Penetrant Inspection)
FS	Fakulta strojní Technické univerzity v Liberci
I/O	Vstupně-výstupní rozhraní
IC	Integrovaný obvod (Integrated circuit)
IoT	Internet věcí (Internet of Things)
IP	Inject print

KSA	Katedra výrobních systémů a automatizace
LCD	Displej z tekutých krystalů (Liquid crystal display)
LED	Elektroluminiscenční dioda (Light-emitting diode)
LSI	Polovodičové integrované obvody s vyšší mírou integrace (Large-scale integration)
MPI	Magnetická prášková metoda (Magnetic Particle Testing)
MPSL	Stereolitografie s promítáním masky (Mask Projection Stereolithography)
NDE	Nedestruktivní testování (Nondestructive Evaluation)
NDLP	Ovládací software tiskárny NanoDLP
PDMS	Polymer organického původu s křemíkovým základem (Polydimethylsiloxan)
PMMA	Polymethylmethakrylát
RAM	Polovodičová paměť s přímým přístupem (Random-access memory)
RAMPS	Násuvná deska určená k řízení 3D tiskárny RepRap
RPi	Mikropočítač Raspberry Pi
SGS	Studentská grantová soutěž
SL, SLA	Stereolitografie
SLM	Selektivní tavení laserem (Selective Laser Melting)
SLS	Selektivní spékání laserem (Selective Laser Sintering)
SoC	Systém na čipu (System on chip)
SSH	Kryptografický síťový protokol (Secure Shell)
TGA	Termogravimetrická analýza
TUL	Technická univerzita v Liberci
UV	Ultrafialová část elektromagnetického spektra

### **Seznam symbolů**

[F]	Koncentrace fotoiniciátoru (viz rovnice 2.5.5 na stránce 32)
[M]	Koncentrace monomeru v polymeračním systému (viz rovnice 2.5.6 na stránce 32)

$[P\cdot]$	Koncentrace formujících se řetězců polymeru s otevřenou radikálovou vazbou (viz rovnice 2.5.6 na stránce 32)
$\Delta d$	Hodnota smrštění (viz rovnice 5.3.1 na stránce 86)
$\epsilon$	Molární absorpční koeficient (viz rovnice 2.5.5 na stránce 32)
$\lambda$	Vlnová délka světla (viz rovnice 2.7.2 na stránce 42)
$\Phi$	Kvantový výtěžek světla (viz rovnice 2.5.4 na stránce 32)
$a$	Tloušťka absorbující vrstvy (viz rovnice 2.5.5 na stránce 32)
$b$	Posun kalibrační přímky (viz rovnice 4.3.2 na stránce 74)
$C_d$	Hloubka polymerizace (viz rovnice 2.5.1 na stránce 30)
$d_0$	Tloušťka stěny před spékáním (viz rovnice 5.3.1 na stránce 86)
$d_1$	Tloušťka stěny po spékání (viz rovnice 5.3.1 na stránce 86)
$d_{50}$	Průměrná velikost keramických částic (viz rovnice 2.7.2 na stránce 42)
$D_p$	Hloubka penetrace světla (viz rovnice 2.5.1 na stránce 30)
$F$	Odleповací síla (viz rovnice 4.3.2 na stránce 74)
$F_r$	Rozsah snímače (viz rovnice 4.3.1 na stránce 73)
$F_{max}$	Maximální přípustná hodnota odleповací síly (viz obrázek 4.8 na stránce 69)
$F_{min}$	Minimální přípustná hodnota odleповací síly (viz obrázek 4.8 na stránce 69)
$I_0$	Intenzita dopadajícího světla (viz rovnice 2.5.1 na stránce 30)
$I_a$	Intenzita pohlceného světla (viz rovnice 2.5.4 na stránce 32)
$I_c$	Minimální iniciační intenzita světla (viz rovnice 2.5.1 na stránce 30)
$K$	Statické zesílení (citlivost) (viz rovnice 4.3.1 na stránce 73)
$k_p$	Koeficient propagace (viz rovnice 2.5.6 na stránce 32)
$k_t$	Koeficient terminace (viz rovnice 2.5.7 na stránce 33)
$k_t^d$	Konstanta poměru reakcí končících disproportionací (viz rovnice 2.5.7 na stránce 33)
$k_t^r$	Konstanta poměru reakcí končících rekombinací (viz rovnice 2.5.7 na stránce 33)
$l$	Vzdálenost mezi keramickými částicemi (viz rovnice 2.7.2 na stránce 42)

$m$	Sklon kalibrační přímky (viz rovnice 4.3.1 na stránce 73)
$n_0$	Index lomu čistého fotopolymeru (viz rovnice 2.7.2 na stránce 42)
$n_p$	Index lomu fotopolymeru s keramikou (viz rovnice 2.7.2 na stránce 42)
$S$	Koeficient rozptýlení světla (viz rovnice 2.7.1 na stránce 42)
$s$	Plocha vrstvy (viz obrázek 4.8 na stránce 69)
$v_i$	Rychlost iniciace (viz rovnice 2.5.4 na stránce 32)
$V_m$	Napětí naměřené na můstku (viz rovnice 4.3.2 na stránce 74)
$v_p$	Rychlost propagace (viz rovnice 2.5.6 na stránce 32)
$v_t$	Rychlost terminace (viz rovnice 2.5.7 na stránce 33)
$V_{nap}$	Napájecí napětí tenzometrického můstku (viz rovnice 4.3.1 na stránce 73)
$\varepsilon$	Nejistota měření (viz obrázek 4.8 na stránce 69)



## Seznam obrázků

2.1	Zájem v průběhu času o výraz "3D print" (modrá křivka) a "Additive manufacturing" (červená křivka) . . . . .	21
2.2	Zařazení DLP tisku mezi ostatními technologiemi aditivní výroby . . . . .	22
2.3	Technologie klasické stereolitografie . . . . .	23
2.4	Technologie stereolitografie s promítáním masky . . . . .	24
2.5	DMD deska (a) a pole mikroskopických zrcadel (b) . . . . .	25
2.6	Uspořádání mikrozrcadel na DMD desce . . . . .	26
2.7	DLP tisk směrem dolů . . . . .	27
2.8	DLP tisk směrem nahoru . . . . .	29
2.9	Schematické znázornění konstitučních jednotek v molekule: a) monomeru; b) oligomeru (prepolymeru); c) polymeru . . . . .	38
2.10	Molekulární struktury polymerů: a) lineární; b) rozvětvená; c) síťovaná . . . . .	39
2.11	Proces tisku keramických výrobků DLP technologií . . . . .	43
2.12	Tepelné zpracování keramického materiálu Porcelite . . . . .	45
2.13	Termogravimetrická analýza materiálu Porcelite . . . . .	46
3.1	Průchod světla DMD deskou . . . . .	49
3.2	Momentová charakteristika motoru EzM série 60 . . . . .	51
3.3	Řídicí systém DLP tiskárny . . . . .	52
3.4	Platformy DLP tiskárny . . . . .	55
3.5	Nádoba tiskárny s fotopolymerem . . . . .	57
3.6	Webové rozhraní ovládacího softwaru tiskárny . . . . .	58
4.1	Přísavka vzniklá během tisku modelu . . . . .	64
4.2	Umístění tenzometru v tiskové soustavě . . . . .	65
4.3	Maximální hodnoty sil v jednotlivých vrstvách . . . . .	65

4.4	Průběh sil pro každou vrstvu modelu v čase . . . . .	66
4.5	Schematické znázornění jednoduchého algoritmu detekce chyb . . . . .	67
4.6	Velikost síly odlepování a plochy vrstvy v závislosti na pořadí vrstvy modelu . . . . .	68
4.7	Vrstvy modelu pro průběh síly zobrazený na obrázku 4.6 . . . . .	69
4.8	Schématické znázornění komplexního algoritmu detekce chyb . . . . .	70
4.9	Měřicí řetězec pro systém NDE . . . . .	71
4.10	Umístění (a) a zapojení (b) tenzometrů u použitého snímače síly . . . . .	72
4.11	Lineární závislost mezi silou a napětím na snímačích . . . . .	75
5.1	Měřicí stand na měření intenzity záření . . . . .	79
5.2	Relativní intenzita záření pro kancelářský DLP projektor na projekční ploše 59,4 x 33,8 mm [A4] . . . . .	80
5.3	Relativní intenzita záření pro průmyslový DLP projektor [A4] . . . . .	81
5.4	Modely tisknuté během experimentů . . . . .	82
5.5	Maximální hodnoty síly odlepování pro čtyři pokusy . . . . .	83
5.6	Model pro zkoušky smrštění . . . . .	84
C.1	Tiskárna bez krytu . . . . .	C-1
C.2	Platforma s otvory a uchycení ke konzole . . . . .	C-2
C.3	Nádoba tiskárny . . . . .	C-2
C.4	Elektronické komponenty tiskárny . . . . .	C-3
C.5	Keramické modely . . . . .	C-4
C.6	Modely vytištěné z různých fotopolymerů . . . . .	C-5

## Seznam tabulek

2.1	Inhibitory, které brání polymerizaci . . . . .	34
2.2	Fotoiniciátory pro radikálovou polymerizaci . . . . .	37
2.3	Fotoiniciátory pro kationovou polymerizaci . . . . .	37
2.4	Skupiny vhodné k fotopolymerizaci monomerů . . . . .	39
3.1	Základní parametry testovaných projektorů . . . . .	49
3.2	Základní parametry řídicího mikropočítače . . . . .	53
3.3	Nastavitelné parametry tisku . . . . .	60
4.1	Parametry a specifikace PhidgetBridge . . . . .	74
5.1	Parametry tisku skupin modelů . . . . .	85
5.2	Přírůstky a smrštění u keramického tisku . . . . .	86

# 1 Úvod

Stoupající náročnost průmyslových továren a zvyšující se nároky na kvalitu konečných výrobků stimulují pokrok technologií a výrobních postupů. Avšak aplikace nově vznikajících technologií v praxi bývá často opožděna. Jedním z hlavních důvodů bývá neochota firem financovat použití patentované technologie vzhledem k následnému zvýšení ceny konečného výrobku a možného snížení jeho konkurenceschopnosti.

Například létající člunek, jeden z klíčových výrobků první průmyslové revoluce, byl patentován v roce 1733 Johnem Kayem [1]. Rozšíření ve tkacích strojích získal až v 50. letech 18 století, po uplynutí doby účinnosti patentu. Podobných případů patentového zdržení rozvoje průmyslu je známo víc a jedním z nich je právě technologie aditivní výroby (AM).

S končící účinností jednotlivých patentů na technologii Fused Deposition Modeling (FDM) v roce 2009 [2] se začal v široké společnosti projevovat zájem o oblast 3D tisku. Neustále roste počet samotných technologií a také rozmanitost tiskáren postavených na jejich základu. Obecně známé jsou například FDM, Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Inject print (IP), Biotisk (BP) a Stereolitografie (SLA) [3]. Velká konkurence a požadavky z průmyslu nutí výrobce tiskáren ke zvyšování kvality vytištěných dílů a také ke zrychlování procesu samotného tisku. Probíhá velice intenzivní výzkum, objevují se nové metody rozšiřující hranice používaných materiálů a zlepšující kvalitu a rychlost tisku.

Je obecně známo, že rychlost tisku je problematickou záležitostí aditivní výroby. Některé firmy se při zavádění AM potýkají také s komplikacemi při ověřování vytištěných komponent a certifikací výsledných výrobků [4]. U kusové výroby prototypových dílů rychlost a bezchybná kvalita nejsou většinou natolik zásadními záležitostmi, ale pokud například Airbus ve svém letadle A350 XWB používá již 1000 vytištěných dílů [5, 6], jsou otázky kvality vytištěných dílů a certifikovatelnosti finálního výrobku zásadní.

Firma Adidas, celosvětový výrobce sportovního oblečení, nově sériově tiskne podrážky některých typů sportovních bot. Na konci roku 2018 plánovala dodat na trh až 100 tis. párů bot s tištěnými komponenty. Z důvodu velkého množství používají k výrobě nejrychlejší existující technologii aditivní výroby. Jedná se o nejnovější DLP (Digital Light Processing) tiskárny pracující na základě technologie Continuous Liquid Interface Production (CLIP) od firmy Carbon [7]. Do roku 2020 plánuje firma postavit dvě továrny, jednu v EU, druhou v USA. Továrny budou plně automatické a základem výroby bude pouze AM. Je plánováno, že tyto tiskárny budou tisknout 500 tis. párů podrážek ročně [8].

## 1.1 Cíle disertační práce

V rámci jednotlivých konzultací s odborníky v oblasti aditivní výroby a průzkumu existujících technologií a patentů, byly stanovené hlavní cíle práce.

- Navrhnout 3D DLP tiskárnu v malém provedení.

Výhoda této metody tisku spočívá především v přesnosti a rychlosti v porovnání s jinými metodami. Jednou z hlavní cílovou skupinou pro použití navržené tiskárny je dentální medicína, hlavně výroba zubních náhrad, u níž je potřeba rychlého, levného a přesného zhotovení modelů na míru.

- Navrhnout systém detekce chyb pro 3D tiskárnu.

Systém detekce chyb během tisku by měl ušetřit čas tisku a materiál, zároveň však chránit tiskárnu před prací v chybovém stavu. Zvolený typ tiskáren je hodně citlivý na chyby vznikající při odlepování stavěného modelu od platformy či nedostatečného osvětlení dané tisknuté vrstvy.

- Tiskárna musí být navržena pro tisk velkého spektra volně dostupných fotopolymerů.

Komericializace 3D tiskáren vede k zamezení možnosti použití konstrukčních materiálů od jiných výrobců, ačkoliv ve své podstatě použití jiných materiálů žádné škody pro samotný stroj nenese. Tímto způsobem výrobci mohou snížit cenu samotného stroje a zdražit provoz tiskárny navýšením ceny používaných materiálů, stejně tak, jak je to u klasických kancelářských tiskáren.

- Tiskárna musí umožňovat přístup přes internet a musí mít možnost monitoringu tisku a kontroly bez fyzického kontaktu obsluhy s tiskárnou.

Vzhledem k poměrně dlouhé době tisku u všech AM technologií je potřeba zajistit možnost ovládání postavené tiskárny bez přítomnosti obsluhy na pracovišti. Tiskárna by také měla odpovídat konceptu Internet of Things (IoT) [9] a průmyslu 4.0 [10, 11].

- Technologie použité v tiskárně musejí být zvoleny tak, aby nenastaly patentové kolize při případné komercializaci výsledku v České republice a EU.

Aby byla možnost zajistit další komercializaci buď celého stroje nebo technologií, které vznikly během vývoje tiskárny, neměly by nastat patentové kolize v metodách a řešeních použitých v navrženém prototypu tiskárny.

## 1.2 Motivace

Technologie aditivní výroby dovolují vyrábět tvarově složité komplexní modely s velkou úsporou materiálu rovnou z 3D dat.

Katedra výrobních systémů a automatizace (KSA) se již od roku 2001 zabývá technologií aditivní výroby. Výzkum v této oblasti původně spočíval v testech nových materiálů a nových technologií pro výrobu specializovaných prototypů. Dále se zaměstnanci aktivně věnují zavádění těchto technologií do průmyslové praxe. Od roku 2013 se progresivně rozvíjí Laboratoř prototypových technologií a procesů. Tato laboratoř v současné době disponuje strojním vybavením za více jak 30 mil. Kč. Díky tomu může nabízet jak komplexní služby v oblasti smluvního výzkumu, tak i v oblasti projektové – čistě vědecké.

V roce 2014 byla na TUL pod vedením Dr. Zeleného a Dr. Šafky představena první tiskárna na základě technologie DLP. Jednalo se o studentský projekt, během kterého byla navrhnutá základní konstrukce stroje. Autor této práce byl zapojený do tohoto projektu v poslední fázi projektu v rámci týmu, který měl za úkol navrhnout elektronickou část stroje, oživit ho a připravit pro Mezinárodní strojírenský veletrh v Brně. Stroj byl předním exponátem Fakulty strojní a měl velký úspěch mezi návštěvníky. Tato tiskárna měla historickou hodnotu pro Fakultu strojní, protože byla první 3D tiskárnou postavenou na univerzitě.

Další rok byl podán do Studentské grantové soutěže (SGS) návrh projektu na pokračování výzkumu v této oblasti, u kterého byl autor této práce hlavním řešitelem. Projekt získal podporu Fakulty strojní v letech 2015–2018.

## 2 Přehled současného stavu

V této kapitole je uveden stručný přehled technologií, metod a teoretických poznatků nezbytných k pochopení zaměření této disertační práce. Naplň kapitoly lze také pojmenovat teoretickou částí práce, která je velice provázaná s praktickou částí, a občas odkazuje na realizaci těchto teoretických poznatků v praktických aspektech práce. Čtenářům, kteří jsou odborníky v oblasti aditivní výroby a mají přehled o stereolitografii v 3D tisku a chemii fotopolymerů, se však mohou některé podkapitoly zdát dost obecné.

Rešeršní část práce je obsažena v jednotlivých částech této kapitoly a vyskytuje se napříč celou prací. Je to vyvoláno snahou autora dosáhnout provázanosti práce pro jednodušší čtení. Proto pro představu o současném stavu problematiky tisku je doporučeno přečíst celou práci.

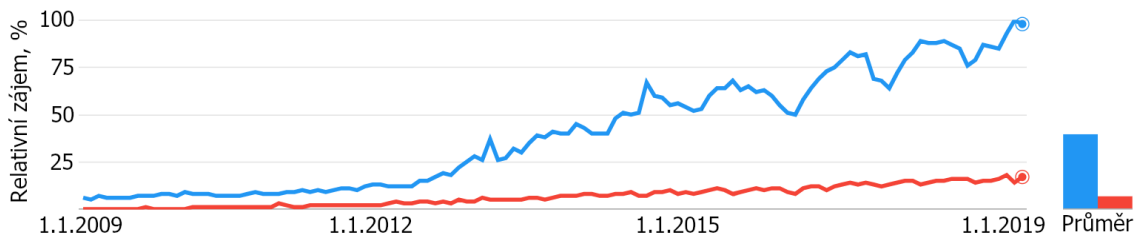
### 2.1 Aditivní výroba a 3D tisk

Standard ISO/ASTM 52900 definuje aditivní výrobu jako proces spojování materiálů za účelem vytvoření dílů z 3D dat, obvykle vrstva po vrstvě na rozdíl od tradiční (sekvencní) výroby. Dalším známým názvem, který vznikl s rozšířením technologií AM, je 3D tisk. Podle ISO/ASTM 52900 je to výroba objektu pomocí vkládání materiálu s použitím tiskové hlavy, trysky nebo jiné tiskové technologie. Tento pojem se častěji používá v netechnickém kontextu většinou jako synonymum aditivní výroby a je asociován s levnějšími nekomerčními stroji [12]. Přestože aditivní výroba je oficiální název, pojem 3D je jejím ekvivalentem, který se více využívá.

Na obrázku 2.1 jsou znázorněna celosvětová data ze služby Google Trends za období od začátku roku 2009 do začátku roku 2019. Data obsahují relativní počet vyhledávání výrazu "3D print" a "Additive manufacturing" přes servisy Google. Vyraz aditivní



výroba je vyhledáván několikanásobně méně, proto se v této práci ve většině případů bude nadále používat rozšířenější pojem 3D tisk.



Obrázek 2.1: Zájem v průběhu času o výraz "3D print" (modrá křivka) a "Additive manufacturing" (červená křivka)

Podle výše zmíněného standardu ISO/ASTM 52900 jsou všechny existující technologie AM zařazeny do sedmi skupin.

1. Vytlačování materiálu (Material extrusion) - technologie aditivní výroby, u které je materiál selektivně dávkován přes trysku nebo otvor.
2. Vstřikování materiálu (Material jetting) - technologie aditivní výroby, u které jsou kapky stavebního materiálu selektivně nanášené přes speciální trysky.
3. Vstřikování pojiva (Binder jetting) - technologie aditivní výroby, u které je pojivo selektivně nanášené za účelem vázání práškových materiálů.
4. Listová laminace (Sheet lamination) - technologie aditivní výroby, u které jsou listy materiálu spojené do tvaru modelu.
5. Fotopolymerizace v nádobě (Vat photopolymerization) - technologie aditivní výroby, při které se tekutý fotopolymer v nádobě selektivně vytvrzuje působením aktivačního záření.
6. Tavení prášku v nádobě (Powder bed fusion) - technologie aditivní výroby, u které tepelná energie selektivně taví oblasti prášku v nádobě.
7. Přímá energetická depozice (Direct energy deposition) - technologie aditivní výroby, u které se tepelná energie určená k tavení materiálu přidává ve fázi jeho nanášení.

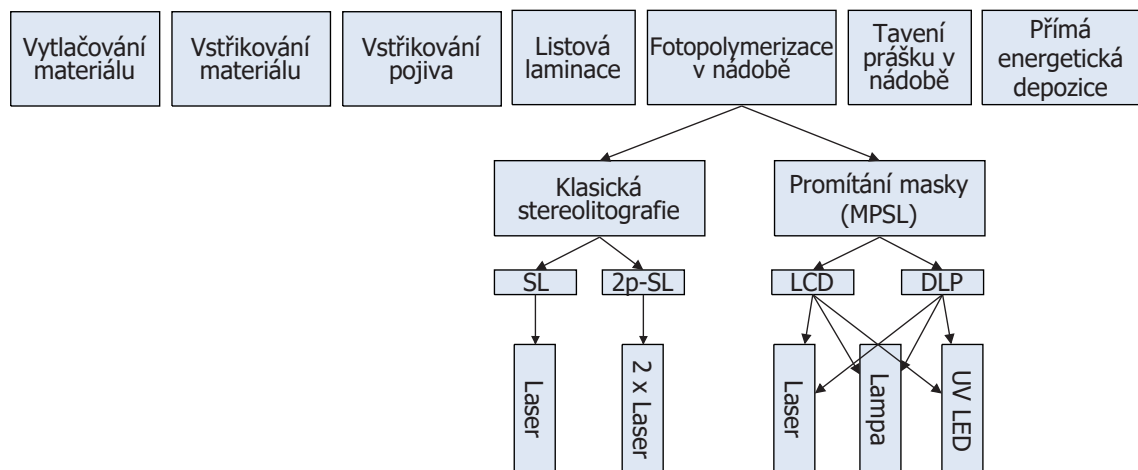
Technologie DLP tisku spadá pod kategorii fotopolymerizace v nádobě a patří ke skupině stereolitografických technologií s promítáním masky (MPSL). V podkapitole 2.2.2 jsou popsány základní principy této technologie. Více informací o procesu tisku a jednotlivých částech DLP systému se nachází v kapitole 2.3. V kapitole 2.4 jsou popsány různé způsoby realizace této technologie.

## 2.2 Fotopolymerizace v nádobě

Název fotopolymerizace v nádobě vznikl poměrně nedávno při vývoji standardu ISO/ASTM52900. Rozdělení do těchto jednotlivých skupin bylo zvoleno z hlediska způsobu vytváření fyzického modelu z 3D dat.

Technologie fotopolymerizace používá jako stavební materiál roztoky fotopolymérů, které jsou schopné se polymerizovat pod vlivem elektromagnetického záření určité délky. Nejvíce rozšířeným typem záření používaným pro fotopolymerizaci je ultrafialové (UV) záření.

Pod názvem fotopolymerizace v nádobě jsou zahrnuté všechny způsoby stereolitografie a jejich různé kombinace. Ve starší literatuře pojem stereolitografie zahrnuje všechny technologie, které dnes podle standardu nazýváme fotopolymerizace v nádobě [3]. Pro předcházení dvojsmyslnosti v dalším výkladu, bude pod pojmem klasická stereolitografie míněna historicky první technologie vytvrzování polymeru laserovým paprskem.



Obrázek 2.2: Zařazení DLP tisku mezi ostatními technologiemi aditivní výroby

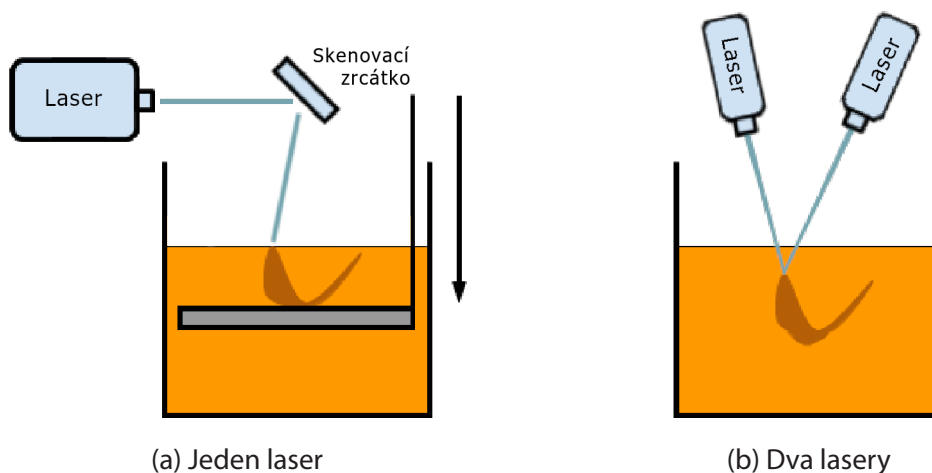
Na obrázku 2.2 je zobrazeno zařazení technologie DLP tisku mezi ostatní technologie aditivní výroby.

### 2.2.1 Klasická stereolitografie

Technologie aditivní výroby vznikla v roce 1983, kdy Chuck Hull poprvé otestoval vytvrzování nátěru stolní desky pomocí UV záření od laseru podobnému tomu, který se používá u klasické laserové tiskárny. Proces dostal v roce 1986 na základě patentu název stereolitografie (SL, SLA) [13]. Tiskárny tohoto typu používaly UV laser pro vytvrzování roztoku fotopolymeru. Laser byl umístěn nad vanou se stavebním materiálem. Paprsek se pohyboval a vytvrzoval fotopolymer bod po bodu. Po vytvrzení vrstvy se platforma pohybovala směrem dolů a proces začínal znovu v další vrstvě. Největší nevýhoda této metody spočívala v nutnosti použití nádrže plné stavebního materiálu, což není ekonomicky výhodné. Schematické znázornění technologie SL je zobrazeno na obrázku 2.3a. Na obrázku 2.3b je schematicky znázorněna SL technologie s použitím dvou laserů, kde k fotopolymerizaci dochází v bodu průsečíku dvou laserových paprsků.

První komerční SL tiskárny byly vyráběny firmou Sony/D-MEC od roku 1988, výroba trvala až do roku 2007. Vynálezce 3D tisku Chuck Hull v roce 1986 založil společnost 3D Systems, která je teď jednou z největších firem v oblasti 3D tisku. Výnosy firmy v roce 2015 činily 666 milionů amerických dolarů [12].

Rozvoj a komercializace tohoto odvětví měly pozitivní efekt nejen na samotný vý-



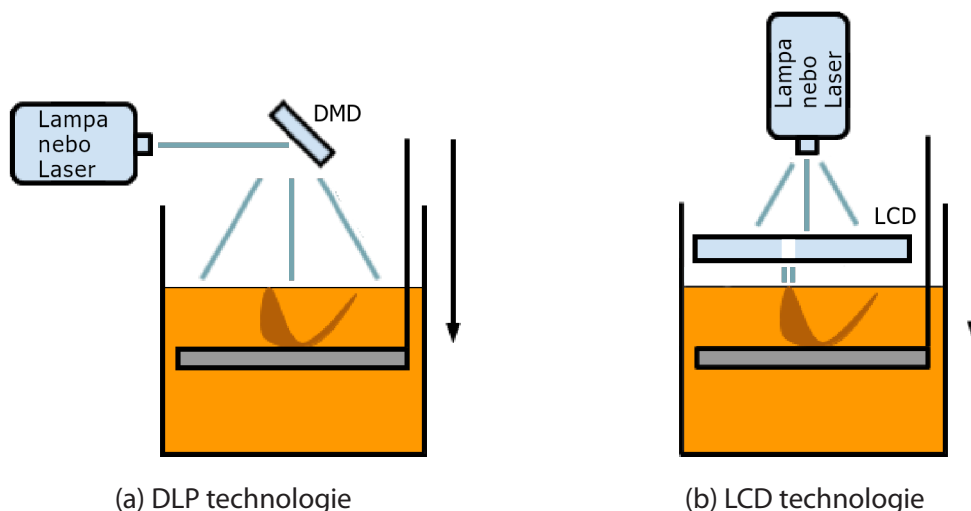
Obrázek 2.3: Technologie klasické stereolitografie

voj tiskáren, ale i na vývoj materiálů pro SL technologii. Pokrok, ale nebyl příliš velký. Kvůli vysoké ceně počet prodaných tiskáren v tomto období dosahl celosvětově pouze několika stovek kusů.

Dalším známým zástupcem technologie klasické stereolitografie v poslední době je firma Formlabs s jejich první tiskárnou Form 1. Projekt v roce 2012 získal finanční podporu ve výši 3 milionů amerických dolarů přes skupinové financování [14].

### 2.2.2 Stereolitografie s promítáním masky

Stereolitografie s promítáním masky se od technologie klasické stereolitografie liší tím, že se celá vrstva stavěného modelu promítá najednou s použitím takzvané masky [15]. Pro vytvoření masky je zapotřebí další zařízení, které poupraví na něj dopadající světlo ze zdroje energie takovým způsobem, aby byl obraz co nejvíce podobný vzoru tisknuté vrstvy. Zdrojem energie, která spouští reakci polymerizace, může být jak klasický UV laser, tak i lampa nebo UV LED. Na rozdíl od klasické SL zdroj energie by musel poskytnout záření větší intenzity, protože je místo jednoho bodu vytvrzována celá vrstva.



Obrázek 2.4: Technologie stereolitografie s promítáním masky

Na obrázku 2.4 jsou schematicky zobrazené principy tisku dvou technologií MPSTL. Na obrázku 2.4a je zobrazeno schéma technologie DLP tisku, u které záření od zdroje prochází speciálním polem mikrozrcadel (DMD deska) pohybujících se v magnetickém poli a schopných se naklápět na určitý úhel. V místech, kde se světlo odráží od zrcadel a prochází ven přes výstupní optiku, fotopolymer reaguje - tvrdne. V místech, kde se

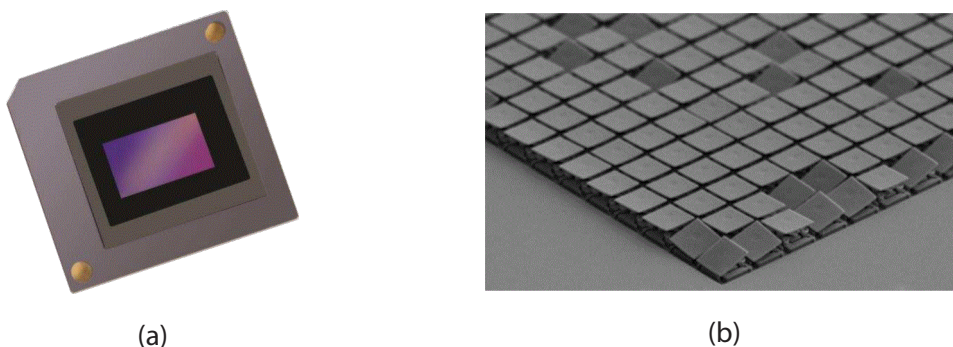
světlo odráží jiným směrem než do výstupní optiky a zůstává uvnitř systému, polymer zůstává tekutý. Více informací o technologii DLP se nachází v podkapitole 2.3.

Na obrázku 2.4b je znázorněn princip technologie MPLS, kde se místo mikrozrcadel používá LCD obrazovka, která je u jednodušších řešení zdrojem světla a zároveň vytváří masku vrstvy. U komplikovanějších strojů LCD se používá jako clona, která umí přikrýt polymer v potřebných místech, aby se k němu nedostalo záření z lampy nebo laseru.

## 2.3 Digital Light Processing

Název DLP je zkratkou pro Digital Light Processing. Je to technologie generování obrazu, která byla v roce 1986 patentována firmou Texas Instruments, Inc. [16]. Používá se v projektorech, 3D skenerech, aplikacích strojového vidění, průhledových displejích aut atd. [17]. Její princip spočívá v generování obrazu pomocí velkého množství zrcadel otáčejících se v magnetickém poli. Zrcadla jsou mikroskopická, přičemž každému odpovídá jeden nebo více pixelů na generovaném obrázku. Jsou umístěna na speciální desce, která má název Digitální mikrozrcadlové zařízení (DMD). Zrcadla a samotná DMD deska jsou zobrazené na obrázku 2.5 [18].

### 2.3.1 Deska mikroskopických zrcadel



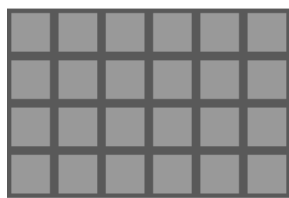
Obrázek 2.5: DMD deska (a) a pole mikroskopických zrcadel (b)

DMD je srdcem celého systému generování obrazu. Je to dvoustavový prostorový modulátor světla, který se skládá z řady mikrozrcadel umístěných nad modulem CMOS paměti. Každé zrcadlo je řízeno zvlášť pomocí dat posílaných do buňky paměti pod ním. Data v paměti elektrostaticky ovládají úhel naklonění zrcadla, které se může naklonit na

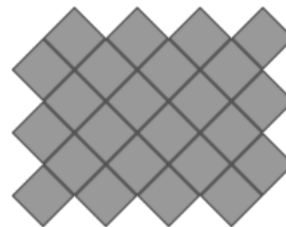
kladný nebo záporný uhel od ploché roviny. Ve vypnutém stavu (bez napětí) se zrcadla nachází v počáteční poloze (Flat state) [19].

Zrcadlo může být naklopeno tak, aby odrazilo světlo na výstupní čočku projektoru (On state) nebo na speciální chladič (Off state), který odebírá teplo. Při odrazu světla do čočky projektoru na výstupu projektoru dostaneme osvětlený pixel, v opačném případě je pixel neosvětlený [20]. Pokud je potřeba dostat určitou intenzitu šedé barvy, zrcadlo se přepíná mezi čočkou a chladičem s velkou frekvencí [16]. Pro dosažení rozlišení 4K Ultra High Definition (UHD) se v dnešní době používá deska s 8,3 miliony zrcadel na jednom DMD čipu [21]. Je to deska se zatím největším počtem mikrozrcadel.

Existují dvě varianty umístění zrcadel na čipu. Mohou být umístěny tak, aby byla hrana zrcadla vodorovná vůči hraně samotného čipu (ortogonální uspořádání) nebo otočena na takový úhel, aby byla diagonála zrcadla vodorovná vůči hraně čipu (diamantové uspořádání). Diamantové uspořádání bylo vymyšleno pro úsporu místa na desce, protože dovolilo nechat menší mezery mezi jednotlivými zrcadly a tím zmenšit její plochu [22]. Také desky s diamantovou orientací zrcadel mohou výsledně poskytovat mnohem preciznější obraz než ortogonální [23]. Na obrázku 2.6 jsou schematicky zobrazeny dva výše zmíněné způsoby uspořádání.



(a) Ortogonální



(b) Diamantové

Obrázek 2.6: Uspořádání mikrozrcadel na DMD desce

U DMD desek s ortogonálním rozmístěním zrcadel se poměr stran obrazu u tiskárny, která je na základě desky postavena, počítá jednoduchým dělením počtu zrcadel ve vodorovné rovině ku počtu zrcadel ve svislé rovině. U čipů s diamantovým rozmístěním se to určuje jiným způsobem proto, že sloupce u těchto čipů nejsou rovné a jsou ve tvaru klikaté čáry. Při použití DMD desky s diamantovým uspořádáním je potřeba předběžně přepočítávat obraz pro správné výsledné zobrazování. Také existují metody používající šablony pro převod obrazu na diamantovou orientaci zrcadel, ty však jsou

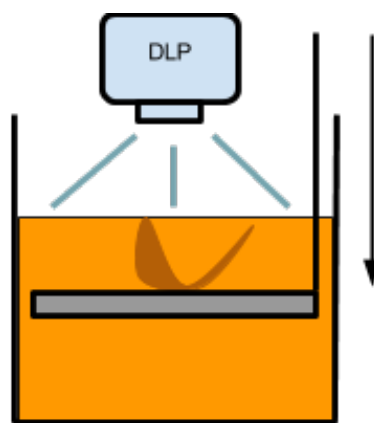
efektivní jen při výrazně vyšším rozlišení vstupního signálu než je rozlišení DMD desky [23].

## 2.4 Typy DLP tiskáren

V této podkapitole jsou popsány dva typy provedení DLP tiskáren. Každý z nich má svoje výhody a nevýhody. Proto pro navrhovanou tiskárnu byl zvolen typ popsáný v podkapitole 2.4.2. Důvody volby tohoto typu jsou popsány na konci zmíněné podkapitoly.

### 2.4.1 Tisk směrem dolů

Metoda je velmi podobná klasické SL technologii, liší se jenom zdrojem světla. Místo laseru se používá DLP projektor, který v každé vrstvě vytvoří kompletní obraz. Bílou barvou jsou vyobrazena místa, ve kterých je potřeba polymerizovat tiskový materiál. DLP projektor je umístěn v horní části tiskárny. Ve výchozí poloze je platforma jen mírně ponořena do nádoby s fotopolymerem. Při tisku první vrstvy modelu projektor osvětluje platformu, na které je umístěno malé množství materiálu. Prvních několik vrstev je obvykle osvětlováno delší dobu, aby se vytvrzený materiál přilepil na platformu. Poté se platforma posouvá směrem dolů, přičemž horní vytvrzená vrstva je znovu pokryta fotopolymerem. Projektor promítá další vrstvu modelu, čímž způsobuje tvrdnutí fotopolymeru v dané vrstvě. Proces se opakuje tolikrát, na kolik vrstev je model rozdělen. Na konci tisku je model úplně ponořen do nádoby s fotopolymerem [7].



Obrázek 2.7: DLP tisk směrem dolů

Polymerizace celé vrstvy modelu najednou zrychluje tisk v porovnání s klasickou SL tiskárnou. Další výhodou je tvorba modelu na hladině fotopolymeru, díky čemuž nedochází ke kontaktu nové vrstvy s čímkoliv kromě předchozí vrstvy. V důsledku je dosažen nepřetržitý proces tisku. Tisk na hladině polymeru na druhou stranu způsobuje nevýhodu v tom, že se z atmosféry do fotopolymerního roztoku dostává kyslík, který je inhibítorem reakce, a brání polymerizaci (viz podkapitola 2.5.3). Další nevýhodou dané metody tisku je potřeba většího množství stavebního materiálu. Tisková nádoba musí být naplněna alespoň do výšky tisknutého modelu. Kvůli ponořování platformy s modelem dochází ke změně hladiny stavebního materiálu, a tím k nepřesnosti ve svislé ose. Další nevýhoda spočívá v tom, že v dutinách tisknutého modelu zůstává nevytvrzený polymer, který je poté potřeba následně odstranit.

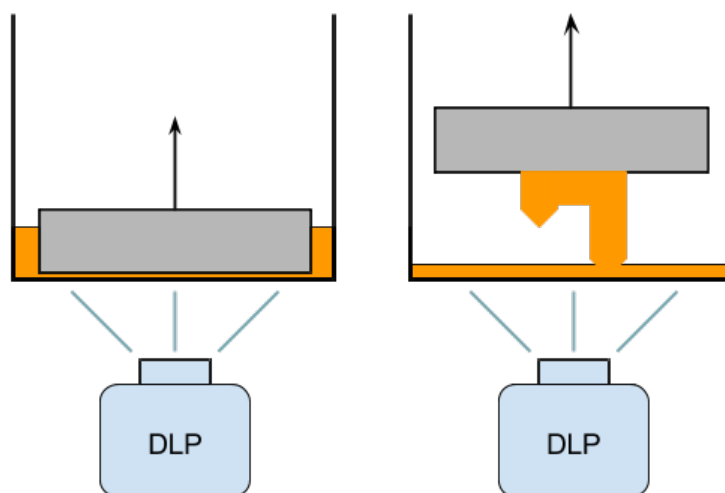
## 2.4.2 Tisk směrem nahoru

U tohoto typu tiskáren, jak je již zřejmé z názvu, se platforma během tisku pohybuje směrem nahoru. DLP projektor je umístěn v dolní části tiskárny a osvětluje nádobu s fotopolymerem přes speciální průhledné dno. Platforma je na začátku tisku v nádobě ponořena co nejnižší a leží na průhledném dně. Fotopolymer v nádobě musí být v takovém množství, aby během tisku pokrýval dno. Model vzniká na dolní části platformy a postupně se vytahuje z fotopolymeru. První vrstva se polymerizuje mezi dnem nádoby a platformou. Dále se platforma posouvá směrem nahoru a „odlepuje“ vrstvu ode dna nádoby. Do mezery mezi platformou a dnem nádoby zatéká fotopolymer, který je opět osvětčován projektorem.

Takový přístup, na rozdíl od tisku směrem dolů (2.4.1), snižuje množství potřebného stavebního materiálu, který se musí nacházet v nádobě. Také není potřeba udržovat hladinu stavebního materiálu. Minimální množství materiálu v nádobě by mělo být trochu větší, než je potřeba pro stavbu modelu. Vzniká zde ale další komplikace, kterou nazýváme problematikou odlepování modelu ode dna nádrže. Každá vrstva je při polymerizaci přilepena zároveň k platformě a ke dnu nádoby. Proto se musí navrhnout řešení, které bude eliminovat síly přisání modelu ke dnu nádrže.

Existuje mnoho patentovaných a nepatentovaných způsobů odlepování, například pohyb nádoby [24, 25, 26], naklopení nádoby, pasivní naklopení [27], samo-odlepování [28]. Některé nádoby jsou pokryté silikonovým materiálem nebo fólií z fluorovaného





Obrázek 2.8: DLP tisk směrem nahoru

ethylen-propylenu (FEP), což snižuje vlastní adhezi a následně usnadňuje odlepování modelu.

Technologie nepřetržité výroby (CLIP), která je známá díky využívání DLP, má jiný postup výroby. Na rozdíl od zbytku tiskáren, nevzniká na dně nádrže této tiskárny žádná adheze mezi polymerizovanou vrstvou a průhledným dnem. Je to zapříčiněno velkou koncentrací kyslíku na dně nádrže, který se tam objevuje přes průhlednou teflonovou membránu. Díky kyslíku malá vrstva fotopolymeru, o výšce přibližně 100  $\mu\text{m}$ , netuhne a nelepí se ke dnu. Díky této vlastnosti Teflonu AF 2400 je možné tisknout kvalitní modely s výrazně vyšší rychlostí než u běžné DLP tiskárny [29].

Tiskárna postavená v rámci této práce je postavena na principu pohybu platformy směrem nahoru. Tato volba má několik závažných důvodů. Hlavním důvodem bylo to, že je u tisku směrem nahoru potřeba menší množství polymeru v porovnání s tiskem směrem dolů. Pro účely výzkumu materiálů to byl rozhodující faktor vzhledem k ceně materiálů a komplikacím v jejich vývoji. Dalším závažným důvodem je komplikace tisku z materiálů s vysokou hustotou u tiskáren typu směrem dolů. Za prvé je pohyb platformy problematický ve vysokoviskózním roztoku, za druhé hladina materiálu není vodorovná a tím se zhoršuje přesnost tisku.

## 2.5 Fotopolymery pro 3D tisk

Citlivost některých materiálů ke světlu je známa. Například judské živice nebo syrský asfalt byly známé ještě ve starověku. Vlastnost tvrdnutí a nerozpustnosti tohoto materiálu pod vlivem slunce se používala v procesu mumifikace a k zatěsnění dřevěných lodí [30]. Dalším známým využitím fotopolymerů je aplikace v prvních fotografických technikách [31]. Postupný vývoj fotopolymerních materiálů způsobil rychlý rozvoj v sofistikovaných oblastech průmyslu, obzvláště v elektronice, optice a medicíně.

Výroba polovodičových integrovaných obvodů s vyšší mírou integrace (LSI) byla umožněna litografickými technologiemi. Mikrominiaturizace dovolila umístit miliony tranzistorů do jednoho obvodu, což dovolilo o hodně zvýšit jejich rychlost a snížit cenu. Prvním integrovaným obvodem (IC) vyrobeným litografickým způsobem v roce 1960 byla polovodičová paměť s přímým přístupem (RAM). Od té doby se maximální počet komponent umístěných do jednoho obvodu zvýšil na  $10^7$ . Rozlišení výrobní technologie je limitováno vlnovou délkou použitou pro osvětlení světla. V dnešní době jsme se dostali ke hranici vlnové délky rentgenového paprsku na 13 nm. Tato oblast spektra má název extrémní ultrafialové záření (EUV), rentgenové spektrum se začíná na 10 nm. Aplikace fotopolymerů stále roste díky vývoji v této oblasti [32]. Pro aplikaci v 3D tisku je zajímavá nová rozvíjející se oblast vývoje fotopolymerů pro účely AM, kde můžeme získat tvrdý model rovnou z počítačem promítaného obrazu [33].

Jedním ze základních parametrů pro fotopolymery používající se v 3D tisku je hloubka polymerizace (ang. cure depth  $C_d$ ). Parametr ukazuje, jak tlustá vrstva fotopolymeru se polymerizuje při určité intenzitě záření. Počítá se podle Jakobsovy rovnice vyplývající z Lambertova-Beerova zákona [34]

$$C_d = D_p \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I_c}\right). \quad (2.5.1)$$

V rovnici 2.5.1 je  $D_p$  je penetrační hloubka světla,  $I_0$  je intenzita dopadajícího světla,  $I_c$  je minimální hodnota intenzity nutná k zahájení iniciace reakce.

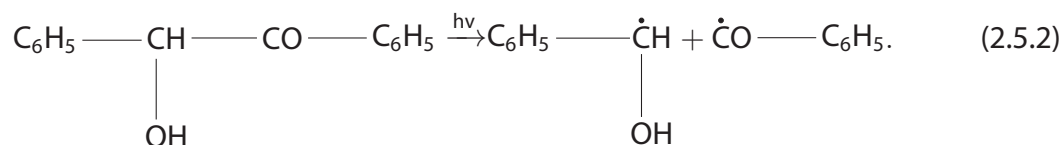
Pro fotopolymerizaci v 3D tisku se používají pouze dvě techniky: radikálová polymerizace a kationtový mechanismus. Tímto se dosahují odlišné hodnoty rozpustnosti, přilnavosti, tavného bodu a dalších fyzikálních a chemických vlastností hotového mo-

delu [32].

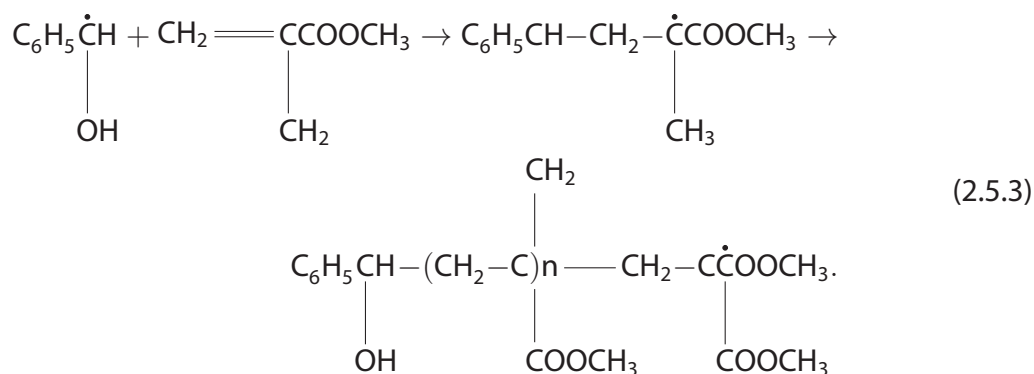
## 2.5.1 Radikálová polymerizace

Mechanismus radikálové polymerizace představuje souhrn dílčích reakcí: iniciace, propagace a terminace. Celý proces polymerizace je postavený na získání volných radikálů ke spuštění mechanismu iniciace. Pod vlivem vysoké teploty, tlaku nebo elektromagnetického záření definované délky dojde k uvolnění volného radikálu z iniciátoru. Volný radikál hledá monomer a připojuje se k němu. Tímto se otevře další radikál a připojí se další molekula monomeru. Je to propagační fáze trvající do té doby, než jeden řetěz monomeru potká další volný konec jiného řetězu. Proces růstu molekuly skončí a výsledkem je molekula polymeru. Tato poslední fáze má název terminace [35].

Fotopolymerizace je druh polymerizace, u kterého volné radikály dostaneme působením elektromagnetického záření na fotoiniciátor. Většinou se používají iniciátory, které produkují volné radikály pod vlivem UV záření. Při absorpci světelné energie dochází k disociaci vazby mezi funkčními skupinami fotoiniciátoru. Ozařováním například benzoinu dostaneme radikály 2.5.2 [32]



Vytvořené radikály iniciují polymerizaci vinylových monomerů. Methylmethakrylát je monomerem vyráběným ve velkém množství a používajícím se k polymerizaci na polymethylmethakrylát (PMMA) více známý pod názvem akrylové sklo nebo plexisklo. Reakce polymerizace methylmethakrylátu pomocí benzoinu 2.5.3 [32]



Kromě benzoinu jsou známy další fotoiniciátory, například peroxidy, azosloučeniny, aromatické ketony a aldehydy, alkylhalogenidy, disulfidy a další. Hlavní výhodou použití fotopolymerů pro stereolitografii s promítáním masky je možnost kdykoliv zastavit proces polymerizace přerušením osvětlení.

## 2.5.2 Rychlost polymerizace

Důležitým parametrem u fotopolymerů používaných v 3D tisku je rychlost fotopolymerizace. Pro výpočet času nutného k uskutečnění celé reakce je potřeba sčítat časy pro každou dílčí reakci.

**Rychlost iniciace.** Rychlost iniciace  $v_i$  je úměrná intenzitě pohlceného světla, které vyvolá disociaci vazby ve fotoiniciátoru [35]

$$v_i = 2 \cdot \Phi \cdot I_a. \quad (2.5.4)$$

kde  $\Phi$  je kvantový výtěžek světla a  $I_a$  je intenzita pohlceného světla, která je podle Lambertova-Beerova zákona

$$I_a = I_0 \cdot \left(1 - \exp[-\epsilon \cdot a \cdot [F]]\right). \quad (2.5.5)$$

kde  $I_0$  je intenzita dopadajícího světla,  $\epsilon$  je molární absorpční koeficient absorbující látky,  $a$  je tloušťka absorbující vrstvy,  $[F]$  je koncentrace fotoiniciátoru.

**Rychlost propagace.** Důležitým parametrem při polymerizaci je udržování koncentrace volných radikálů na nízké hodnotě  $10^{-8}$  až  $10^{-9}$  mol/L. Jinak rychlost propagace (2.5.6) může dosáhnout hodnoty, při které bude uvolněno příliš mnoho tepla. Při vysoké koncentraci volných radikálů může také dojít k jejich vzájemné reakci a tímto se sníží stupeň polymerizace celého systému [35]

$$v_p = k_p \cdot [P\cdot] \cdot [M]. \quad (2.5.6)$$

kde  $k_p$  je koeficient propagace,  $[P\cdot]$  je koncentrace formujících se řetězů polymeru s otevřenou radikálovou vazbou.  $[M]$  je koncentrace monomerů v polymeračním systému [35].

**Rychlost terminace.** Postupným přidáváním monomerů ke konci s otevřeným radikálem se formuje řetěz polymeru. Ukončení reakce nastane, když řetěz potká volný konec jiného řetězu. Jsou tady dvě možnosti. Mohou spolu vytvořit dlouhý řetěz nebo jeden řetěz předá atom vodíku a tím se vytvoří dvě menší makromolekuly. Vzhledem k vysoké reaktivitě radikálů je aktivační energie reakce terminace velmi nízká. Proto první je způsob s vytvářením makromolekuly sloučením řetězců (rekombinace) víc přirozený. Druhý způsob, nazývaný se disproporcionace, je energeticky náročnější. Proto poměr reakce disproporcionace vzrůstá při zvýšení teploty reakce. Rychlost reakce terminace záleží na poměru reakcí, které končí jedním nebo druhým způsobem. Tento poměr je schován do rychlostní konstanty terminace  $k_t$  v reakci 2.5.7 [35]

$$v_t = 2k_t \cdot [P\cdot]^2. \quad (2.5.7)$$

Rychlostní konstanta se skládá ze dvou konstant  $k_t^r$  a  $k_t^d$  určujících poměr reakcí končících rekombinací nebo disproporcionací. Součinitel 2 v reakci 2.5.7 ukazuje na to, že zaniknou dva formující se řetězce během reakce terminace.

### 2.5.3 Kyslíková inhibice

Zajímavou vlastností radikálové polymerizace, obzvláště pro AM, je schopnost některých látek pohlcovat volné radikály. Existuje celá řada zakázaných činidel, které zastavují polymerizaci, některé z nejvíc rozšířených jsou uvedené v tabulce 2.1 [32].

Atom kyslíku s nitrosloučeninami reaguje s radikálem polymeru. Tímto vzniká nitroradikál, který reaguje s dalším radikálem v polymeru, což vede k zastavení reakce polymerizace [36]. Samotná molekula kyslíku však také brání reakci polymerizace [37, 38, 39]. Kyslík brání polymerizaci tím, že se připojuje k volnému radikálu molekuly polymeru a vytváří radikál kyslíku, který se poté připojuje k dalšímu monomeru. Rovni-

Tabulka 2.1: Inhibitory, které brání polymerizaci

Název	Vzorec
Trinitrotoluene	$C_7H_5N_3O_6$
Benzochinon	$C_6H_4O_2$
2,5-Dichlorobenzoquinone	$C_6H_2Cl_2$
m-Dinitrobenzen	$C_6H_4N_2O_4$
Chloranil	$C_6Cl_4O_2$
Isopropylbenzen	$C_9H_{12}$

ce 2.5.8 popisuje reakci kyslíkové inhibice



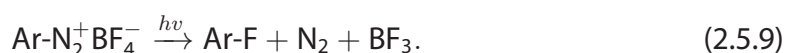
Postačující koncentrace molekul kyslíku brání procesu polymerizace je velmi nízká,  $10^{-3}$  mol/L. Vzhledem k tomu, že kyslík se uvolňuje z povrchu roztoku, k největší inhibici polymeru dochází v horních vrstvách roztoku. Proto se polymerizace v průmyslu provádí buď v dusíkové atmosféře nebo ve vakuu [32].

Na druhou stranu se kyslíková inhibice polymerizace používá v některých DLP tiskárnách, které tisknou směrem nahoru (viz podkapitola 2.4.2), ke zbavení se parazitního přilepení vytvrzené vrstvy ke dnu nádoby s fotopolymerem. Ve výsledku jsou síly nutné k odlepení modelu ode dna nádoby menší, čímž se výrazně zrychluje tisk [29, 40].

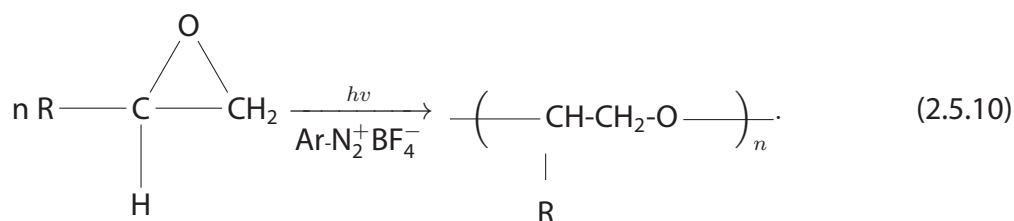
#### 2.5.4 Kationtová polymerizace

Kationtová a aniontová polymerizace jsou na rozdíl od radikálové velmi selektivní, jen některé z existujících monomerů jsou pro ně vhodné. Proto se v průmyslu používají pouze v případech, kde není možné získat potřebný polymer radikálovou polymerizací. Dalším důvodem jejich malého rozšíření v praxi je to, že jsou velmi citlivé na nečistoty v polymerním roztoku [35]. Na druhou stranu jsou kationtová a aniontová polymerizace rychlejší než radikálová a kyslík pro reakce není inhibítoem díky odlišnému charakteru iniciační fáze.

Už ze samotného názvu kationtové polymerizace je evidentní, že pro průběh reakce musejí být v polymerizačním systému přítomné stabilní kationy. Pro účely dodání kationů jsou vhodné protonové a Lewisovy kyseliny. Také se občas používají jiné silné kyseliny s méně nukleofilním aniontem, například  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{HClO}_4$  a další. Tyto silné kyseliny však iniciují reakce, u kterých většinou vznikají polymery s příliš malou molekulární hmotností. Proto jsou nejvhodnějšími iniciátory Lewisovy kyseliny [35]. Diazoniové soli jsou typické generátory Lewisových kyselin. Ozařováním UV světlem aren-diazoniumtetrafluorboritátu dostaneme Lewisovou kyselinu fluorid boritý  $\text{BF}_3$  [41]



Samotná Lewisová kyselina není schopna dodat kladně nabitou částici pro iniciaci reakce, proto zde je potřeba přidat koiniciátor, který poskytne proton nebo karbokation. Ve většině případů je koiniciátorem voda, alkohol, ether. Účinnost koiniciátoru je tím vyšší, čím snadněji se tvoří komplex s iniciátorem [35]. Reakce polymerizace alkyleneoxydu pomocí  $\text{BF}_3$  [42]



Většinou se pro kationtovou fotopolymerizaci jako základ používají epoxidy, ale také se dají polymerovat trioxany, aziridiny, alkylvinylethery a oxetany pomocí Lewisových kyselin [32].

Z pohledu 3D tisku jsou důležité vlastnosti epoxidů polymerovaných kationtovou polymerizací lepší přilnavost ke kovům, větší tuhost a malá smrštitelnost během tvrdnutí. Také je občas důležitá jejich necitlivost k přítomnému kyslíku ve fotopolymerním roztoku.

### 2.5.5 Fotoiniciátory

Pro radikálovou a pro kationtovou fotopolymerizaci jsou potřebné iniciátory reakce. Fotoiniciátory převádí světelnou energii na chemickou energii prostřednictvím formo-

vání volných radikálů nebo kationtů. U radikálové polymerizace musí iniciátor pod vlivem elektromagnetického záření určité délky poskytovat volné radikály (viz podkapitola 2.5.1), u kationtové polymerizace musí poskytovat stabilní kationy (viz podkapitola 2.5.4). Fotoiniciátory se ve výsledku rozpadají na dvě nebo více částí, přičemž jedna z nich reaguje s monomerem nebo oligomerem a spojuje je spolu.

Fotoiniciátory jsou citlivé na konkrétní vlnové délky elektromagnetického spektra a mohou být přírodní nebo chemicky syntetizované [43, 44, 45]. Fotoiniciátor ve fotopolymeru určuje vlnovou délku, při které bude probíhat polymerizace. Většina známých fotoiniciátorů jsou aktivní ve vlnových délkách UV světla. Jsou však i takové, které mají špičku absorpce světelné energie ve viditelném spektru. Fotoiniciátory se rozdělují do dvou typů. První typ je schopný poskytnout volný radikál sám od sebe, druhý k tomu potřebuje další látku, ze které může volný radikál vyprodukovat. Fotoiniciátory citlivé k UV záření mohou být jak prvního, tak i druhého typu. Citlivé k záření viditelného spektra jsou výhradně druhého typu [43, 46]. Stejně se chovají fotoiniciátory pro kationtovou polymerizaci, které vždy potřebují koiniciátor.

V tabulce 2.2 [32, 47, 48, 49] a 2.3 [32, 44] jsou uvedené nejvíc rozšířené fotoiniciátory citlivé k UV záření používané ve fotopolymerních roztocích pro 3D tisk. Vzhledem k velkému zajmu o fotopolymery v různých aplikacích a velké rozmanitosti stereolitografických tiskáren jsou také zapotřebí fotopolymery citlivé na různé délky elektromagnetického spektra. V případě potřeby pokrytí několika úseků spektra je možné smíchat několik fotoiniciátorů do jednoho roztoku. Každý z nich bude reagovat na jemu příslušnou světelnou délku a dohromady budou pokrývat větší oblast elektromagnetického spektra.

Ve fotopolymerech je mizivé množství fotoiniciátorů, odpovídají 1–2 % celkového objemu. Avšak pro správný a efektivní průběh reakce musí podle Nakamury všechny iniciátory, které se používají pro polymerizaci, splňovat šest kritérií: [32]

1. Pohlcovat UV záření.
2. Mít vysokou kvantovou efektivitu.
3. Být tepelně stabilními a nereagovat za tmy.
4. Mít dostatečnou rozpustnost v monomerech a oligomerech fotopolymeru.



5. Neměnit barvu polymeru během tvrdnutí.
6. Nebýt toxickými.

Tabulka 2.2: Fotoiniciátory pro radikálovou polymerizaci

<b>Název</b>	<b>Vzorec</b>	<b>Nejcitlivější ve vlnové délce</b>
Benzofenon	Ph <sub>2</sub> CO	210 nm
4,4-Dichlorobenzofenon	Cl <sub>2</sub> Ph <sub>2</sub> CO	250 nm
Michlerův keton	[(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NC <sub>6</sub> H <sub>4</sub> ] <sub>2</sub> CO	366 nm
Dibenzosuberone	C <sub>15</sub> H <sub>12</sub> O	270 nm
Thioxanthone	C <sub>13</sub> H <sub>8</sub> OS	380 nm
2-Isopropylthioxanthone	C <sub>14</sub> H <sub>16</sub> OS	380 nm
p-Dimethylaminoacetofenon	C <sub>10</sub> H <sub>13</sub> NO	250 nm
Benzil	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	380 nm
2-ethylantrachinon	C <sub>16</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	260 nm
Benzoin	PhCH(OH)COPh	247 nm

Tabulka 2.3: Fotoiniciátory pro kationovou polymerizaci

<b>Název</b>	<b>Vzorec</b>
Benzendiazonium hexafluorophosphate	ArN <sub>2</sub> PF <sub>6</sub>
Bzendiazonium hexafluoroarsenate	ArN <sub>2</sub> AsF <sub>6</sub>
Bzendiazonium tetrafluoroborate	ArN <sub>2</sub> BF <sub>4</sub>
N-Phenylanilinediazonium tetrafluoroborate	Ar-NH-ArN <sub>2</sub> BF <sub>4</sub>
N-Phenylanilinediazonium hexafluorophosphate	Ar-NH-ArN <sub>2</sub> PF <sub>6</sub>
Diphenyliodonium hexafluoroantimonate	Ar <sub>2</sub> ISbF <sub>6</sub>
Triphenylsulfonium hexafluorophosphate	Ar <sub>3</sub> SPF <sub>6</sub>

## 2.5.6 Monomery a oligomery

Každý polymer se skládá z velkého počtu konstitučních jednotek poskytnutých molekulami monomeru. Jednoduše řečeno, každá molekula monomeru může poskytnout atom nebo skupinu atomů pro tvorbu polymeru. Oligomerem (prepolymerem) je látka, která se skládá z několika už poskytnutých atomů nebo skupin atomů opakovaně spojených mezi sebou [50]. Existuje několik skupin monomerů, avšak pro účely fotopolymerizace je vhodných pouze několik z nich. V tabulce 2.4 [32] jsou pro ukázkou uvedené některé ze třech skupin. Na obrázku 2.9 jsou schematicky znázorněny molekuly monomeru, oligomeru a polymeru.



Obrázek 2.9: Schematické znázornění konstitučních jednotek v molekule: a) monomeru; b) oligomeru (prepolymeru); c) polymeru

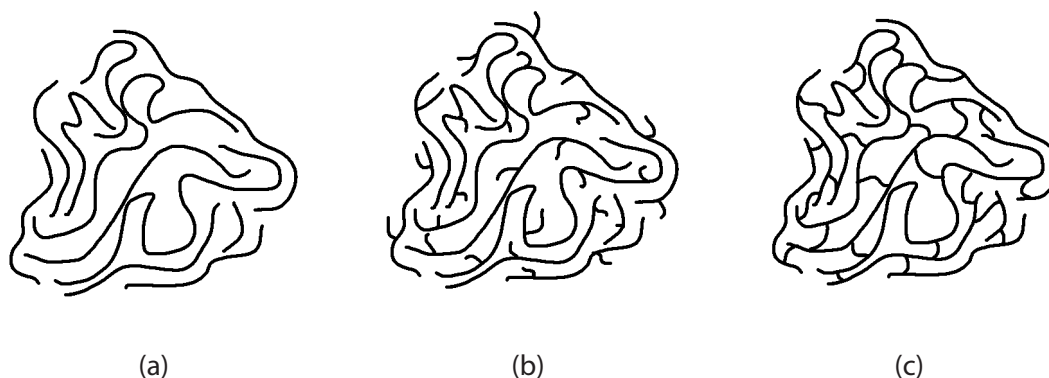
Hlavním účelem monomerů ve fotopolymerním roztoku je poskytovat výše zmíněné konstituční jednotky, ze kterých pak bude vytvořen polymerní řetězec. Množství monomerů ve fotopolymerním roztoku se pohybuje v rozmezí 10 - 40 %. Oligomery přidávají dalších 50 - 80 % objemu a dohromady s monomerem tvoří 90 - 95 % hotového množství fotopolymerního roztoku [51, 33].

## 2.5.7 Síťování polymerů

Pod pojmem síťování polymerů rozumíme vytváření makromolekulární struktury, u které se několik řetězců polymeru spojuje do trojrozměrné struktury. Mohou vzniknout spojením jak lineárních, tak i rozvětvených polymerů. Nejvíce známým procesem síťování je proces vulkanizace kaučuku, u něhož přidáním síťovacího činidla, v tomto případě síry, dochází ke vzniku chemických příčných vazeb mezi řetězci polymeru. V případě síťování kaučuku se molekuly síry stávají součástí příčných vazeb v síťovaném polymeru. Ne vždy se síťovací činidlo stává součástí příčných vazeb. Při použití záření krátkých vlnových délek jako činidla pro síťování dochází jen k aktivaci reaktivních míst strukturních jednotek, které jsou takovým způsobem přinucené k vzájemnému spojení [52]. Znázornění molekulární struktury polymeru je zobrazeno na obrázku 2.10.

Tabulka 2.4: Skupiny vhodné k fotopolymerizaci monomerů

Název	Vzorec
Akryláty	
Isobutyl akrylát	$\text{CH}_2 = \text{CHCOOCH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)_3$
Cetylakrylát	$\text{CH}_2 = \text{CHCOOC}_{18}\text{H}_{33}$
Trifluoroethylakrylát	$\text{CH}_2 = \text{CHCOOCH}_2\text{CF}_3$
Methakryláty	
Dimethylaminoethyl Methakrylát	$\text{CH}_2 = \text{C}(\text{CH}_3)\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_2$
Ethylphosphoric acid-Methakrylát	$\text{CH}_2 = \text{C}(\text{CH}_3)\text{COO}(\text{CH}_2)_2\text{OPO}_3\text{H}_2$
Akrylamidy	
Acrylamide	$\text{CH}_2 = \text{CHCONH}_2$
Methacrylamide	$\text{CH}_2 = \text{C}(\text{CH}_3)\text{CONH}_2$
Acrylonitrile	$\text{CH}_2 = \text{CHCN}$



Obrázek 2.10: Molekulární struktury polymerů: a) lineární; b) rozvětvená; c) síťovaná

Pro síťování polymerů se také používá ionizující záření. Působením tohoto záření se mohou u polymeru vygenerovat radikály nutné k síťování. Také se používá UV záření, ale jeho účinnost je menší. Další nevýhodou je malá hloubka jeho průniku do polymeru [35]. Tímto způsobem se dá vyvolat síťování polymerů pouze v tenké vrstvě, což je pro účely 3D tisku postačující. Tím jsou ale kladeny větší nároky na nastavení správného času ozařování jednotlivé vrstvy, protože může vzniknout nerovnoměrná struktura uvnitř vytištěného modelu a následně dojde ke vzniku příliš velkého vnitřního pnutí.

V závislosti na typu použitého polymeru se mění i jeho vlastnosti po síťování. Při síťování je důležité, jak jsou nastavené parametry procesu. Při různých parametrech dostaneme na výstupu materiály s různými vlastnostmi. Například, u kaučuku přidáním většího množství síry dostaneme tvrdší pryž [35]. Stejně to je s použitím záření u polyethylenu, polypropylenu a polyvinylchloridu, u nichž je možné dosáhnout tvarové stálosti a zlepšení mechanických vlastností za zvýšených teplot [52].

## 2.6 Použití 3D tisku v biomedicině

V oboru biomedicíny začínají být SL tiskárny velmi populární. Hlavní výhoda těchto tiskáren spočívá v možnosti použití biokompatibilních fotopolymerních materiálů se speciálními přísadami. Jejich výhodou je také možnost dosažení vysoké přesnosti tisku. Pomocí SL technologie je možné vyrobit scaffold pro rostoucí buňky nebo systémy pro přímé dodávání léků [53, 54, 55, 56]. Možnost tisku modelů z keramických materiálů otevírá příležitosti pro širší využití 3D tisku v oblasti dentální medicíny [57, 58, 59].

## 2.7 3D tisk z keramických materiálů

Pod tiskem z keramických materiálů rozumíme použití technologií AM pro vytváření keramických objektů komplexní struktury a formy. Díly z keramiky mají vysokou antikorozi schopnost a používají se mimo jiné pro vysokoteplotní aplikace. Keramické materiály jsou známé svojí obtížnou tvarovatelností. Pro výrobu komplexních keramických struktur nebo topologicky optimalizovaných keramických modelů je použití technologií AM nezbytně nutné. Jsou dobře známé technologie používající keramický prášek jako stavební materiál. Tvarování výrobku pak probíhá slepením nebo spečením jednotlivých granulí dohromady [34]. Jsou to technologie vytlačování materiálu (EFF) [60, 61], selektivní spékání laserem (SLS) [62, 63], vstřikování pojiva do prášku (BJ) [34, 64, 65, 66, 67, 68]. Ne každá z těchto technologií dovoluje dosáhnout dostatečně vysoké hustoty konečných keramických výrobků ve srovnání s tradiční výrobou keramiky, ale každá má nějaké výhody a nevýhody pro různé účely použití hotových výrobků. Poslední dobou se více a více rozšiřuje používání SL technologií pro zpracování keramických materiálů, jak klasické SL [69, 70, 71], tak i technologie MPSL

[34, 72, 73, 74, 40, 75, 76].

Jedním z požadavků na konstruovaný stroj byla možnost tisku velkého spektra fotopolymerů. Důvodem je používání tiskárny pro zkoušky různých kompozitních materiálů a to včetně keramických. Proto byla při konstrukci tiskárny vzata v úvahu možnost tisku z materiálů s vyšší hustotou. Jeden z experimentů vztahující se k tisku komerčních keramických materiálů je popsán v podkapitole 5.3.

### **2.7.1 Keramické materiály pro SL 3D tisk**

Prvním a základním krokem SL tisku keramiky je příprava materiálů pro tisk. Pokud se na to podíváme hodně zjednodušeně, lze konstatovat, že tvorba keramického materiálu pro SL 3D tisk je přidání nějakého keramického prvku do fotopolymerního roztoku. Tady existuje velký prostor pro možné variace. Mohou se volit různé poměry fotopolymeru a keramiky [40, 74, 77], různorodé materiály, dokonce míchaní různých druhů keramického materiálu do jednoho polymeru [77], tím se vytvoří konečný kompozitní výrobek. Určitě mají tyto materiály nějaké společné charakteristiky, ale některá omezení musejí být respektovaná u celého tohoto spektra materiálů.

Je známo, že fotopolymerizaci pro účely 3D tisku můžeme provádět dvěma způsoby, radikálovou nebo kationtovou reakcí (viz podkapitola 2.5.1 a 2.5.4) [33]. Avšak pro účely keramického tisku můžeme použít pouze reakci radikálové fotopolymerizace, protože roztoky fotopolymerů pro kationtovou reakci jsou velmi citlivé na přítomnost nečistot v roztoku [35].

Z fyzického pohledu bude společnou a základní charakteristikou pro všechny keramické materiály snížení jejich tekutosti ve srovnání s klasickým polymerem [78]. Minimální objemové množství keramiky v roztoku pro dosažení srovnatelné hustoty hotového výrobku s tradičním postupem výroby je na úrovni 50 %. Proto je důležité měnit poměr keramiky v polymeru v určitých mezích, aby byl materiál ve výsledku tisknutelný pro danou konkrétní tiskárnu. Dalším důležitým parametrem je velikost použitých částic, které musejí být poměrně malé a mít malý rozptyl. Pokud bude zbytek parametrů ideální, přesnost tisku je daná větším ze dvou parametrů: rozlišením tiskárny nebo velikostí částic keramického prášku.

Ne každá keramická suspenze se může tisknout technologiemi fotopolymerizace v nádobě kvůli problémům s absorpcí záření. Se zvýšením objemového množství ke-

ramického prášku v roztoku se absorpční problém zhoršuje. Proto je další společnou charakteristikou pro keramické materiály snížení hloubky polymerizace se zvyšující se koncentrací keramiky ve fotopolymerním roztoku. Na velikost energie, kterou dostanou fotoiniciátory na určité hloubce, mají vliv odrazivost, propustnost a absorpce keramického roztoku. Tyto vlastnosti při výpočtu intenzity dopadajícího světla na určité hloubce keramického fotopolymerního roztoku  $a$  bere v úvahu Kubelka-Munkův model popsany rovnicí 2.7.1 [34]

$$I_a = I_0 \cdot \exp \left[ - \left( \sqrt{\epsilon(\epsilon + 2 \cdot S)} \right) \cdot a \right]. \quad (2.7.1)$$

V rovnici 2.7.1 jsou koeficient rozptylu světla  $S$  a koeficient absorpce  $\epsilon$  jsou závislé na odrazivosti, optické tloušťce a fyzické hustotě konkrétní vrstvy. Při aplikaci Kubelka-Mankuvého modelu začíná být hloubka polymerizace nepřímo úměrná rozptylu světla. Odrazivost částic uvnitř roztoku můžeme vyjádřit přes indexy lomu samotného fotopolymeru  $n_0$  a keramických částic  $n_p$ . Hustotu roztoku můžeme vyjádřit přes střední velikost keramických částic  $d_{50}$ , vlnovou délku polymerizujícího světla  $\lambda$  a vzdálenost mezi částicemi  $l$ . Odsud vyplývá vztah pro reprezentaci závislosti hloubky polymerizace na výše zmíněných veličinách, který se počítá pro fotopolymerní roztok s přidanými částicemi keramiky [79]

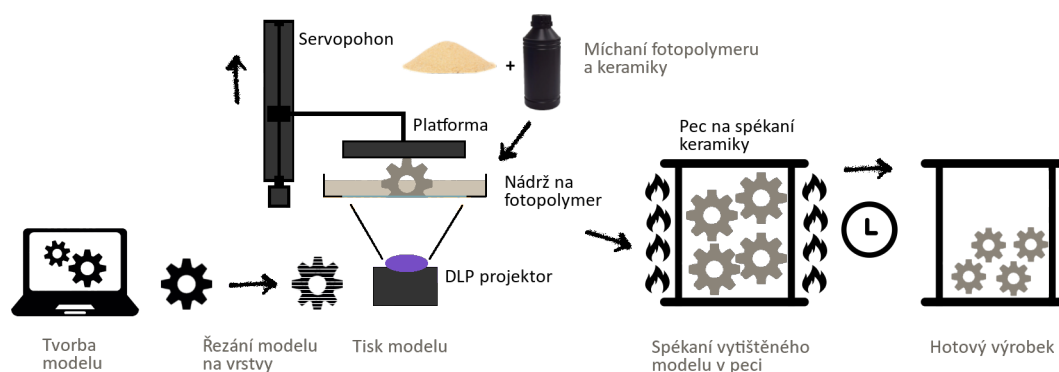
$$D_p \propto \frac{2}{3} \cdot \frac{d_{50} \cdot \lambda \cdot n_0}{l \cdot (n_p - n_0)^2}. \quad (2.7.2)$$

Používání klasických SL technologií nebylo u většiny materiálů pro účely tisku z keramiky dřív možné, protože technologie tisku směrem dolů měly omezenou maximální hustotu stavebního materiálu (viz podkapitola 2.4.1). Další nevýhoda, která se hodně projevuje u keramických materiálů s vysokou hustotou, je nerovnoměrnost povrchu materiálů, kvůli které není možné udržet konstantní tloušťky vrstev během tisku [80]. Při použití technologie tisku směrem nahoru také existuje omezení hustoty použitelných materiálů, je ale podstatně menší a použitím hladítek pro rovnání materiálu toto omezení zredukuje ještě více [81, 75].

Nejvhodnějšími keramickými materiály pro technologii polymerizace v nádobě jsou oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ) a oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Fotopolymerní roztoky s těmito ma-

teriály vykazují nejlepší absorpční charakteristiky během tisku. Další vhodný materiál, široce používaný pro dentální průmysl, je oxid zirkoničitý ( $ZrO_2$ ).

## 2.7.2 Proces tisku keramiky DLP technologií



Obrázek 2.11: Proces tisku keramických výrobků DLP technologií

Na obrázku 2.11 je schematicky znázorněn proces tisku keramických materiálů. Stejně jako u každé technologie 3D tisku je prvním krokem vytváření 3D modelu dílu a příprava dat vhodného formátu pro další zpracování. U keramického tisku musí příprava modelu také zahrnovat úpravu rozměrů modelu tak, aby bylo respektováno smrštění po teplotním zpracování a popřípadě přírůstek modelu způsobený rozptylem světla v polymeru [74].

Dalším krokem je rozdělení modelu na vrstvy, které se budou promítat projektořem. Následně proběhne samotný tisk modelu vrstva po vrstvě. V našem případě používáme DLP MP SL technologii a metodu tisku směrem nahoru (viz podkapitola 2.4.2). Znamená to, že se tiskne celá vrstva modelu najednou. Poté se model vytahuje z nádoby naplněné keramickým fotopolymery.

Samotný tisk keramických materiálů probíhá stejným způsobem jako u klasického tisku vrstva po vrstvě. Vzhledem k tomu, že keramický fotopolymer má větší hustotu, mohou vzniknout s tím spojené komplikace. Například mezi platformou a průhledným dnem nádoby vzniknou při odlepování příliš velké síly, které mohou zničit model nebo poškodit nádobu s fotopolymery. Konstrukční záležitosti zaměřené na snížení nebo odstranění vlivu přebytečné síly vzniklé během odlepování modelu (dále síly odlepování) jsou popsány v podkapitole 3.3 a 3.4. Záležitosti softwarové a metodologické pro

odstranění tohoto problému jsou popsány v podkapitole 4 a 5.2. Vzhledem k tomu, že se materiál pro tisk skládá z několika různorodých komponentů, vždy před samotným tiskem musí být materiál velmi dobře zamíchaný. Platí to jak pro nový nepoužitý roztok, tak i pro materiál, který zůstal v nádobě z předchozích tisků.

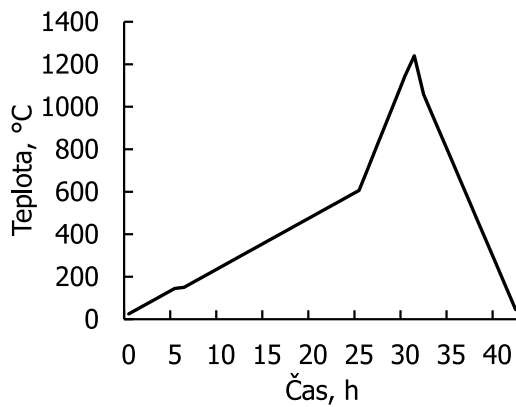
Strategie osvětlování u keramických materiálů má rozhodně větší vliv na kvalitu tisku a přesnost konečného výrobku v porovnání s tiskem klasických materiálů. Je to způsobeno tím, že keramické materiály jsou víc náchylné na zvětšení rozměrů tisknutého modelu během tisku. Je to dáno tím, že světlo se odráží od keramických částic a ozařuje místa, která by měla zůstat nevytvrzená [74]. Velikost tohoto efektu závisí na konkrétním typu materiálu. Tento nežádoucí efekt se dá zmenšit nebo i úplně odstranit výběrem správného času osvětlení pro konkrétní tloušťku vrstvy a konkrétní materiál.

### 2.7.3 Tepelné zpracování - sintrování

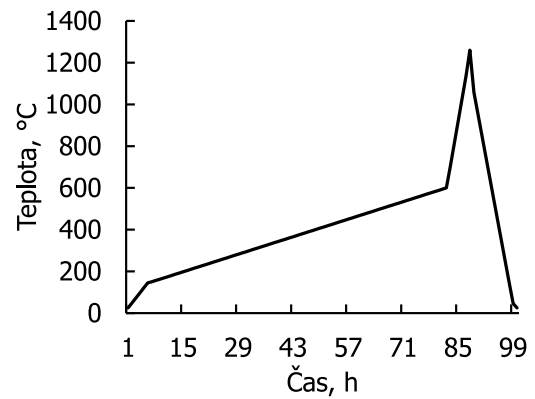
Další etapou keramického tisku je fáze následného zpracování vytištěného výrobku, který má na začátku této fáze název "zelený model". Za prvé se z vytištěného modelu odstraní zbytky nevytvrzeného materiálu. Dále může následovat dodatečné vytvrzování v UV komoře pro zvětšení počtu síťovaných polymerů (viz podkapitola 2.5.7). Další etapou, příslušnou jenom 3D tisku keramických materiálů, je tepelné zpracování modelů. Graf popisující tento proces pro testovaný materiál Porcelite pro odlišné tloušťky stěny je zobrazen na obrázku 2.12 [82]. Hlavním účelem tepelného zpracování je odstranění polymeru ze zeleného modelu a spékání částic keramiky mezi sebou. Po správně provedeném procesu dostaneme finální keramický výrobek.

Proces tepelného zpracování, které se také nazývá vypalování, se skládá ze čtyř fází. První fází je předehřev, u kterého proběhne sušení modelů. Většinou je to proces s poměrně rychlým nárůstem teploty (25 °C/hod) do hodnot kolem 150 °C. V druhé fázi probíhá odstraňování polymeru z vytištěného modelu, který slouží k vázání (ang. binding) částic keramiky do 3D struktury. Proto má tato fáze název debinding. Graf na obrázku 2.13 ukazuje termogravimetrickou (TGA) analýzu vytištěného zeleného modelu z materiálu Porcelite. Na grafu jsou patrné dva skoky: u největšího se střední hodnota degradační teploty pohybuje kolem 430 °C. Proces degradace trvá při teplotách od 240 do 580 °C. Nejvíce materiálu se tedy uvolní v tomto rozmezí teplot. Ovlivní to křivku ohřevu, protože při prudkém ohřevu se budou spaliny rychle uvolňovat z materiálu





(a) Tloušťka stěny do 5 mm

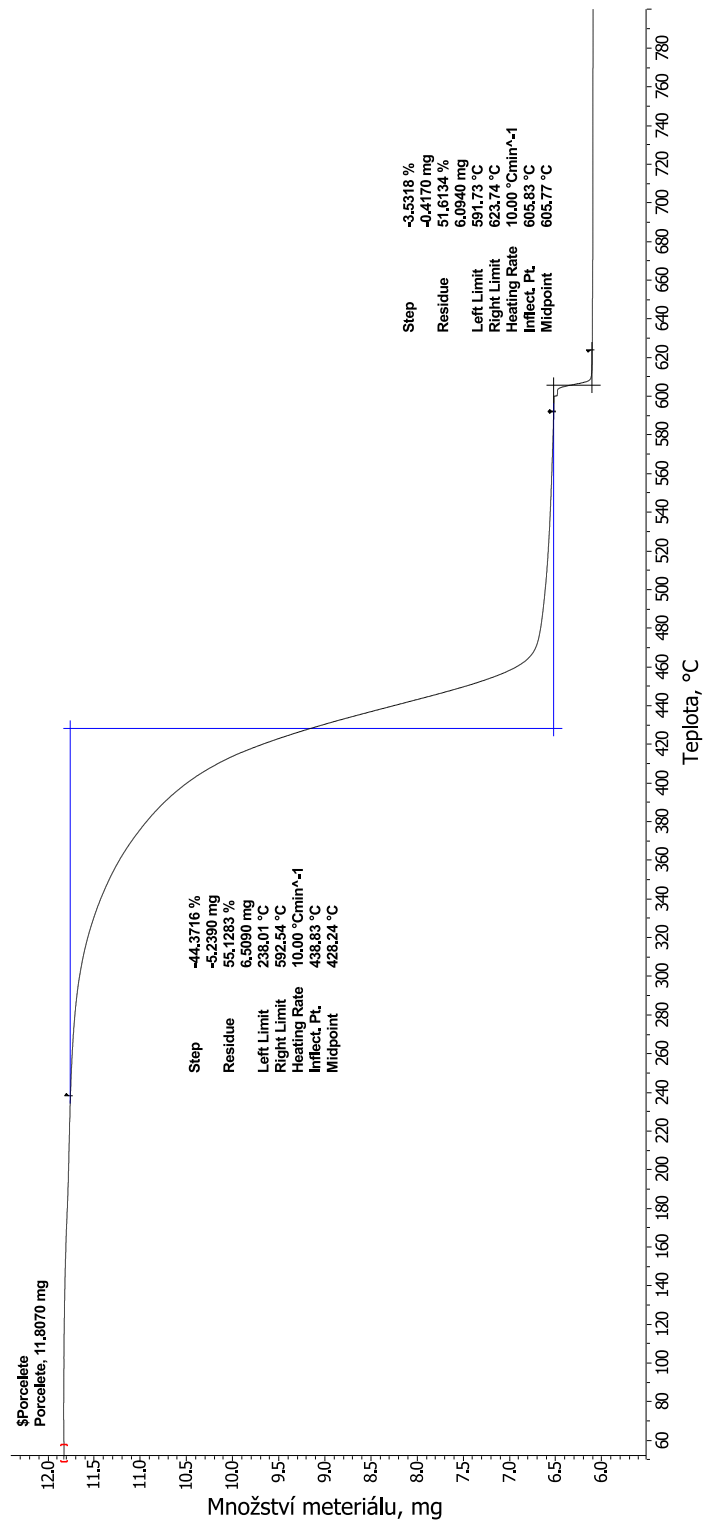


(b) Tloušťka stěny více než 5 mm

Obrázek 2.12: Tepelné zpracování keramického materiálu Porcelite

a způsobovat trhliny. Proto na obrázku 2.12b, na kterém je zobrazena křivka ohřevu pro tloušťku stěny větší než 5 mm, je nárůst teploty v tomto intervalu pomalejší než pro menší tloušťky stěny modelu (obrázek 2.12a).

Třetí fáze tepelného zpracování začíná na teplotách, na kterých už je skoro všechn polymer vypálený. Pro materiál Porcelite je to kolem 600 °C. V této fázi probíhá spékání keramických částic. Ohřev probíhá s velice prudkým sklonem kolem 100 °C/hod, a trvá až do dosažení sintrační teploty keramického materiálu. Je to maximální teplota pro tepelné zpracování a pro materiál Porcelite je stanovena na 1240 °C.



Obrázek 2.13: Termogravimetrická analýza materiálu Porcelite

## 3 Konstrukce DLP tiskárny

Vývoj v oblasti tisku fotopolymerních materiálů na pracovišti autora této práce probíhá již od roku 2014. Za tuto dobu bylo vyvinuto několik generací tiskáren. Získané znalosti a poznatky byly aplikované při návrhu aktuální verze tiskárny popsané v dané práci. Bylo vypracováno několik návrhů jak kompletních tiskáren, tak i jednotlivých řešení společných pro každou generaci tiskárny. Výzkum, který směřoval ke vzniku tiskárny popsané v této práci, začal v roce 2015 a byl podpořen dvěma studentskými projekty (SGS), u nichž byl autor hlavním řešitelem.

V této kapitole jsou popsány jednotlivé komponenty tiskárny, konstrukce rámu, platformy a dalších komponent. U součástí, které byly zakoupené jako celek, je zdůvodněn jejich výběr. U některých řešení je popsán proces vývoje pro vysvětlení zvolených konstrukčních návrhů. V této části je popsána pouze poslední aktuální verze tiskárny. Někdy se však vyskytují odkazy na komponenty z tiskáren předchozích generací.

### 3.1 Komponenty tiskárny

Tiskárna jako celek se skládá z několika základních komponent. V této podkapitole jsou popsány hlavní části, které byly pořízeny podle průzkumů nebo výpočtů. V dílčích podkapitolách budou zdůrazněny důvody k použití zvolených komponent tiskárny. U některých z nich bylo zapotřebí provést dodatečné rozsáhlé experimenty ke zjištění jejich kompatibility a vhodnosti pro řešenou úlohu.

#### 3.1.1 Projekční zařízení

Projektor je u DLP tiskáren základní a nejdůležitější částí celého stroje. Zvolený projektor ovlivňuje klíčové parametry celé tiskárny, například rozlišení tisku a velikost tiskového prostoru. Typ použitého zdroje světla také omezuje rozsah materiálů, které se na

tiskárně mohou používat. Vlnová délka záření projektoru určuje typ fotoiniciátorů pro zahájení reakce polymerizace (viz podkapitola 2.5.5). Intenzita záření projektoru má vliv na rychlost polymerizace, penetrační hloubku a tím i na samotnou rychlost tisku jedné vrstvy a její tloušťku.

Co se týká použitého zdroje světla, na trhu se lze většinou setkat s tiskárnami dvou typů. První typ používá hotové komerční projektory. Mohou to být jak obyčejné kancelářské dataprojektory poměrně velkých rozměrů, tak i průmyslové malé vestavěné projektory. U druhého typu výrobci používají projektory vlastní výroby, čímž je zdůvodněna relativně nízká cena tohoto typu tiskáren. Avšak nejdražší komponenty, kterými jsou DMD deska a řídicí elektronika, je však třeba kupovat od specializovaného dodavatele. Jediné komponenty projektoru, které se mohou vyrobit, jsou výstupní optika a zdroj světla. Ty jsou konstruované na míru pro konkrétní tiskárnu. Prohlášení výrobce, že používá projektor vlastní výroby, je většinou jenom marketingový tah sloužící především ke zdůvodnění nižší ceny zařízení. Průzkum tiskáren druhého typu ukázal, že nižší cena je výsledkem použití DMD čipu s nižším rozlišením.

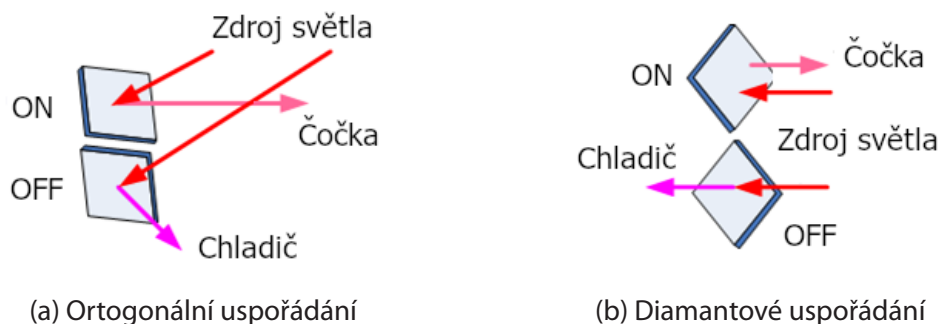
Při výběru vhodného projekčního zařízení pro nově navrhovanou tiskárnu bylo posuzováno několik parametrů. Hlavními kritérii byly rozlišení DMD desky a celkový rozměr projektoru včetně optiky. Z první generace tiskárny byl k dispozici poměrně velký projektor Acer H6510BD, jehož lampa generuje záření ve viditelném spektru a také na konci UV spektra kolem 400 nm. Podle testů bylo experimentálně stanoveno, že v UV spektru projektor generuje nízkou intenzitu záření vůči ostatním vlnovým délkám. Proto je efektivita projektoru vzhledem k jeho rozměrům velmi nízká. Na druhou stranu má projektor FHD rozlišení, což u menších průmyslových projektorů bývá výjimečně. Cíl práce byl však stanoven na navržení tiskárny v málem provedení, což neumožnilo použití většího dataprojektoru.

Z těchto a dalších důvodů byl pro pokračování výzkumu v oblasti DLP tisku vybrán průmyslový vestavěný projektor v málem provedení LightCrafter E4500 od výrobce DMD čipů Texas Instruments Inc. Projektor disponuje DMD deskou s diamantovým uspořádáním zrcadel. Kromě výhod popsaných v podkapitole 2.3.1 má diamantové rozmístění zrcadel výrazný vliv na velikost projektoru. Použití diamantového uspořádání zrcadel dovoluje nejenom zmenšit plochu samotného pole zrcadel, ale i snížit výšku celého projekčního modulu. Z obrázku 3.1 [23] je vidět, že u desek s ortogonálním roz-

Tabulka 3.1: Základní parametry testovaných projektorů

Název	Acer H6510BD	LightCrafter E4500
Rozlišení	1920x1080 (FHD)	1280x800 (WXGA)
Poměr stran	16:9	16:10
Vnější rozměry, mm	80x220x260	48x140x152
Příkon lampy, W	210	7,5
Vlnová délka, nm	400 - 680	385 - 405
Throw ratio	1,15:1	1,1:1
Ofset, %	29	0
Min. projekční vzdálenost, mm	50	25
Min. velikost obrazu, mm	53,3x30	20,4x12,7

místěním mikrozrcadel musí být zdroj světla nad nebo pod výstupní optikou, což vyžaduje zvětšení výšky projektoru. U desek s diamantovým rozmístěním může být zdroj světla a výstupní optika ve stejné rovině, což dovoluje výrazně zmenšit výšku projektoru. Výhodou zařízení, kromě kompaktní velikosti, je také upravený zdroj světla, u něhož byla standardní RGB LED vyměněna za UV LED se špičkou záření ve vlnové délce 395 nm. Tato hodnota se nachází velice blízko k vlnové délce aktivující většinu nejrozšířenějších fotoiniciátorů fotopolymerů (viz tabulka 2.2). Další výhodou tohoto projektoru je jeho poměrně jednoduchá modulová konstrukce. V případě potřeby se dají vyměnit jednotlivé části projektoru, například DMD čip, UV LED, řídicí deska nebo i celé projekční zařízení, za účelem vylepšení nebo výměny opotřebovaných komponentů.



Obrázek 3.1: Průchod světla DMD deskou

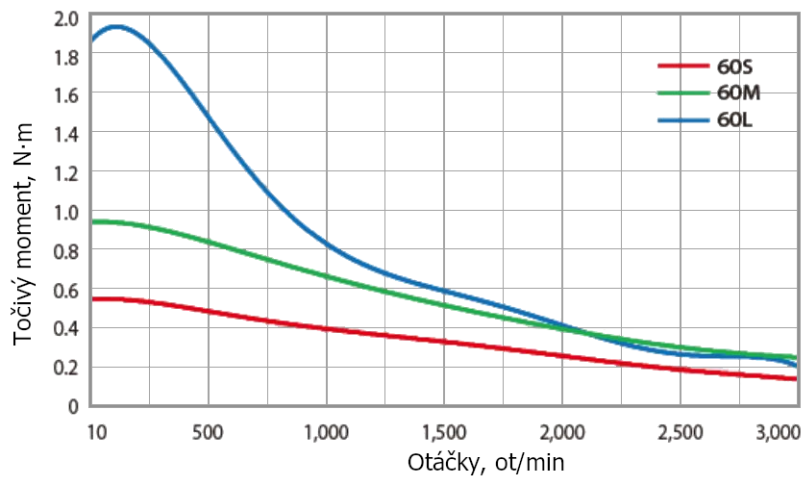
Technické parametry obou projektorů jsou uvedené v tabulce 3.1 [83, 84]. Pro zjištění efektivity projektoru s UV diodou bylo rozhodnuto změřit intenzitu jeho záření v UV spektru. Pro porovnání jeho účinnosti vůči předchozímu použitému projektoru byla provedena stejná měření u klasického kancelářského DLP projektoru použitého v předchozím výzkumu (ACER H6510BD). Výsledky měření a popis samotného experimentu jsou popsány v části experimentů této práce, v podkapitole 5.1.

### 3.1.2 Pohon

U technologie DLP tisku směrem nahoru je hlavní nevýhodou přilepování vytisknuté vrstvy zároveň k platformě a ke dnu nádrže s fotonolymem [80]. Tento problém se dá vyřešit několika způsoby (viz podkapitola 2.4.2). Některé z nich byly otestovány na předchozích prototypch tiskárny. Pro většinu je potřeba přidávat nějaký dodatečný pohyb, buď naklonění nebo posuv nádoby, který je zajištěn dalším motorem. Při návrhu experimentů týkajících se detekce chyb, během vývoje předchozích generací tiskárny, byly pro každou testovanou metodu změřeny síly vznikající při odlepování vrstvy ode dna nádrže. Proto byly pro každou navrženou metodu k dispozici data, podle kterých bylo možné posuzovat vliv použité metody na vznikající síly. Po vyhodnocení těchto dat bylo stanoveno, že použití speciálních technik odlepování má vliv pouze při tisku větších modelů, při nižší koncentraci pixelů a větší ploše platformy. Proto nebylo aktivní odlepování bráno v úvahu při návrhu stávající generace tiskárny, vzhledem k malému provedení a maximální ploše tisknuté vrstvy 4000 mm<sup>2</sup>. Se zřetelem k výše uvedeným důvodům navržená tiskárna disponuje jenom jednou pohybovou osou zajišťující svislý pohyb platformy.

Lineární pohybová jednotka pro stávající prototyp tiskárny byla převzata z prvního prototypu DLP tiskárny navržené v rámci závěrečné práce Ing. Pavla Macha [85]. Jednalo se o vysoce precizní lineární jednotku THK KR3306A-0300-H0-00A0. Kuličkový šroub jednotky má stoupání 6 mm a zdvih 300 mm. Celková délka jednotky je 470 mm. Opakovatelná přesnost je 5 μm a maximální rychlost činí 470 mm/s [86].

Lineární pohybová jednotka je poháněna bipolárním krokovým motorem Fastech EzM 60L s vnitřní zpětnou vazbou. Momentová charakteristika motoru je zobrazena na obrázku 3.2 [87]. Servopohon je řízen ovladačem Ezi-Servo ST se zpětnou vazbou. Udržovací moment motoru činí 1,5 N · m. Pro udržování polohy při vypnutém napětí



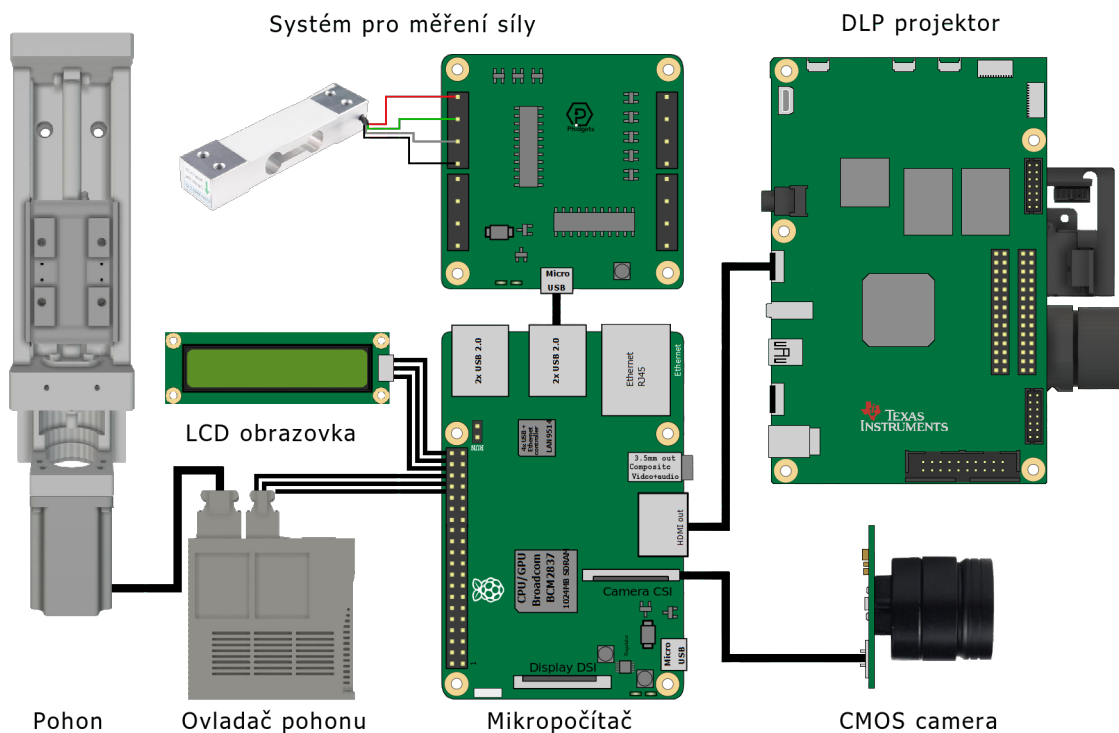
Obrázek 3.2: Momentová charakteristika motoru EzM série 60

je pohon také vybaven elektromagnetickou brzdou. Servomotor je vybaven nastavitelným enkodérem s maximálním rozlišením 10 tis. pulzů na otáčku. Pro shodu s opakovatelnou přesností pohybové jednotky a pro snížení zátěže motoru mikrokrokováním, byl enkodér nastaven na rozlišení 3,6 tis. pulzů na otáčku, což odpovídá přesnosti 1,6  $\mu\text{m}$ . Při minimální tisknutelné tloušťce vrstvy 10  $\mu\text{m}$  je přesnost celého systému úplně dostačující.

### 3.1.3 Řídicí jednotka

Pro řízení tiskárny se používá mikropočítač Raspberry Pi (RPi) s nainstalovaným operačním systémem Raspbian Jessie Lite pocházejícím z Linuxové rodiny. Pro zrychlení práce a zvětšení spolehlivosti zařízení nemá operační systém nainstalované grafické rozhraní, používá se základní jádro systému s minimálně nutným množstvím připojených modulů a nezbytným softwarovým vybavením. Počítač je nastálo připojený přes Ethernet rozhraní na internet. Při vypadnutí kabelového připojení nebo přenosu tiskárny na místo bez možnosti připojení přes kabel se tiskárna automaticky připojí k univerzitní WiFi síti Eduroam. Zapojení jednotlivých modulů tiskárny je zobrazeno na obrázku 3.3. Tiskárna je centralizovaně řízena mikropočítačem, který komunikuje s každým dílčím modulem.

Raspberry Pi disponuje veškerým potřebným rozhraním pro jeho použití v průmyslových aplikacích. Z pohledu 3D tiskárny je jeho klíčovou vlastností možnost zpracování obrazů vysoké kvality a jeho předání přes HDMI rozhraní na projektor. Řídicí jednotka



Obrázek 3.3: Řídicí systém DLP tiskárny

disponuje jedním výstupem pro zobrazení informace používaným k promítání obrazů jednotlivých vrstev. Proto je nejvhodnějším řešením pro komunikaci s uživatelem použití webového serveru běžícího na mikropočítači a ovládání tiskárny přes webové rozhraní z jakéhokoliv zařízení připojeného na internet. Pokud tiskárna z nějakého důvodu není připojena na internet, je možné ji připojit přes kabel nebo bezdrátově k lokální síti a použít lokální adresu pro připojení k webovému serveru.

Mimo uživatelské rozhraní existuje také možnost připojení přes protokol SSH, které se používá za účelem administrování tiskárny nebo pro systém detekce chyb. Při použití softwaru pro vzdálené spravování souborů, například WinSCP, se dá připojit k souborovému systému RPi. Tímto způsobem má uživatel přístup k vnitřním souborům tiskárny, mezi které patří záznamy o průběhu sil během tisku, masky jednotlivých vrstev a konfigurační soubory tiskárny. Také se přes stejný protokol dá připojit k tiskárně jako ke vzdálenému počítači a mít k dispozici příkazový řádek operačního systému. Pro tyto účely se dá použít software pro vzdálené ovládání, například PuTTY. Řídicí software tiskárny funguje na RPi jako jedna z několika aplikací, proto zásah do řídicího systému tiskár-



ny během tisku žádným způsobem neohrozí tisk. Žádný z těchto způsobů komunikace s tiskárnou nevyžaduje zvláštní způsob připojení přes jakékoliv rozhraní. Dostačující je být připojený na internet, a poté je možné ovládat tisk a nastavení tiskárny z jakéhokoliv místa.

Dalším požadavkem na řídicí jednotku je přítomnost přímo ovladatelných vstupů a výstupů (I/O) pro řízení pohonu, připojení informační obrazovky, připojení ovladače motoru, klapky projektoru atd. Také je výhodou přítomnost rozhraní na připojení CMOS kamery pro vzdálené sledování procesu tisku.

Při použití RPi pro řízení tiskárny nemusí mít uživatel zvláštní počítač připojený k tiskárně s nainstalovaným speciálním softwarem, stačí mít počítač s webovým prohlížečem. Použití tohoto řešení hodně snižuje cenu zařízení a šetří místo kolem tiskárny v laboratoři. Další výhodou je to, že pro ovládání několika tiskáren najednou je zapotřebí pouze jeden počítač.

Základní charakteristiky mikropočítače jsou uvedené v tabulce 3.2 [88].

Tabulka 3.2: Základní parametry řídicího mikropočítače

Název	Raspberry Pi 3 Model B
SoC	Broadcom BCM2837
CPU	4 × Cortex-A53 1.2 GHz
GPU	@ 400 MHz, 1080p60, 1 GB
RAM	1 GB (sdílená s GPU)
USB	4 x USB 2.0
Video vstup	15-pin MIPI kamerové rozhraní
Video výstup	Plnorozměrný HDMI 1,3
Připojení	10/100 Mbit/s Ethernet, 802.11b/g/n 2,4GHz, Bluetooth 4.1
Napájení	5 V 1,3 A

Při zapnutí tiskárny automaticky naběhne operační systém a spustí se webový server s ovládacím softwarem (viz podkapitola 3.5). Software pro detekci chyb (viz podkapitola 4) spustí operátor podle potřeby ručně přes rozhraní SSH.

## 3.2 Rám

V představené generaci tiskárny je použit rám z hliníkových profilů. Během zkoušek na předchozích prototypch tiskárny prokázal rám z hliníkových profilů svoji robustnost a jednoduchost návrhu a sestavení. Hlavní předností tohoto řešení je možnost úpravy vnitřního rozmístění komponentů tiskárny bez nutnosti větších úprav rámu. Během posledních konstrukčních úprav rámu tiskárny se podařilo odlehčit tiskárnu se zachováním srovnatelné tuhosti používáním výztužných prvků.

Z hlediska provozu tiskárny jsou na rám kladené velké nároky. V DLP tisku je jedním ze základních parametrů tloušťka vrstvy, která ovlivňuje přesnost modelu ve svislé ose. Proto může narušení počáteční kalibrace tiskárny způsobit těžko odstranitelné nepřesnosti. Podmínkou spolehlivosti tisku je konstantní tloušťka první vrstvy na celém povrchu platformy. Je to důležité pro přilnavost celého modelu k platformě.

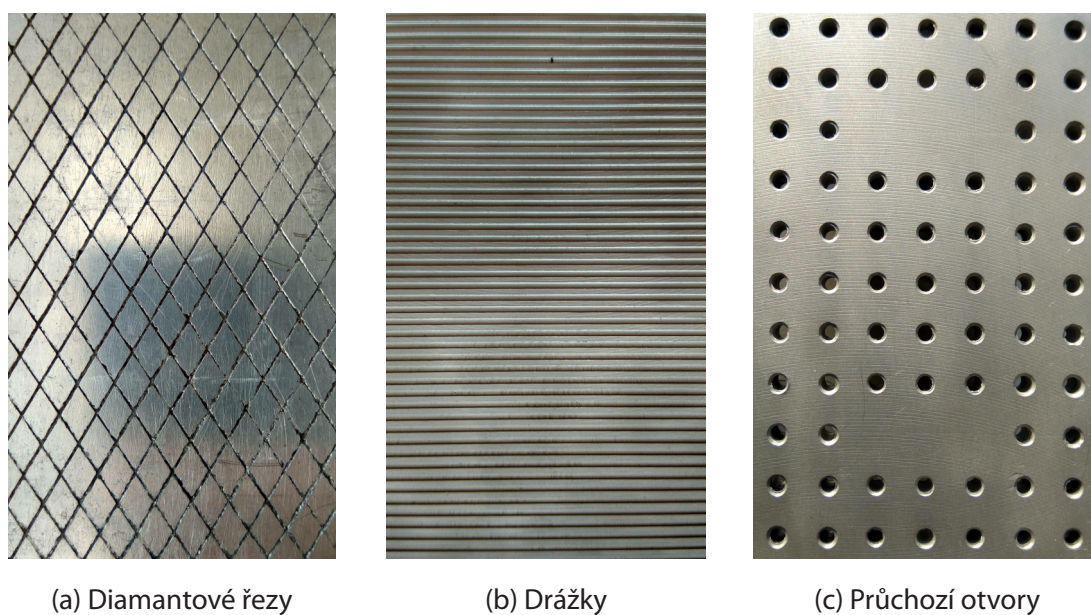
V současné době je rám tiskárny konstrukčně optimalizován za účelem kompaktnosti tiskárny a zlepšení její ergonomie. Na druhou stranu zůstává možnost malých úprav tiskárny s možností přidání dalších modulů v případě potřeby.

## 3.3 Tisková platforma

Platformou u 3D tiskáren nazýváme jednotku, na které vzniká tištěný model (viz podkapitola 2.4.2). Referenční poloha platformy se nachází v horní části lineární jednotky, která je omezena optickým snímačem. Na začátku tisku se platforma ponoří do nádoby s fotopolymerem a přilne ke dnu. Vzdálenost platformy od nulové polohy je v tomto místě maximální a musí být zkalibrována po každé výměně nádoby. Následně se platforma zvedne na výšku jedné vrstvy a tím začne vlastní tisk. Tloušťka vrstvy se pro většinu modelů a materiálů pohybuje v hodnotách od 20 do 100  $\mu\text{m}$ . Během ozařování vrstvy modelu se fotopolymerní roztok v oblasti promítání projektoru polymerizuje a spojuje se s platformou. Před tím, než se začne tisknout další vrstva, se musí tekutý roztok nevytvrzeného polymeru dostat do místa tisku. Tekutost polymeru klesá se zvětšením jeho hustoty. U roztoků polymerů bez příměsí se materiál dostane k místu tisku sám za určitou dobu po nadzvednutí platformy. U keramických a jiných kompozitních tiskových hmot se používají komplikovanější řešení. Jedním z nich je změna provedení

platformy.

Za dobu vývoje tiskárny bylo navrženo a vyzkoušeno několik řešení provedení platformy a jejich uchycení, včetně různých materiálů. Nejlepší přilnavé vlastnosti ukázaly hliníkové platformy. Při tisku z polymerů nízké viskozity se používá platforma s hladkým povrchem bez žádných povrchových úprav profilu platformy. Po prvních zkouškách tisku z materiálů s vyšší hustotou bylo evidentní, že je zapotřebí používat komplikovanější povrchy platformy. Proto byly navrženy a vyzkoušeny platformy zobrazené na obrázku 3.4, které se používají na prototypu DLP tiskárny.



Obrázek 3.4: Platformy DLP tiskárny

Na obrázku 3.4 zleva doprava jsou zobrazené platformy v pořadí použití od nižší k větší hustotě polymeru. Na obrázku 3.4a je zobrazena platforma se strukturou prořezanou laserem ve hladké hliníkové platformě. Hlavním účelem platformy je zvětšení adheze mezi platformou a modelem. Avšak při použití platformy bylo zjištěno snížení přilnavosti mezi platformou a dnem nádrže a zlepšeno dodávání polymeru do místa tisku. Platforma ukázala svoje výhody při použití s klasickými polymery, obzvláště při tisku modelů s velkou plochou v prvních vrstvách, kde dochází k velkému vnitřnímu pnutí polymerizovaného materiálu a následnému prohýbání a odlepování modelu.

Pro zvětšení kladných účinků, které se objevily u platformy s diamantovými řezy, byly navrženy a vyrobené platformy zobrazené na obrázcích 3.4b a 3.4c. Drážky u druhé

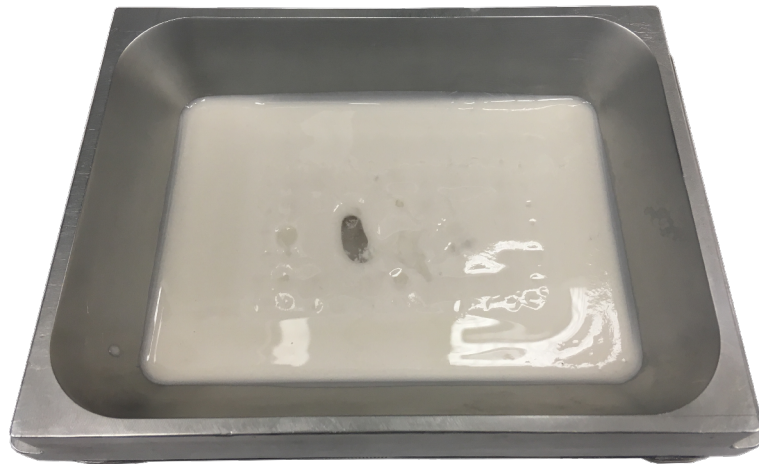
platformy mají hloubku 0,5 mm a šířku 1 mm, což umožňuje polymeru rychleji zatékat a vytékat z platformy při pohybu v polymerním roztoku. Největší účinek má tato platforma při použití v kombinaci s nádobou, u jejíhož dna je napnutá fólie (viz podkapitola 3.4). Polymer zbývající v drážkách se jednoduše dostane zpátky do místa tisku po návratu platformy k místu tisku u několika prvních vrstev. Při tisku dalších vrstev už množství polymeru není dostatečné pro naplnění mezery mezi modelem a dnem nádrže. Proto je při tisku vysokých modelů z materiálů s poměrně velkou hustotou nejlepší volbou platforma s otvory, zobrazená na obrázku 3.4c. Tato platforma je jediná ze tří, která se dá použít při tisku materiálů s keramickou náplní činící více než 50 % hmotnosti v kombinaci s nádobou s napnutou fólií. Otvory o průměru 2,5 mm mají při nájezdu platformy do polymerového roztoku dostatečnou plochu na to, aby rychle odváděly zbývající polymer a uschovaly ho částečně uvnitř otvorů. Po návratu platformy do tiskové polohy polymer z otvorů naplní prázdné místo na dně nádrže, a tímto způsobem zajistí naplnění místa tisku čerstvým polymerem a zároveň míchání kompozitních roztoků.

### 3.4 Tisková nádoba na fotopolymer

Nádoba na fotopolymer u DLP tiskáren je místo, kde se nachází nevytvrzený fotopolymerní roztok. U DLP tiskáren typu směrem nahoru se každá nová vrstva modelu formuje na dně nádoby a hotový model se postupně vytahuje nahoru z nádoby s fotopolymerelem. Vlastnosti a provedení nádoby jsou velmi důležité pro kvalitu tisku u DLP tiskáren. Během vývoje tiskárny bylo vyzkoušeno několik provedení nádoby z různých materiálů. U první generace se používala nádoba z UV propustného polymethylmethakrylátu, který byl slepený z několika dílů a pokrytý antiadhezním silikonem. Nádoba se skládala ze dvou částí odlišné výšky, odlepení každé vrstvy bylo prováděno pohybem nádoby do strany. Po zkouškách se ukázalo, že konstrukce nádoby není dostatečně tuhá a při tisku modelů s velkou plochou vrstvy se objevily problémy s odlepením vrstev ode dna. Proto při návrhu kompaktního provedení tiskárny bylo rozhodnuto používat kovovou nádobu se skleněným oknem pro propuštění světla přes dno. Bylo vyzkoušeno několik metod odlepování nově vytvrzených vrstev od skleněného dna, mezi kterými byly jak metody pasivního, tak i aktivního odlepování pomocí aktuátoru natáčejícího nádobu. Byly vyzkoušené různé typy provedení dna nádoby. Mezi ně patří samostatné

borosilikátové sklo, sklo pokryté PDMS silikonem, sklo pokryté FEP fólií a samostatná FEP fólie.

K zanechání nejvyšší flexibility tiskárny bylo rozhodnuto u současného provedení tiskárny nechat možnost použít v případě potřeby jakékoliv z těchto provedení nádob. Proto byla navržena univerzální konstrukce nádoby s vyměnitelným dnem, která se dá přizpůsobit různým kombinacím povrchu. Nádoba s napnutou FEP fólií a naplněná keramickým fotopolymerem je zobrazena na obrázku 3.5.

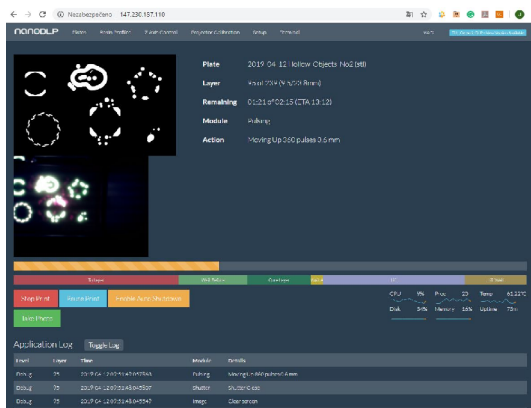


Obrázek 3.5: Nádoba tiskárny s fotopolymerem

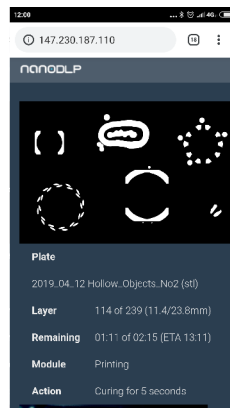
Vzhledem k tomu, že se v poslední době tiskárna používá pro tisk keramických a kompozitních materiálů, je nejvíc využívána nádoba se samostatnou FEP fólií. Je to nejvhodnější provedení nádoby pro materiály s vysokou viskozitou. FEP fólie má poměrně malou adhezi s vytvrzenou vrstvou a tím se redukuje síly vznikající při odlepování.

### 3.5 Řídicí software

Za účelem řízení celého stroje se používá software NanoDLP (NDLP). Je to proprietární software, který je distribuován bezplatně. NDLP běží na operačním systému Raspbian. Na ovládacím mikropočítači se vytvoří webový server, ke kterému se uživatel připojí přes webový prohlížeč z počítače, telefonu nebo dalších zařízení, které mají nainstalovaný internetový prohlížeč a jsou připojené na internet. Ovládací rozhraní řídicího softwaru je zobrazeno na obrázku 3.6.



(a) OS Windows 10



(b) OS Android 6.0.1

Obrázek 3.6: Webové rozhraní ovládacího softwaru tiskárny

NDLP je univerzální software pro řízení velkého množství komerčních tiskáren i amatérských projektů. Tento software byl vybrán pro tiskárnu hlavně kvůli jeho vysoké flexibilitě a spolehlivosti. Na rozdíl od komerčních tiskáren se v něm dá upravit jakékoliv nastavení jak samotného procesu tisku, tak i hardwarových komponentů tiskárny. Software umožňuje přímé řízení pohybu motoru přes I/O rozhraní mikropočítače i připojení řídicích desek podobných projektu RepRap Arduino Mega Pololu Shield (RAMPS). Další výhodou NDLP je jeho podpora ze strany vývojářů. Software je stále ve fázi vývoje a pravidelně je vydávána nová verze s opravami existujících funkcí a přidáním nových. Projekt NDLP začal v roce 2016 a nová verze se vydává minimálně dvakrát do roka.

NDLP má verze, které fungují pod operačními systémy Windows a Linux. Za účelem zvýšení spolehlivosti pro DLP tiskárnu byla vybraná Linux verze a nainstalovaná na jádro OS z rodiny Linuxových systémů Raspbian Jessie Lite. Jedná se o serverový Linux, který funguje s minimálním počtem vedlejších modulů a teoreticky může pracovat roky bez nutnosti restartu mikropočítače. Taková spolehlivost není dostupná pro desktopové řešení na základě systému Windows.

Vlastní instalace aplikace se provádí pouze jednou na čistý Raspbian, potom se každá další aktualizace provádí automaticky bez nutnosti přeinstalace tiskárny. Další operace, jako jsou nastavení bezdrátových připojení a instalace nezbytných modulů OS, se provedou pouze jednou a to při první instalaci. Rezervní kopii softwaru tiskárny lze jednou za čas provádět klonováním paměťové karty, na níž se nachází celý OS tiskárny



včetně ovládacího softwaru a nastavení. Tato možnost hodně zjednodušuje přenositelnost softwaru tiskárny. Pro použití tiskárny s jiným nastavením stačí mít k dispozici paměťovou kartu s požadovanou konfigurací a před spuštěním ji vložit do tiskárny.

Pro přístup k uživatelskému rozhraní tiskárny není potřeba instalovat speciální software, dostačujícím je přítomnost webového prohlížeče. Tímto má uživatelské rozhraní z pohledu uživatele příznaky multiplatformního softwaru. Na obrázku 3.6 jsou záznamy obrazovky z PC s operačním systémem Windows 10 a telefonu pracujícího na OS Android verze 6.0.1.

NDLP vypadá jako klasická počítačová aplikace a skládá se z několika záložek. Hlavní okno aplikace je přístupné bez vyplnění přihlašovacích údajů a nese spíše informační charakter. Jsou zde k dispozici aktuální informace o stavu a průběhu tisku. Také jsou k dispozici hlavní ovládací prvky pro zastavení tisku, vypnutí a restartování tiskárny, pro jejichž použití už musí uživatel být přihlášen. V ovládacím systému je také možné přidat odlišné role uživatelům. Jsou k dispozici role uživatele tiskárny a technika. Tímto lze omezit práva obsluhy stroje.

### 3.5.1 Nastavitelné parametry tisku

Nastavení tiskových parametrů v NDLP je realizováno přes nastavení profilů tisku. Pro každou konfiguraci parametrů je možné vytvořit tiskový profil. Většinou každému tiskovému médiu odpovídá jeden tiskový profil. V některých případech se pro odladění parametrů tisku vytvoří několik tiskových profilů s odlišným nastavením. Například u více-složkových materiálů, ke kterým patří roztoky s obsahem keramických nebo kovových částic, se obvykle používají minimálně dva tiskové profily pro tenkostěnné a tlustostěnné modely. Tiskové parametry se dají rozdělit do dvou skupin. Do první skupiny patří primární parametry tisku, například tloušťka tisknuté vrstvy, čas ozařování a rozlišení. Jsou to základní parametry mající největší vliv na proces tisku. Druhá skupina sekundárních parametrů nemá tak podstatný vliv na tisk, ale může do značné míry ovlivnit kvalitu tisku. Nejdůležitější nastavitelné parametry se stručným popisem jsou zobrazené v tabulce 3.3.

Kromě parametrů uvedených v tabulce 3.3 lze také nastavit méně důležité parametry, například počet nízkokvalitních vrstev. Tato možnost se používá pro zrychlení tisku u pomocných částí modelu, například u podpor. Pro nízkokvalitní vrstvy je možné po-

Tabulka 3.3: Nastavitelné parametry tisku

Název parametru	Skupina	Jednotky	Popis
Tloušťka vrstvy	Primární	μm	Tloušťka vrstvy, podle níž zabudovaný slicer rozřeže model. Určuje přesnost tisku ve svislé ose.
Čas ozařování	Primární	s	Určuje, jak dlouho se bude promítat obraz vrstvy na dno projektoru.
Čekání před tiskem	Sekundární	s	Určuje, za jakou dobu po nájezdu platformy na místo tisku se rozsvítí projektor.
Čekání po tisku	Sekundární	s	Určuje, za jakou dobu po ukončení ozařování platforma začne pohyb nahoru.
Zvednutí po tisku	Sekundární	mm	Určuje velikost zdvihu nahoru po ukončení ozařování vrstvy. Používá se pro správné odlepení vrstvy ode dna nádrže.
Čekání po zvednutí	Sekundární	s	Určuje dobu čekání platformy po zvednutí. Používá se pro zatékání nového polymeru místo zatvrdnutého.
Max. rychlost motoru	Sekundární	μm/s	Rychlost motoru při nájezdu na požadovanou pozici.
Výška pomalého úseku	Primární	mm	Výška polymeru v nádobě. V tomto úseku se motor zpomalí na rychlost v pomalém úseku.
Rychlost v pomalém úseku	Primární	μm/s	Rychlost pohybu platformy v polymeru, jehož hloubka se zadává parametrem výšky pomalého úseku.

užít kratší čas ozařování, čímž se ušetří čas tisku u větších a komplikovanějších modelů.

Velice důležitá je možnost nastavení odlišných parametrů vrstev v závislosti na jiných parametrech. Jsou na to dva nástroje, jeden základní jednodušší, druhý komplikovanější. První nástroj dělí vrstvy na dva typy, pod první typ spadají vrstvy základu, jejichž počet lze určit. Těmto vrstvám je možné přidat jinou tloušťku, čas ozařování, výšku zvednutí a pauzy před a po zvednutí. Správné používání této funkce dovoluje ušetřit



čas a zlepšit přilepení modelu k platformě. Druhým komplikovanějším řešením je dynamické nastavení parametrů. Dynamicky jde nastavit čas ozařování, rychlost motoru, výšku zvednutí a dobu čekání po zvednutí. Dynamické nastavení je realizované pomocí zadávání a kontroly hodnot proměnných, které se zapisují do matematických řetězců a při změně hodnot proměnných se mění hodnoty čtyř dynamických parametrů. Některé z často používaných proměnných jsou například číslo tisknuté vrstvy, celkový počet vrstev modelů, plocha vrstvy, nejmenší a největší plochy vrstev. Příklad nastavení dynamického času ozařování v závislosti na tisknuté vrstvě:

```
{((( [[LayerNumber]]/[[TotalNumberOfLayers]])>0.096)*3)
+ ((( [[LayerNumber]]/[[TotalNumberOfLayers]])<0.0961)*5)
+ ([[LayerNumber]]==1)*8}
```

Výše uvedený řetězec znamená, že pokud bude výsledek operace po dělení čísla tisknuté vrstvy celkovým počtem vrstev větší než 0,096, čas ozařování vrstev se bude rovnat třem sekundám. Pokud výsledek stejné operace bude menší než 0,0961, čas ozařování se bude rovnat pěti sekundám. Pro první vrstvu se bude čas ozařování rovnat osmi sekundám. Pro model, který se skládá z 350 vrstev, bude čas ozařování první vrstvy 13 sekund, od 2. do 33. vrstvy je čas ozařování stanovený na 5 sekund, pro zbytek vrstev se bude čas ozařování rovnat 3 sekundám.

Podobná nastavení v závislosti na ploše tisknuté vrstvy se dají aplikovat na rychlost zvednutí platformy za účelem redukce sil odlepování. Vzorec pro snížení rychlosti u vrstev s plochou větší než 1000 mm<sup>2</sup> na 50 µm/s bude vypadat následovně:

```
{((( [[TotalSolidArea]]>1000)*50)+([[TotalSolidArea]]<=1000)*100)}
```

Podobným způsobem se dají proměnit statická nastavení dalších parametrů za dynamická v závislosti na různých proměnných. Tímto způsobem se dosahuje velké flexibility tiskárny při tisku velkého spektra polymerů. V tiskárně se tisklo univerzálními polymery a polymery od různých výrobců tiskáren. Také se úspěšně tiskly modely z keramických materiálů a z kompozitů obsahujících kovy.

## 4 Detekce chyb během procesu tisku

Průmyslové rozšíření 3D tiskových technologií klade velké požadavky na spolehlivý provoz zařízení. V ideálním případě by ke vzniku chyby během tisku nemělo dojít vůbec, ale pravděpodobnost této situace je velmi nízká a dříve nebo později k chybám během tisku dojde u jakéhokoliv zařízení, i toho nejpropracovanějšího. Velmi často vznik chyby nezáleží jen na samotném zařízení nebo na použitém tiskovém materiálu, ale také na různých vnějších faktorech. Pod chybou v tomto kontextu rozumíme nepovolenou odchylku alespoň jednoho z klíčových parametrů procesu. Vznikem chyby se běžící proces dostane do chybového stavu, který může vést k poruše nebo i selhání celého procesu tisku [89].

Hlavní otázkou systému zpracování chyb je to, aby mezi vznikem chyby a zásahem řídicího systému nebo operátora uplynulo co nejméně času. Zásah se v závislosti na komplikovanosti procesu tisku a samotného stroje může lišit od pouhého zápisu chyby do systémového záznamu pro další analýzu až po korekci řízených parametrů během tisku k záchraně běžícího procesu.

Často pouhé sledování parametrů procesu bývá při posuzování vyrobeného dílu nedostačující, obzvláště u aditivní výroby. U některých úloh vznikají požadavky nejenom na spolehlivost a kvalitu výroby, ale také na další certifikaci vyrobených dílů [4]. V neposlední řadě jsou také kladené požadavky na opakovatelnost výsledku tisku od dílu k dílu, od materiálu k materiálu, ode dne ke dni a od stroje ke stroji. Proto je v poslední době snahou zavádět metody nedestruktivního testování (NDE) vyrobeného dílu do procesu tisku [90, 91, 92]. Avšak většina existujících metod NDE je navržena pro technologie výroby z kovových prášků. Například fluorescenční penetrační zkoušky (FPI), testování vířivými proudy (ET) a magnetická prášková metoda (MPI) se experimentálně používají pro technologie selektivního tavení laserem (SLM) nebo přímého spékání laserem (DMLS) [4, 93, 94, 95, 96]. Aplikace většiny známých metod NDE výhradně pro

kovový tisk je způsobena jejich fyzickým základem, umožňujícím práci pouze s kovovými materiály. Dalším faktorem ovlivňujícím rozvoj metod NDE je větší zájem o detekci kovových výrobků v porovnání s výrobky z polymerů. Je to vyvoláno tím, že se modely vytištěné z kovů častěji používají jako hotové výrobky. Dalším důvodem je to, že tisk náhradního dílu z plastu může být výhodnější z pohledu materiálových a časových nákladů než testování vytištěného vzorku vhodnou NDE metodou.

Vzhledem k výše zmíněným faktorům bylo jedním z cílů této práce navrhnout *online* systém pro detekci chyb. Jinak řečeno, navržený systém musí pracovat na místě tisku (*in situ*). To znamená, že měření, zpracování informací a vyhodnocování chyb se musí provádět během tisku na řídicím systému tiskárny. Další důležitý požadavek byl kladen na to, aby čas mezi vznikem chyby a její detekcí byl minimální. Samozřejmě, stejně jako u každé metody detekce chyb, byl kladen důraz na vysokou spolehlivost systému, obzvláště ve věci chybného zpracování.

## 4.1 Základní princip navržené metody

U SL tisku směrem nahoru je největší nevýhodou spojení vytvrzené vrstvy vytištěného modelu současně s platformou a dnem nádrže (viz podkapitola 2.4.2). Proto se během každého zvednutí platformy nahoru musí překonat síla přilepení vrstvy ke dnu [97]. Síla, kterou musí tiskárna při odlepování vytištěné vrstvy překonat se skládá z několika dílčích částí. Jsou to Van der Waalsovy síly, chemické vazby a přísavné síly [28]. Van der Waalsovy síly a chemické vazby mezi vytvrzenou vrstvou a dnem nádrže vznikají pokaždé. Jejich velikost závisí na použitém tiskovém materiálu a materiálu, z něhož je vyrobeno dno nádrže (viz podkapitola 3.4). Podstatný vliv na velikost sil chemických vazeb mají také stanovené parametry tisku, obzvláště čas ozařování vrstvy a rychlost zvednutí platformy [97]. Velikost síly způsobená přísáváním závisí na konkrétním tištěném modelu. Pokud v nějaké vrstvě během tisku vznikne struktura podobná přísavce, zobrazené na obrázku 4.1 [98], bude při odlepování docházet k většímu efektu přisání modelu ke dnu nádrže.

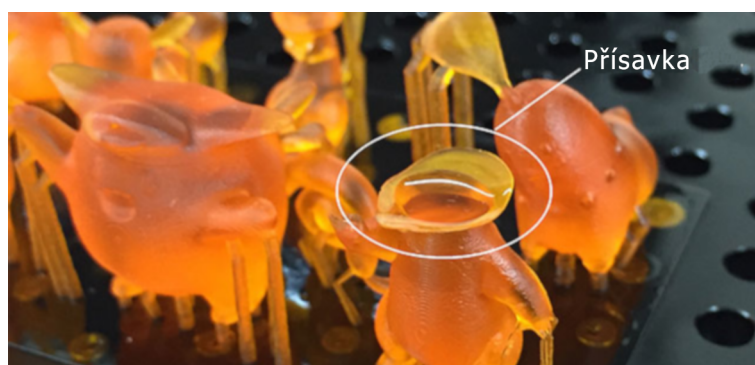
Na základě experimentů na předchozí generaci DLP tiskárny byly stanoveny závislosti síly vznikající při odlepování vytištěné vrstvy modelu ode dna nádoby s fotopolymerem na ploše tisknuté vrstvy [A4]. Také je známa a namodelována závislost síly na

rychlosti pohybu platformy nahoru při odlepování [99, 100].

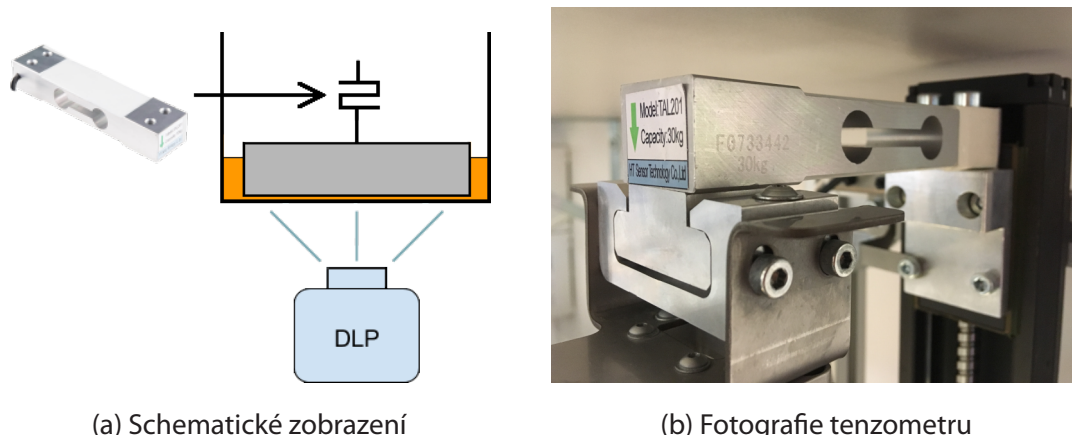
Výše popsané fyzické jevy mají negativní účinek na tisk a jsou proto nežádoucí. Síla, se kterou je nová vrstva v kontaktu ke dnu nádrže, může překročit sílu, se kterou se model drží pevně na platformě. Taková situace může nastat během odlepování vytvrzené vrstvy. V tento okamžik dojde k úplnému nebo částečnému (záleží na modelu a konkrétní situaci) odlepení tisknutého modelu od platformy. Při vzniku popsané situace dochází k chybě tisku. Model se při odlepení od platformy bude nacházet na dně nádrže a při dalším ozařování se k němu bude víc a víc přilepovat. Při pokračování tiskového procesu po upadnutí modelu z platformy dochází k degradaci horní vrstvy dna nádrže a může dojít k jejímu poškození. Cílem navrženého systému je zachytit tuto chybu a zastavit tisk při jejím vzniku.

Pro sledování správného průběhu tisku bylo rozhodnuto měřit síly vznikající při odlepování a sledovat jejich průběh. Proto se v tiskárně místo konzoly, na kterou je zavěšena platforma, používá nosník se zabudovaným tenzometrickým snímačem. Schematický model umístění čidla a skutečné provedení jsou zobrazeny na obrázku 4.2.

Pro snímání síly se používá tenzometrický snímač typu TAL 201. Při návrhu konstrukce měřicí soustavy se počítalo také s robustností nosníku, na němž je snímač umístěn. Je to dáno tím, že celá konstrukce musí unést nejenom síly vznikající během tisku, ale také platformu spolu s tištěným modelem. V závislosti na velikosti vznikajících sil se dají použít rozměrově a tvarově stejné snímače s různou maximální velikostí měřených sil od 30 do 1000 N. Na obrázku 4.2b je zobrazen jeden z řady snímačů používaný pro měření sil při tisku keramiky s maximální přípustnou hodnotou sil, necelých 300 N.

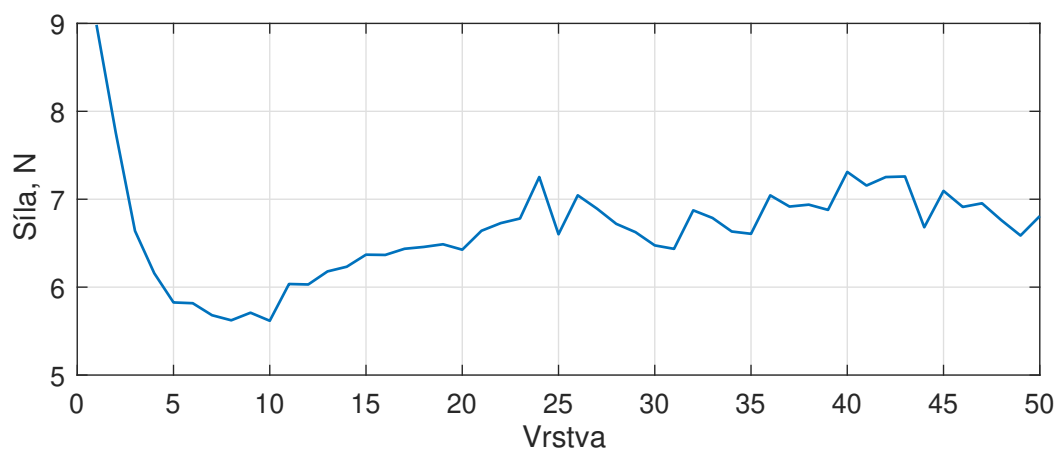


Obrázek 4.1: Přísavka vzniklá během tisku modelu



Obrázek 4.2: Umístění tenzometru v tiskové soustavě

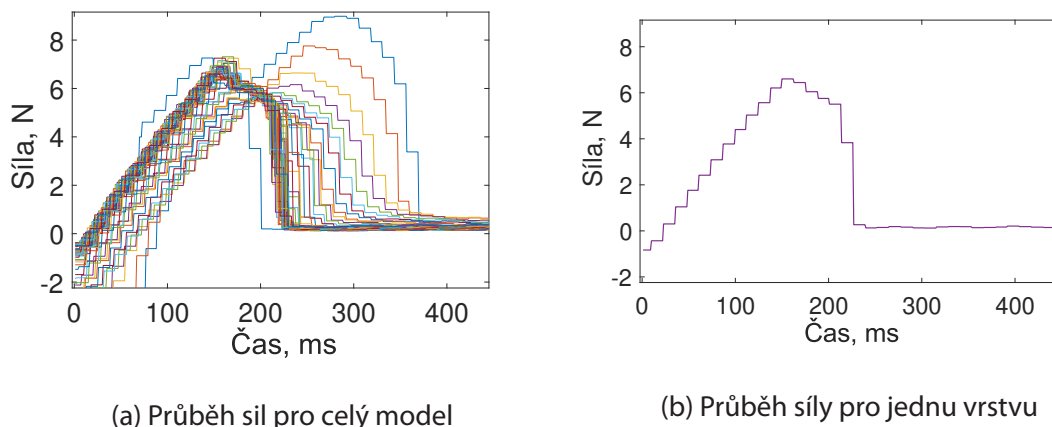
Z obrázku 4.2 je patrné, že snímač je umístěn tak, aby snímal veškeré namáhání vznikající na platformě. Proto musí být dodatečně zkalibrován takovým způsobem, aby na výstupu měl nulovou hodnotu v zavěšeném stavu s nasazenou platformou. Více informací o kalibraci čidla se nachází v podkapitole 4.3.3, věnované softwarovým záležitostem.



Obrázek 4.3: Maximální hodnoty sil v jednotlivých vrstvách

Na obrázku 4.3 je zobrazen průběh maxim sil, vzniklých během odlepování vytištěných vrstev při pohybu platformy nahoru. Vytištěný model se skládá z 50 vrstev a v každé vrstvě se počítá maximální hodnota vzniklé síly. Tloušťka jedné vrstvy pro tisk je stanovena na 100  $\mu\text{m}$ . Všechny vrstvy mají stejnou plochu po celém modelu. Poměrně velký skok síly na začátku tisku je příznačný pro tisk jakéhokoliv modelu. Tento skok je

závislý na ploše tisknuté vrstvy modelu a na ploše platformy. Dalším faktorem, který ovlivňuje skok na začátku, je síla, se kterou je platforma přitlačena ke dnu nádrže na začátku tisku. Síly držící platformu přitlačenou ke dnu se zvýšením mezery mezi platformou a dnem klesají a ve vzdálenosti přibližně 0,5 mm ode dna (záleží na použitém materiálu, tvaru platformy a dalších faktorech) se už neprojevují ve výsledcích měření. Proto se v algoritmech popsaných v podkapitole 4.2 výsledky měření v prvních vrstvách neberou v úvahu a při vzniku chyby na začátku tisku není systém NDE schopný je identifikovat.

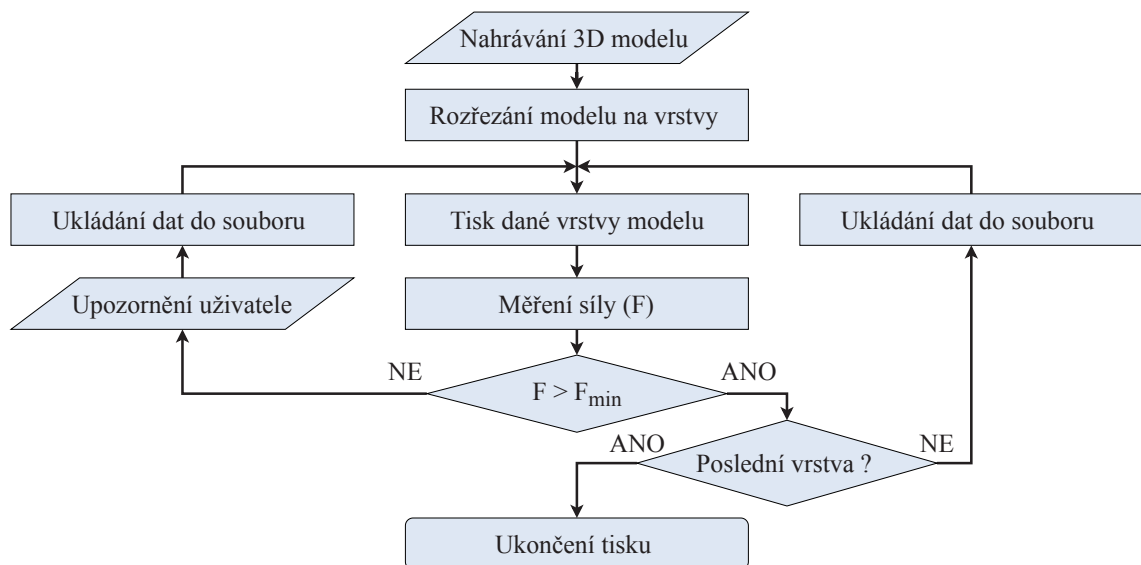


Obrázek 4.4: Průběh sil pro každou vrstvu modelu v čase

Na obrázku 4.4 jsou zobrazeny naměřené síly pro každou vrstvu zvlášť. Graf na obrázku 4.4a obsahuje naměřené hodnoty sil ve všech 50 vrstvách v čase. Čas je představen vzorkovací frekvencí, kterou uživatel může nastavit pro každé měření zvlášť. Z grafu je patrné, že se maximální hodnota síly pro každou vrstvu nachází v přibližně stejném časovém intervalu. Výjimku tvoří maximální hodnoty prvních několika vrstev, které jsou za prvé posunuté v časové ose směrem k většímu času, za druhé ve svislé ose síly se začínají v záporných hodnotách. Je to důsledkem toho, že je platforma v prvních vrstvách přitlačena ke dnu a vznikají tam síly závislé na ploše celé platformy, jak již bylo popsáno výše. Na obrázku 4.4b je zobrazen průběh síly v čase pro patnáctou vrstvu modelu.

## 4.2 Algoritmy detekce chyb

Pro návrh *in situ* systému detekce chyb, bylo potřeba navrhnout algoritmus, podle kterého by se analyzoval měřený průběh sil. Výstupem z algoritmu je rozhodnutí o výskytu chybového stavu. Na začátku byl navržen a zrealizován algoritmus, který nezasahoval do procesu tisku, ale jenom upozorňoval na případnou chybu. Proto se dlouhou dobu používal dvoustavový algoritmus pro odzkoušení samotného principu měření, zjištění jeho spolehlivosti a možnosti použití pro automatickou detekci.



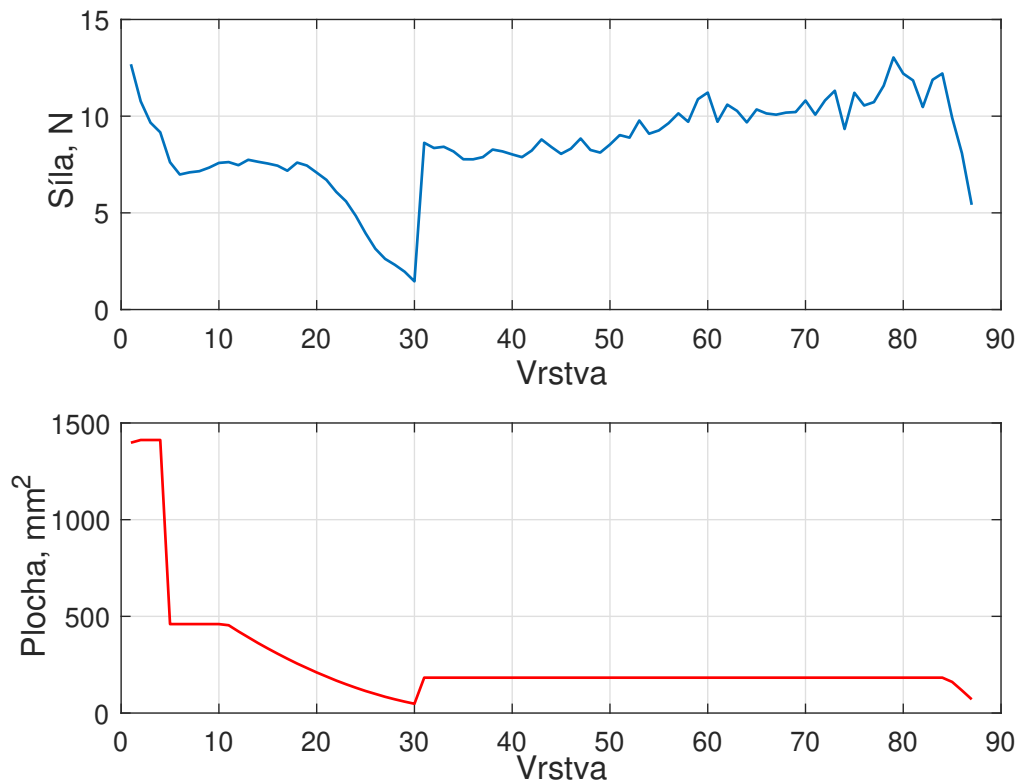
Obrázek 4.5: Schematické znázornění jednoduchého algoritmu detekce chyb

Grafické znázornění algoritmu je představeno na obrázku 4.5. Algoritmus nezasahuje do procesu, ale jenom porovnává naměřenou hodnotu síly  $F$  pro danou vrstvu s předem danou kritickou hodnotou  $F_{min}$ . Při přesažení kritické hodnoty algoritmus upozorňuje na chybu. Kritickou hodnotu proces nepočítá sám, ale dostává ji od uživatele. Uživatel podle své zkušenosti nastavuje hodnotu před zahájením tisku. V průběhu tisku algoritmus ukládá aktuální průběh síly v čase do souboru pro další analýzu.

Používáním výše popsaného algoritmu bylo možné odhadnout stav, ve kterém mezi platformou a dnem nevznikala žádná síla, nebo byla síla ustálena na určité nízké hodnotě. Tímto způsobem lze detekovat chybu, při níž se celý model odlepí od platformy a zůstane na dně nádrže. Při praktických zkouškách bylo zjištěno, že u postavené tiskárny se jedná o nejrozšířenější chybu. Pro komplexní řešení, které by zahrnovalo

i další chyby, bylo třeba navrhnout a zrealizovat komplexnější algoritmus.

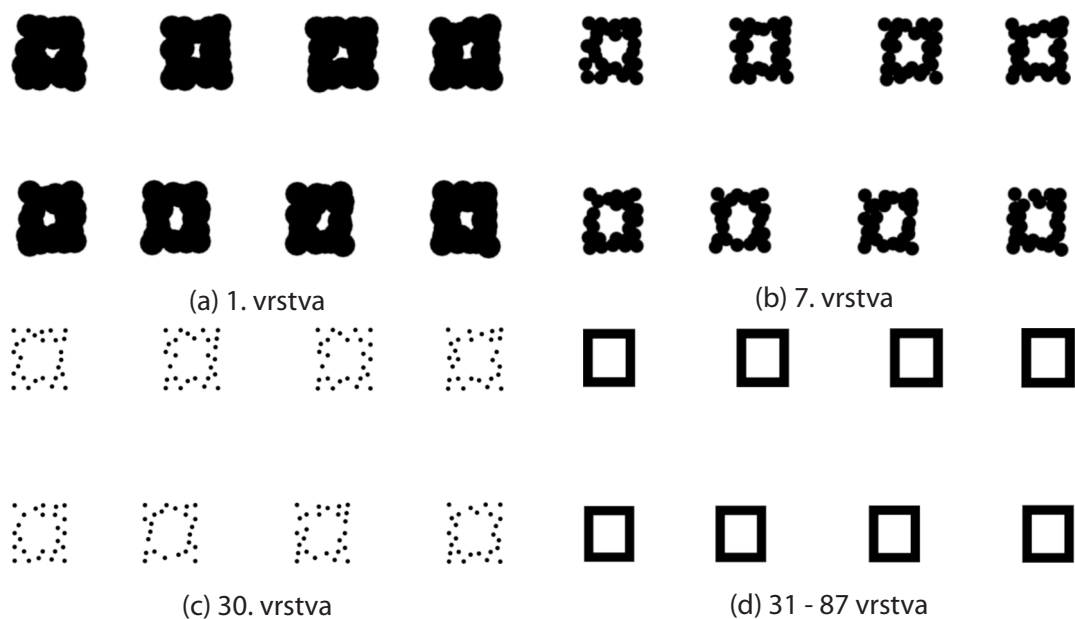
Jako základ byl použit stejný systém na měření sil. Nový algoritmus byl doplněn systémem pro výpočet kritické hodnoty síly v závislosti na ploše průřezu modelu, který se v daný okamžik tiskne. Více informací o závislosti síly na ploše tisknuté vrstvy je k dispozici ve člancích [A2, A4], [97] a v podkapitole 5.2, kde je detailně popsán experiment pro hledání zmíněné závislosti.



Obrázek 4.6: Velikost síly odlepování a plochy vrstvy v závislosti na pořadí vrstvy modelu

Pro znázornění závislosti průběhu síly na ploše vrstev modelu jsou na obrázku 4.6 zobrazeny dva grafy. Modrá křivka ukazuje naměřenou sílu při tisku modelu s podporama, který byl tvořen osmdesáti sedmi vrstvami. Na spodním grafu je červenou křivkou je zobrazena velikost tiskových ploch po rozřezání v každé vrstvě. Průřezy jednotlivými vrstvami tohoto modelu jsou zobrazeny na obrázku 4.7. Pro lepší znázornění jsou na tomto obrázku barvy invertované. Jedna se o neupravené obrázky, exportované z řídicího softwaru, které se skutečně promítaly projektorem při tisku modelů. Vrstvy 1 až 30





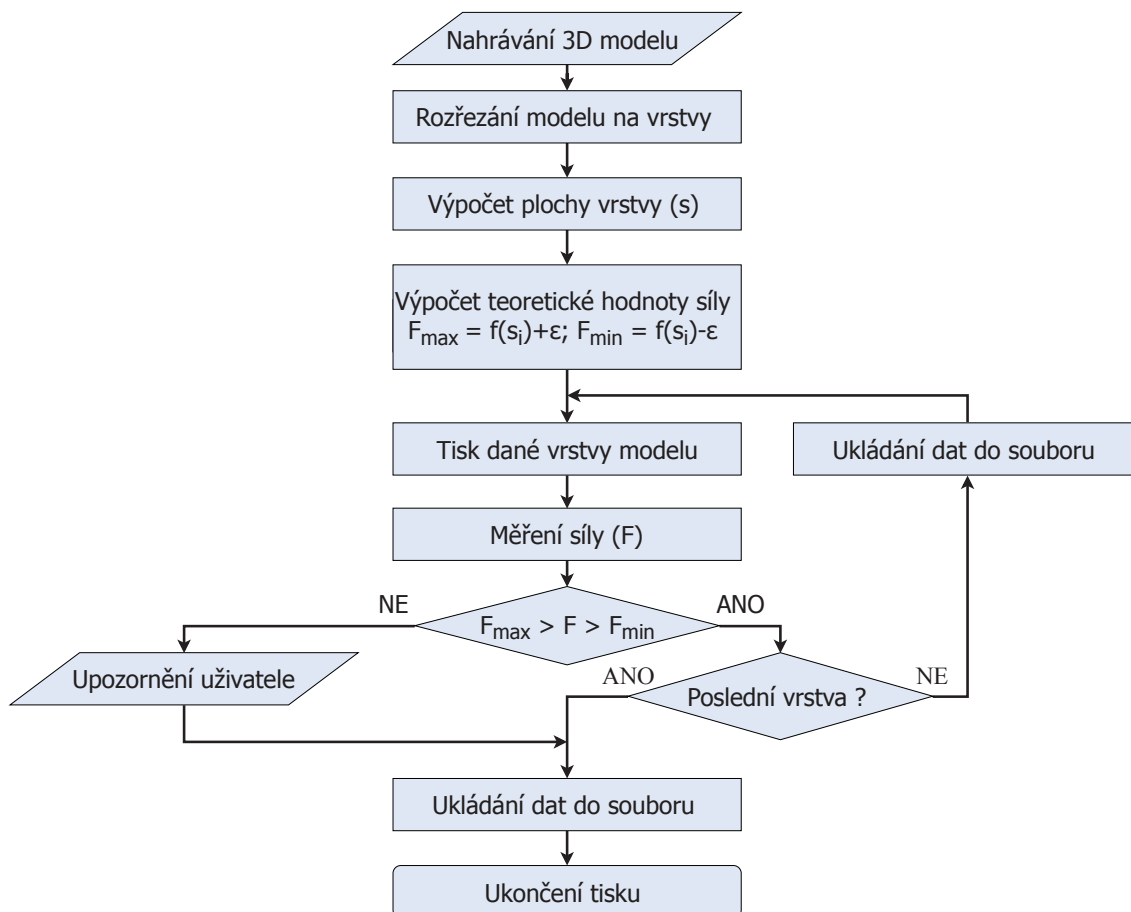
Obrázek 4.7: Vrstvy modelu pro průběh síly zobrazený na obrázku 4.6

tvořily podpory modelu, vrstvy 31 až 87 jsou vrstvami stavěného modelu.

Finální verze algoritmu detekce chyb je zobrazena na obrázku 4.8. Uvedený algoritmus, na základě předem známé plochy tisknuté vrstvy, vypočítává maximální  $F_{max}$  a minimální  $F_{min}$  hodnotu očekávané síly. Po naměření skutečné hodnoty síly  $F$  se kontroluje, zda se síla nachází v očekávaném rozsahu hodnot. Pokud je síla mimo rozsah, systém hlásí chybu a ukončuje tisk. Spolehlivost systému vůči chybnému zpracování byla vylepšená přidáním čekání na vznik několika za sebou jdoucích chybových hlášení. Pokud jejich počet přesáhne předem zvolené číslo (většinou 3 hlášení za sebou), systém zastaví tisk. Robustnost tohoto algoritmu vůči chybnému zpracování umožnila zásah do procesu tisku.

#### 4.2.1 Výhody systému NDE

**Nemění se čas tisku.** Navržený a aplikovaný systém detekce a zpracování chyb je implementovaný do běžného procesu tisku a neprovádí komplikované výpočty, například jako algoritmy využívající rozpoznávání obrazu pro FDM tisk [101]. Program NDE běží současně s hlavním řídicím procesem na mikropočítači tiskárny (viz podkapitola 3.1.3). Proto doba tisku zůstává stejná při chodu tiskárny se zapnutým a vypnutým systémem NDE.



Obrázek 4.8: Schématické znázornění komplexního algoritmu detekce chyb

**Pozdější analýza tisku.** Pro každý tisk si program vytvoří nový adresář, kam zapisuje informace o naměřených silách a fyzických parametrech modelu. Veškerá naměřená data lze při pozdější analýze použít při hledání zdroje chyby. Při tisku mohou nastat situace, u nichž není zjevný přesný faktor, který způsobil vznik chyby. Při detailnější analýze průběhu sil se mohou některé faktory zamítnout, některým se přidá větší váha. Tato možnost zvyšuje rychlost stanovení vhodných parametrů pro tisk nových materiálů.

**Certifikace procesu tisku.** Data naměřená během tisku lze použít i pro pozdější vyhodnocování vytištěných modelů, u kterých během tisku nedošlo k chybě. Podle předem stanovených kritérií je možné aplikovat certifikační metody pro každý typ výrobku.

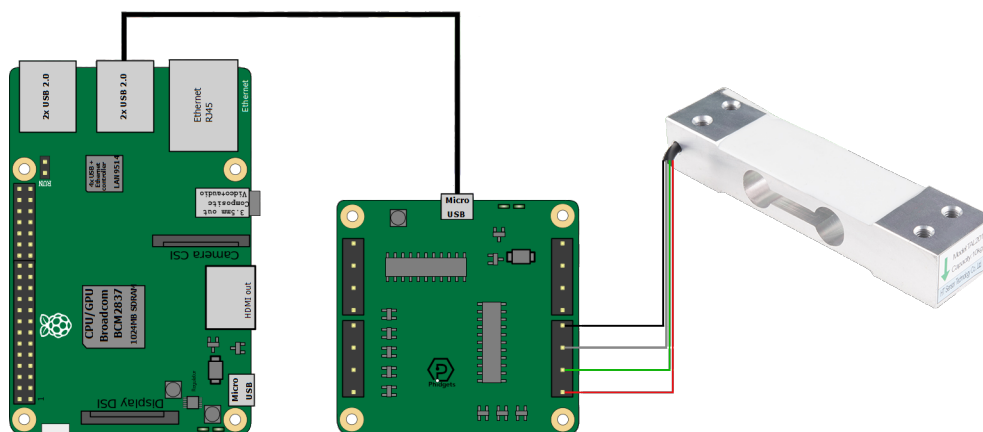
## 4.2.2 Nevýhody systému NDE

**Souběžně běžící proces.** Velmi obtížná integrace algoritmu do tiskového procesu ho nedovolila zabudovat do firmwaru tiskárny. Proto běží měřicí program souběžně s řídicím programem tiskárny. Během dlouhodobých testů nebyl pozorován žádný vliv procesu měření na běh hlavního programu. Spuštění systému detekce chyb musí být prováděno před zahájením tisku, což občas zabírá více času než spuštění samotného tisku. Přestože časy jsou v porovnání s trváním tisku zanedbatelné, zapojení NDE algoritmu do tisku klade dodatečné požadavky na obsluhu stroje.

**Chybné zpracování.** K tomu, aby měl systém detekce fyzický vliv na proces tisku, se mu musela přidat možnost zastavovat tisk. V důsledku se při chybném zpracování algoritmu pozastaví celý proces tisku, který může být operátorem opětovně spuštěn z místa přerušení po zkontrolování stroje.

## 4.3 Realizace navrženého algoritmu NDE

Po návrhu algoritmů popsaných v podkapitole 4.2 je bylo potřeba zrealizovat. V této podkapitole jsou popsány jednotlivé části řešení a jejich zapojení do celkového systému NDE.



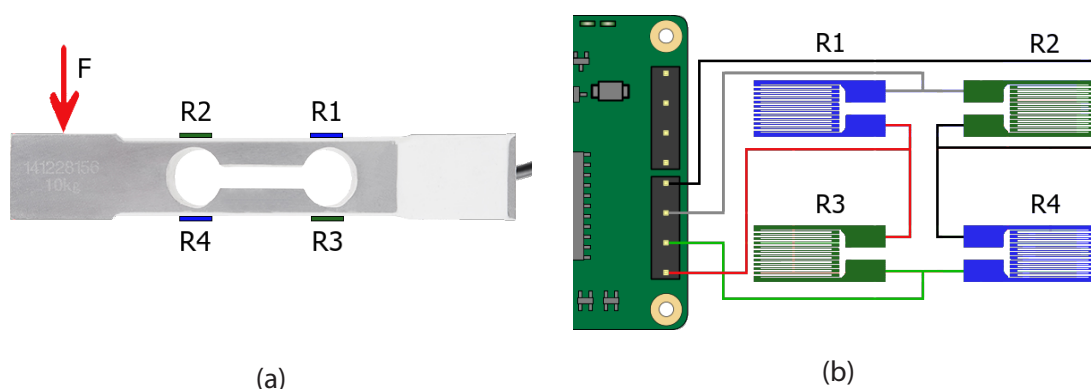
Obrázek 4.9: Měřicí řetězec pro systém NDE

Na obrázku 4.9 jsou schematicky zobrazeny hlavní komponenty navrženého a implementovaného NDE systému do tiskárny. Vpravo se nachází hlavní řídicí jednotka

Raspberry Pi, která současně řídí tiskárnu (viz podkapitola 3.1.3) a stará se o chod algoritmu detekce chyb. Uprostřed je na obrázku zobrazena měřicí deska Phidget Bridge, která plní funkci převodníku signálu ze snímače na unifikovaný tvar [102]. Je navíc programovatelná a má vlastní API, který dovoluje řídit desku z nadřazeného mikropočítače. Vpravo je na obrázku 4.9 zobrazen snímač síly, který je připojen k jednomu ze čtyř vstupů měřicí desky.

### 4.3.1 Snímač síly

Jako snímač síly pro účely měření síly odlepování se používá deformační snímač s tenzometry umístěnými na nosníku namáhaného silou. Na tiskárně je možno použít jakýkoliv snímač z řady TAL 201 od firmy HT Sensor Technology. Pro vyšší citlivost celého systému byl vybrán snímač se zapojením všech čtyř tenzometrů do plného můstku [103]. Tento typ zapojení má lineární průběh výstupní hodnoty a tepelnou kompenzaci při delším měření. Na obrázku 4.10 je zobrazeno rozmístění tenzometrů uvnitř snímače a jejich zapojení.



Obrázek 4.10: Umístění (a) a zapojení (b) tenzometrů u použitého snímače síly

Na obrázku 4.10a je schematicky zobrazeno rozmístění tenzometrů R1, R2, R3 a R4 ve snímači. Červenou šipkou je ukázán směr síly  $F$  působící při odlepování. Tenzometry R1 a R4 se působením síly  $F$  roztahují, R2 a R3 se zkracují.

Na obrázku 4.10b je zobrazeno zapojení jednotlivých tenzometrů do plného můstku. Nevýhodou tohoto typu zapojení je výrazná závislost výstupu na velikosti napájecího napětí. Například statické zesílení  $K$  snímače síly řady TAL 201, s rozsahem měření  $F_r$  10 kg zátěže, je stanovené výrobcem na 2 mV/V. Tato hodnota znamená, že při napá-

jení můstku 1 V a zatížení snímače 10 kilogramy na výstupu dostaneme hodnotu napětí 2 mV. Spočítaná hodnota odpovídá sklonu kalibrační přímky, který se v obecném případě počítá z rovnice 4.3.1. Povolené napájecí napětí  $V_{nap}$  pro řadu TAL 201 je stanoveno v rozmezí od 5 do 18 V [104]

$$m = \frac{K \cdot V_{nap}}{F_r}. \quad (4.3.1)$$

Napájecí napětí pro snímač je dodáváno z měřicí desky, která je přes USB sběrnici připojena na Raspberry Pi. Proto je hodnota napájecího napětí pro tenzometrický můstek stabilizovaných 5 V.

Vzhledem k tomu, že je snímač při měření síly odlepování v počátečním stavu zatížený hmotností platformy a jejím uchycením, kalibrační přímku s vypočítaným sklonem nelze použít. Je tedy nutné počítat také s posunutím nulového bodu. Proto je nutno snímač před měřením zkalibrovat. Proces kalibrace snímače je detailně popsán v podkapitole 4.3.3.

### 4.3.2 Měřicí deska

Pro zpracování signálů ze snímače síly a komunikaci s řídicí jednotkou tiskárny se používá měřicí deska PhidgetBridge. Deska je připojena k hlavní řídicí jednotce přes USB kabel. Program pro účely NDE, který komunikuje s deskou prostřednictvím API, poskytnuté výrobcem k desce, také běží na hlavní řídicí jednotce.

Deska obsahuje výstupy na připojení čtyř nezesílených Wheatstonových můstků. Pro účely měření síly používáme pouze jeden vstup na připojení plného můstku tvořeného tenzometry. Technické specifikace měřicí desky jsou uvedené v tabulce 4.1 [105].

### 4.3.3 Kalibrace

V této sekci je popsán způsob kalibrace snímače síly. Proces kalibrace se musí provádět po každé výměně snímače. Při tisku modelů, u kterých se síly při odlepování pohybují pod 10 N, je doporučeno provádět kalibraci před každým tiskem. Kalibrace je také nutná při výměně platformy za jiný typ kvůli změně hmotnosti soustavy a posunutí kalibrační přímky.

Tabulka 4.1: Parametry a specifikace PhidgetBridge

Parametr	Hodnota
Napětí USB, VDC	4,5 - 5,25
Maximální odběr proudu, mA	500
Odběr proudu v nezatíženém stavu, mA	35
Proud dostupný na výstupech, mA	465
Doporučený průřez kabelů, mm <sup>2</sup>	0,13 - 1,3
Rozlišení převodníku, bitů	24
Vzorkovací interval, ms	8 - 1000

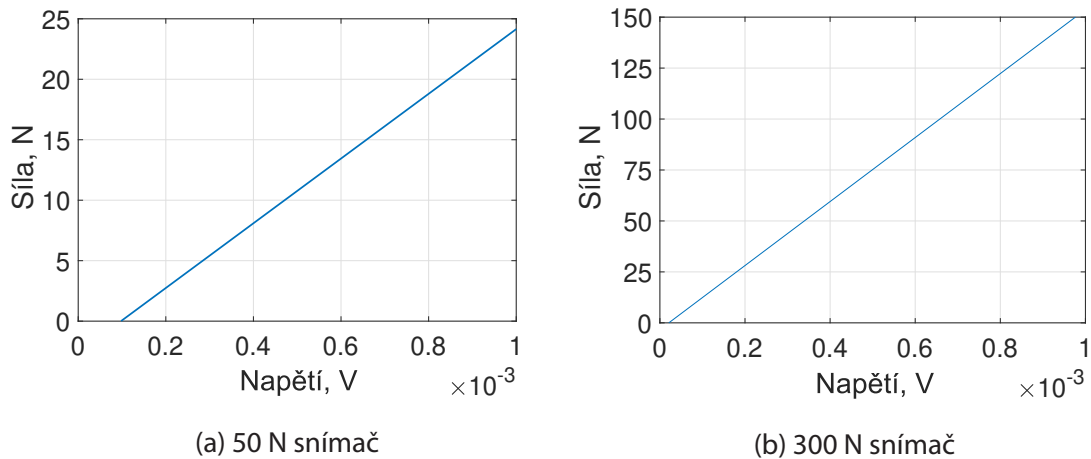
V podkapitole 4.3.1 je popsáno, že na výstupu snímače je přítomné napětí, jehož velikost odpovídá hmotnostnímu zatížení nosníku. Charakteristika snímače je lineární, proto ho můžeme kalibrovat pomocí lineární funkce

$$F = m \cdot V_m + b. \quad (4.3.2)$$

Pro sestavení kalibrační přímky stačí dva body. Prvním bodem je vždy hmota samotné nezatížené platformy. Druhý je potřeba experimentálně změřit. Pro hledání druhého bodu je třeba zatížit platformu závažím se známou hmotností a změřit aktuální hodnotu výstupu snímače. Měření se provede s uživatelem určeným počtem opakování a pro výpočty se použije střední hodnota ze všech měření. Při kalibraci také lze zadat čas mezi jednotlivými měřeními. V programu je rovněž ošetřen výskyt hodnot mimo rozsah snímače. Výsledná síla ve vzorku (4.3.2) je označena jako  $F$  a je v Newtonech, napětí  $V_m$  naměřené čidlem je ve Voltech. Parametry  $m$  a  $b$  jsou hledané parametry. Parametr  $m$  je sklon,  $b$  je posun nebo ofset způsobený nenulovou hmotností platformy.

Po každé kalibraci dostaneme trochu odlišné parametry přímky. Také pro různé snímače se parametry budou lišit. Na obrázku 4.11 jsou zobrazené závislosti síly na napětí můstku pro dva typy použitých čidel s jiným rozsahem měření.

V příloze D.3 je k nahlížení zdrojový kód části programu, který řeší hledání parametrů kalibrační funkce.



Obrázek 4.11: Lineární závislost mezi silou a napětím na snímačích

Výhoda popsaného kalibračního algoritmu spočívá ve flexibilitě měření. Mohou se používat různé snímače s odlišnou citlivostí od různých výrobců. Kvůli tomu, že čidlo už je v počátečním stavu zatíženo platformou, není použití kalibrační přímky od výrobce doporučeno. V případě jejího použití by se musel přidávat posuv do samotného měření, což by mohlo mít špatný vliv na rychlost a přesnost. Další výhodou použitého kalibračního algoritmu je to, že se časem vlastnosti čidla mění a pomocí kalibrace jsou po celou dobu jeho životnosti k dispozici přesná data z měření.

#### 4.3.4 Program

Program pro detekci chyb se skládá z několika modulů a zahrnuje kalibraci, měření, detekci chyb a ukládání naměřených průběhů sil. Program se spustí ručně před zahájením tisku přes příkazový řádek operačního systému řídicího počítače. Řídicí počítač běží na OS Raspbian Stretch Lite, který pro urychlení obsahuje jen komponenty nezbytné pro běh tiskárny. Proto je uživatelské rozhraní pouze v podobě příkazového řádku, bez žádných grafických komponent. Detailnější informace o konfiguraci řídicí jednotky se nacházejí v podkapitole 3.1.3. Pro připojení k uživatelskému rozhraní se používá SSH protokol. Klient uživatele se s použitím statické IP adresy připojí k tiskárně. Uživatel se pak přihlásí obvyklým způsobem přes jméno a heslo k uživatelskému účtu a spustí program pomocí standardních Linuxových příkazů:

```
1 pi@raspberrypi:~ $ cd /home/pi/Documents/DataAcquirer/  
2 pi@raspberrypi:~/Documents/DataAcquirer $ sudo ./GrabData
```

První řádek je zapotřebí, aby se klient mohl dostat k umístění zkompilevaného programu. Druhý řádek spustí program s oprávněním administrátora. První část programu, která se spustí na začátku, inicializuje měřicí desku a vyhradí kanál pro spojení. Při úspěšném spojení program spustí kalibrační část. Zde se program zeptá, jestli uživatel chce provést kalibraci snímače, zadat parametry kalibrační přímky ručně (z předchozích kalibrací) nebo začít měřit síly s implicitním nastavením parametrů. Při výběru první možnosti program provede uživatele celým procesem kalibrace, při kterém bude uživatel muset podle pokynů zadat do programu počet měření a vzorkovací frekvenci. Program změří hodnotu offsetu se zatížením snímače jenom hmotností platformy. V dalším kroku program vyzve uživatele k zadání hmotnosti kalibračního závaží. Zde musí uživatel vybrat závaží odpovídající rozsahu měření snímače  $F_L$ . Minimální hodnota kalibračního závaží by měla stanovit polovinu rozsahu snímače [106]. Program na základě měření zjistí druhý bod kalibrační přímky a spočítá parametry hledané funkce. Nadále bude program používat zjištěné parametry přímky pro přepočtení výsledků měření. Dalším krokem bude spuštění hlavní části programu, která měří, vyhodnocuje a ukládá změřené hodnoty.

Parametry zjištěné během kalibrace jsou dostupné pouze za chodu programu, při dalším tisku je potřeba buď zkalibrovat snímač znovu, nebo zadat hodnoty z předchozích měření. Možnost zadání parametrů kalibrační přímky usnadňuje a urychluje proces, když není potřeba kalibrovat snímač. Při volbě této možnosti program vyzve uživatele k zadání parametrů  $m$  a  $b$ , které odpovídají sklonu a posuvu kalibrační přímky (detailnější popis se nachází v podkapitole 4.3.3). Také existuje samotný program pro kalibraci čidla, který je možné spustit po připojení k Raspberri Pi prostřednictvím následujících příkazů:

```
1 pi@raspberrypi:~ $ cd /home/pi/Documents/DataAcquirer/Calibrator  
2 pi@raspberrypi:~/Documents/DataAcquirer/Calibrator $ sudo ./calibrator
```

Použití samostatného kalibračního programu je doporučeno z pohledu spolehlivosti. Ne každé měření dokáže stanovit optimální parametry. Navíc kalibrační program



na konci měření dovoluje přeměřit závaží známé hmotnosti pomocí spočítaných parametrů a zjistit přesnost snímače. Po zjištění nejvhodnějších parametrů pro používaný snímač se tato data mohou zadat buď nastálo přes konstanty do programu, nebo ručně při každém spuštění.

Hlavní část programu, která se spustí po úspěšné kalibraci, je samotné měření sil. Tady jsou přístupné dvě verze programu, ze kterých uživatel může vybírat. První verze odpovídá algoritmu zobrazenému na obrázku 4.5 a nezasahuje do procesu tisku, jenom měří a ukládá hodnoty. Tento program se dá použít pro odzkoušení nových materiálů a zjištění jejich chování při odlepování. Také se může používat při běžném tisku za přítomnosti obsluhy. Jinak by se měla používat druhá verze programu odpovídající algoritmu zobrazenému na obrázku 4.8. Tento program umí zasahovat do chodu tiskárny a zastavovat tisk. Obě verze programu pro zjištění správného okamžiku měření hlídají hodnotu signálu na výstupu ovladače motoru pro volbu směru otáčení. Pokud se platforma posouvá směrem nahoru, na výstupu směru otáčení motoru je signál vysoké úrovně. Jakmile program zjistí změnu stavu z nízké úrovně na vysokou, spustí měření trvající do ukončení pohybu platformy směrem nahoru. Data o ploše vrstev program přečte ze souboru typu Json, který se vygeneruje slicerem během rozříznutí modelu na vrstvy. Zdrojový kód programu určený ke čtení dat je uveden v příloze D.4. Nominální sílu na jednotku plochy a odchylku zadá uživatel na základě hodnot zjištěných z předchozích měření. Pokud je zjištěná síla mimo rozsah, program inkrementuje proměnnou, do níž se ukládá počet chyb. Pokud počet po sobě jdoucích chyb během jednoho tisku přesáhne hodnotu stanovenou uživatelem, program pošle řídicímu programu tiskárny chybovou hlášku. Řídicí program tiskárny v tento okamžik přerušit tisk a platforma se vrátí do výchozí polohy. Veškeré naměřené hodnoty se ukládají do textových souborů s časovým záznamem pro případné další zpracování výsledků.

## 5 Experimenty a aplikace

V této kapitole jsou popsány vybrané experimenty, které se uskutečnily na tiskárně během vývoje a poté na výsledném funkčním prototypu.

V podkapitole 5.1 je popsán experiment, který proběhl po pořízení nového projektoru. Bylo nutné ho porovnat se stávajícím projektorem pro vyhodnocení rovnoměrnosti intenzity záření na platformě. Více informací o průběhu a výsledcích experimentu je uvedeno v článku [A4].

V podkapitole 5.2 je popsán experiment, který se vztahuje k NDE systému vyhodnocování chyb tisku. Během experimentu byly na základě sledování sil vzniklých při odlepování navržené algoritmy NDE popsány v kapitole 4.2. Více informací o průběhu a výsledcích experimentu je uvedeno v článku [A2].

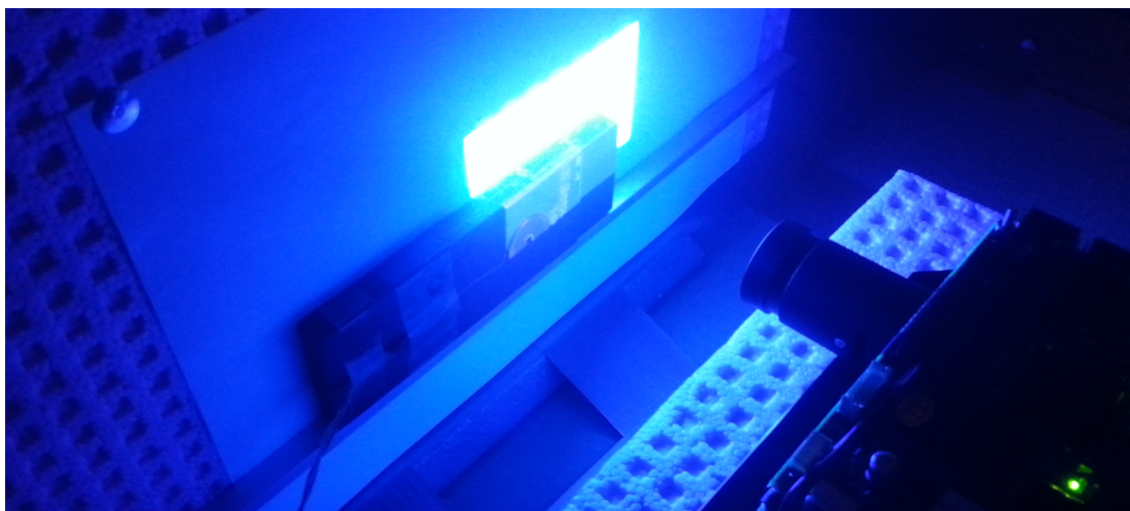
Podkapitola 5.3 popisuje experiment tisku keramického materiálu Vitrolite a jeho další zpracování. Také jsou popsány experimenty určující koeficienty smrštění materiálu po vypalování pro speciálně navržené modely. Více informací o průběhu a výsledcích experimentu je uvedeno v článku [A1].

### 5.1 Srovnání distribuce UV energie na povrchu platformy

Cílem tohoto experimentu bylo porovnat intenzitu záření dvou projektorů používaných pro DLP 3D tisk. První projektor Acer H6510BD je klasický kancelářský DLP projektor s FHD rozlišením. Druhý projektor od Texas Instrument LightCrafter E4500 je určen pro průmyslové aplikace. Základní charakteristiky pro porovnání těchto dvou projektorů jsou v tabulce 3.1, v podkapitole popisující výběr projektoru.

Měření bylo uskutečněno v několika bodech oblasti promítání. Tímto způsobem bylo také možné sledovat nerovnoměrnost ozařování povrchu v závislosti na místě pro-

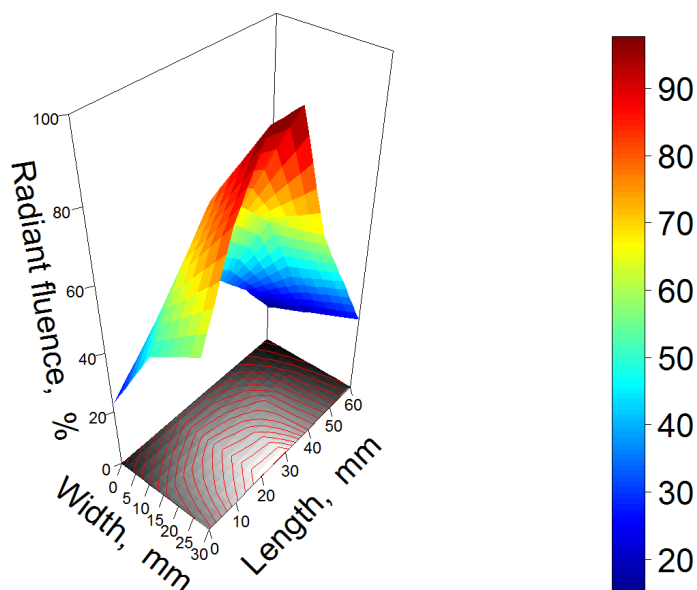
mítání. Na obrázku 5.1 je zobrazen měřicí stand, na němž probíhala měření. U prvního experimentu byly kancelářský a průmyslový projektor umístěny před deskou, na kterou se promítal obraz tak, aby ve výsledku měly stejnou velikost jednoho pixelu. Kancelářský projektor má kvůli vyššímu rozlišení větší plochu promítání než průmyslový. Druhé měření intenzity záření bylo provedeno pro průmyslový projektor při velikosti oblasti promítání rovnající se ploše platformy tiskárny. Tento experiment byl nutný ke zjištění reálné intenzity dopadajícího světla a jeho rozložení na platformě během tisku.



Obrázek 5.1: Měřicí stand na měření intenzity záření

Na obrázcích 5.2 a 5.3 byla pro znázornění nerovnoměrnosti ozařování použita relativní intenzita záření, kde hodnotě 100 % odpovídá největší intenzita pro dané měření. Na obrázku 5.2 je zobrazena relativní intenzita záření pro kancelářský DLP projektor ve vzdálenosti odpovídající velikosti plochy promítání 59,4 x 33,8 mm a velikosti jednoho pixelu projektovaného na plochu 31,25  $\mu\text{m}$ . Maximální intenzita záření, která na obrázku odpovídá hodnotě 100 %, se rovná 31  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ . Také kvůli poměrně velkému offsetu je špička posunuta na okraj plochy a v rozích propadá až o 80 %, což není vyhovující pro zaručení kvalitní a rovnoměrné polymerizace materiálu.

Na obrázku 5.3 jsou znázorněna data z měření intenzity záření průmyslového DLP projektoru LightCrafter E4500 ve dvou různých vzdálenostech od plochy promítání. Pro experiment, jehož výsledky jsou uvedeny na obrázku 5.3a, byla vzdálenost projektoru od plochy promítání zvolena tak, aby bylo dosaženo stejné přesnosti (stejně velikosti jednoho pixelu) jako u kancelářského projektoru. Avšak vzhledem k tomu, že průmyslo-



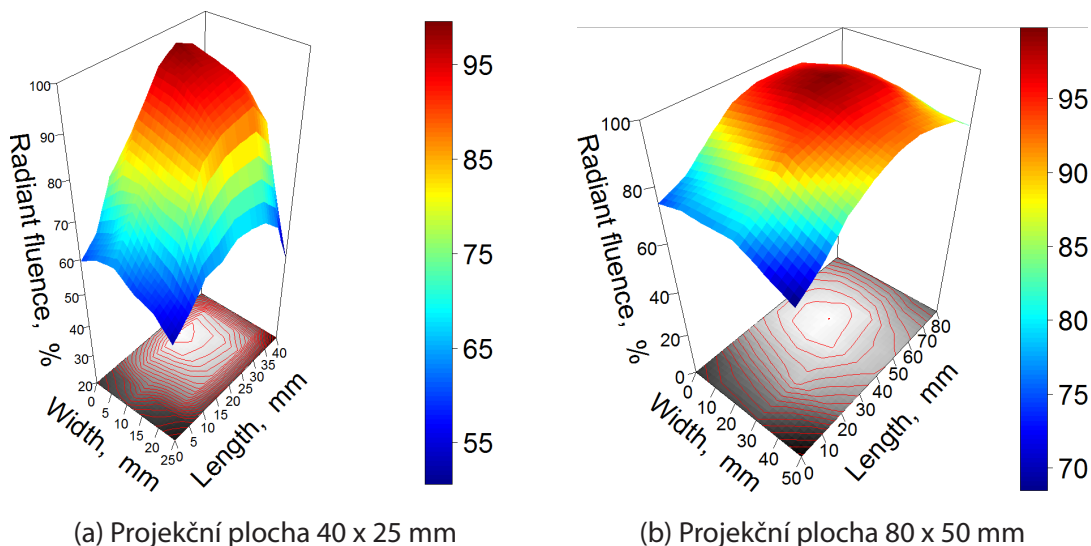
Obrázek 5.2: Relativní intenzita záření pro kancelářský DLP projektor na projekční ploše 59,4 x 33,8 mm [A4]

vý projektor má nižší rozlišení, je jeho projekční plocha menší a rovná se 40 x 25 mm při stálé velikosti pixelu 31,25  $\mu\text{m}$ . Naměřená maximální hodnota intenzity záření v tomto případě odpovídá 760  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ , což je 24krát větší hodnota než u kancelářského projektoru. Další výhodou tohoto projektoru je to, že jeho ofset je nulový a špička záření se proto nachází uprostřed plochy promítání. Propad intenzity záření v rozích je významný, její hodnoty v těchto místech se pohybují kolem 45 %.

Ke zjištění hodnoty intenzity záření a rozložení energie na platformě u průmyslového projektoru při větší vzdálenosti projekční plochy od čočky byl uskutečněn poslední experiment, jehož výsledky jsou znázorněny na obrázku 5.3b. Velikost jednoho pixelu odpovídala 62,5  $\mu\text{m}$  a plocha promítaného obrazu měla velikost 80 x 50 mm. Maximální hodnota intenzity záření při těchto nastaveních odpovídala 156  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  a propad intenzity promítaného obrazu v rozích nebyl větší než 30 %.

Experiment potvrdil, že pro účely DLP tisku je vhodnější používat průmyslový projektor LightCrafter E4500 než kancelářský. Během experimentů se také zjistila optimální vzdálenost pro běžný tisk a pokyny k nastavení času ozařování u tisku s vysokým rozlišením.

Technické detaily experimentů, vyhodnocení vlivu intenzity na přesnost tisku



Obrázek 5.3: Relativní intenzita záření pro průmyslový DLP projektor [A4]

a zkoumání dalších parametrů ovlivňujících kvalitu tisku a způsobujících chyby jsou více popsány v článku [A4].

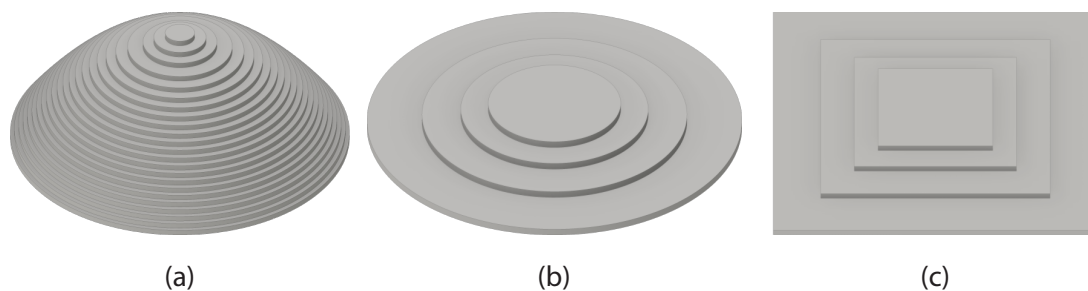
## 5.2 Měření síly při odlepování modelu a simulace chybového stavu

Experiment na měření síly během odlepování byl uskutečněn na předchozí generaci tiskárny. Jeho výsledky byly použity při návrhu stávajícího provedení tiskárny. Hlavním cílem experimentu bylo navrhnout algoritmus detekce chyb založený na sledování průběhu sil během tisku.

Na základě předchozích experimentů popsaných v článku [A5] bylo zjištěno, že závislost síly na ploše modelu je lineární. Proto bylo rozhodnuto provést širší výzkum v této oblasti a zjistit možnost použití měření sil odlepování pro účely detekce chyb.

Snímač na měření síly byl umístěn mezi platformou a konzolou. Snímač byl připojen k počítači přes měřicí desku PhidgetBridge (4.3.2). Program na sbírání a ukládání dat byl napsán v prostředí LabView s použitím knihoven výrobce desky. Současně se také snímaly informace z výstupu ovladače motoru pro volbu směru otáčení. Tímto způsobem se zredukoval počet dat, protože se ukládala pouze data při pohybu platformy nahoru. Data se sbírala s vzorkovací frekvencí 1000 vzorků za vteřinu.

První experiment byl navržen tak, aby během tisku došlo k chybě. Experiment měl za úkol stanovit možnost detekce úplného odlepení modelu. Model zobrazený na obrázku 5.4a se během experimentu musel odlepit od platformy a zůstat na dně nádrže. Odlepování bylo zajištěno nedostatečnou polymerizací v prvních vrstvách modelu, které se lepí k platformě.

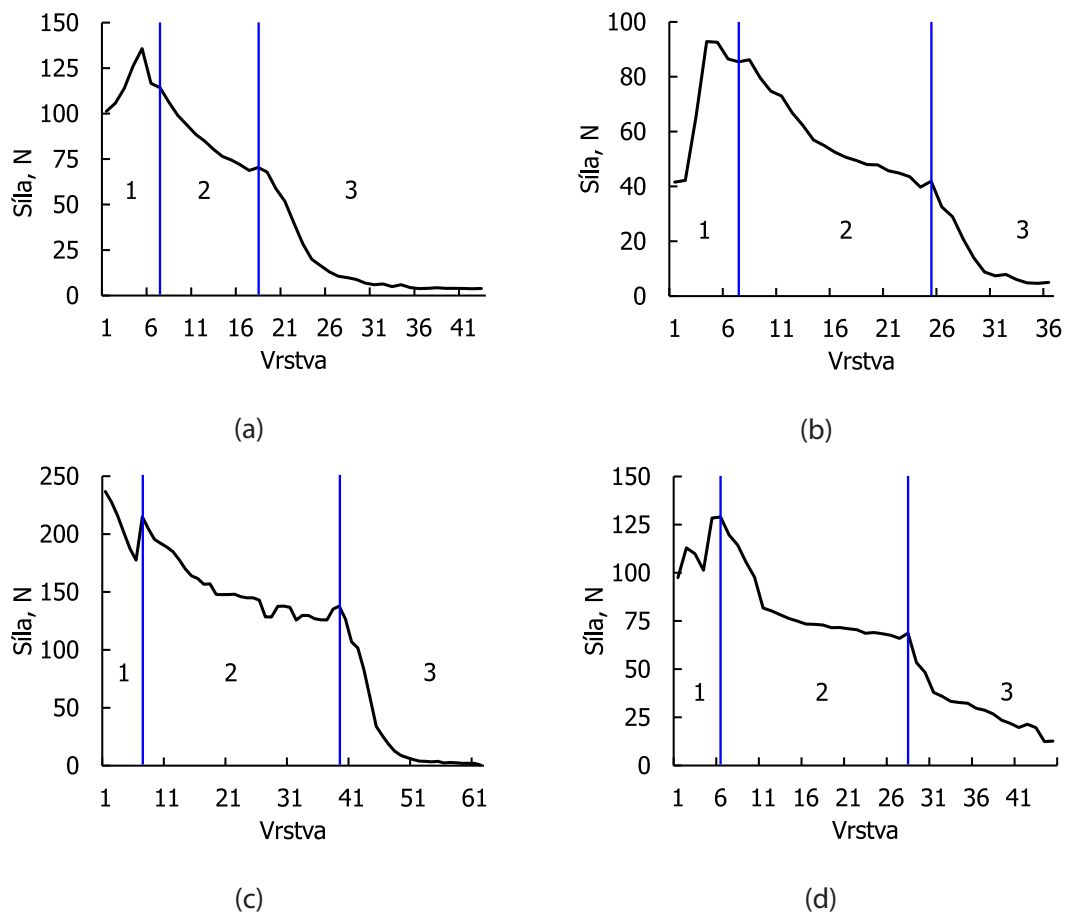


Obrázek 5.4: Modely tisknuté během experimentů

Experiment byl proveden 4krát. Přestože podmínky tisku byly stejné, chyba nenastávala ve stejné vrstvě. Cílem bylo zjistit z naměřených dat okamžik vzniku chyby a porovnat ho se skutečným okamžikem pozorovaným operátorem. Výsledné grafy průběhu sil pro 4 měření jsou zobrazené na obrázku 5.5.

Ve všech měřeních nebyl proces tisku dokončen z důvodu úmyslné chyby. Ve všech čtyřech grafech mají průběhy sil podobnou formu a lze je rozdělit do tří oblastí. Oblast průběhu tisku, označená na grafech obrázku 5.5 číslem 1, odpovídá stavu, ve kterém je platforma ponořená do fotopolymeru celou svou plochou. Proto se v této oblasti objevují maximální síly za celou dobu tisku. Tloušťka vrstvy u těchto výtisků byla nastavena na 50  $\mu\text{m}$ . Značný pokles sil začal po páté vrstvě, kde byla teoretická vzdálenost platformy ode dna nádrže 250  $\mu\text{m}$ . V prvních vrstvách je velice obtížné určit přesnou vzdálenost kvůli elastickému dnu nádrže. Elasticitou dna je způsoben také prudký nárůst síly v první oblasti všech grafů. Je to kvůli tomu, že nulová poloha platformy je nastavena tak, aby byla první vrstva fotopolymeru co nejvíc stlačena pro částečnou kompenzaci síly odlepování v prvních vrstvách. Kvůli nepřesnosti nulové polohy u tiskových úloh se k modelu přidává několik vyrovnávajících vrstev nebo podpor, na kterých se ztratí nepřesnosti.

Oblast označená na grafech obrázku 5.5 číslem 2 odpovídá procesu běžného tisku s postupným klesáním síly. Tak by měl vypadat průběh sil u procesů, u nichž nevznikla



Obrázek 5.5: Maximální hodnoty síly odlepování pro čtyři pokusy

žádná chyba. Naměřená síla působí mezi modelem a dnem nádrže a záleží většinou na ploše vytisknuté vrstvy.

S každou další vrstvou se hmotnost modelu zvětšuje a působením častých odtrhávání se první vrstvy modelu odlepují od platformy. Tímto dochází k chybě, při níž vytisknutý model zůstává na dně nádrže. Tato část průběhu tisku je na grafech obrázku 5.5 označena číslem 3. Při úplném odlepení modelu, v případě, že se model nějakou dobu nachází na dně nádrže, se síla pohybuje kolem nulové hodnoty. Postupné kle­sání síly na některých grafech je výsledkem přechodného procesu mezi stavem tisku a stavem chyby. Tento stav navržený systém detekce chyb umí zachytit a zastavit tisk již při výraznějších odchylkách hodnot sil od očekávaného průběhu. Algoritmy, jejichž prostřednictvím se proces tisku sleduje, jsou popsány v podkapitole 4.2.

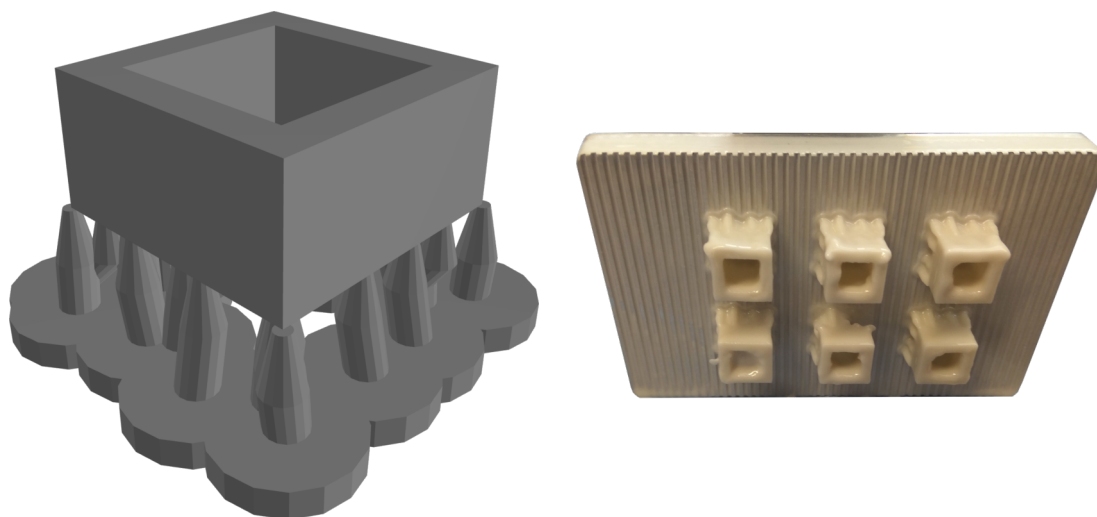
Další experiment, jehož cílem bylo zjištění přesnější závislosti sil na velikostech tisknutých ploch, byl prováděn na modelech zobrazených na obrázcích 5.4b a 5.4c. První



a druhý experiment jsou více popsány v článku [A2].

### 5.3 Experimentální zkoušky smrštění tištěných keramických modelů po spékání

Experiment, jehož účelem bylo zjištění koeficientu smrštění po spékání keramických modelů, byl zrealizován po poslední přestavbě tiskárny. Fotopolymery obsahující částice keramiky se používají na tiskárně pro tisk zelených těles požadovaných tvarů. Následně se však vytvrzený polymer, který je v zeleném modelu k tomu, aby keramické částice držely pohromadě, musí odstranit termickým zpracováním (viz podkapitola 2.7.3). Vzhledem k tomu, že je objemové množství fotopolymeru v keramických polymerních roztocích kolem 50 %, výsledný výrobek bude mít při jejich vypálení ze zeleného modelu menší rozměry než vytištěný. Koeficient smrštění modelu je důležitý při návrhu 3D modelu výrobku pro tisk. Je potřeba ho znát předem k opravě modelu.



(a) 3D model

(b) Vytisknutá skupina modelů

Obrázek 5.6: Model pro zkoušky smrštění

Během experimentů byl také posuzován vliv některých parametrů tisku na koeficient smrštění finálního výrobku. Byl navržen a vytisknut model zobrazený na obrázku 5.6. Dohromady bylo vytisknuto 9 skupin po šesti modelech v každé skupině. Každá z nich se tiskla s různými kombinacemi tloušťky vrstvy a času ozařování. Pomocí dynamického nastavení byly nastaveny odlišné časy ozařování pro první vrstvu modelu, pro



vrstvy podpůrných struktur a pro samotný model. Parametry tisku jednotlivých skupin vzorků jsou uvedené v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1: Parametry tisku skupin modelů

Číslo skupiny	Tloušťka vrstvy, $\mu\text{m}$	Čas ozařování, s		
		První vrstva	Podpůrné vrstvy	Hlavní vrstvy
1	100	13	9 (vrstvy 2-50)	7 (vrstvy 51-100)
2	100	13	7	5
3	100	13	5	3
4	75	13	9 (vrstvy 2-67)	7 (vrstvy 68-134)
5	75	13	7	5
6	75	13	5	3
7	50	13	9 (vrstvy 2-100)	7 (vrstvy 101-200)
8	50	13	7	5
9	50	13	5	3

Vytisknuté modely byly po tisku umyté v isopropylalkoholu a následně vypálené v peci podle odpovídající termické křivky doporučené výrobcem. Celkově proces vypalování spolu s přirozeným chladnutím trval kolem 60 hodin. Zelené modely byly vypáleny spolu s podporami pro zabránění kroucení modelů.

Ve výsledku bylo potvrzeno, že keramické materiály jsou více náchylné na parazitní přírůstek rozměrů [74]. Při zvýšení času ozařování dochází ke zvětšení tohoto nežádoucího efektu. Je to způsobeno tím, že keramické částice přítomné v polymeru odráží světlo náhodnými směry. Následně se zvyšuje dávka energie, která se dostane mimo požadovaná místa a zaktivuje se více fotoiniciátorů, které by se zaktivovat neměly. V tabulce 5.2 jsou uvedené přírůstky v jednotlivých skupinách vytištěných modelů. Je vidět, že přírůstek rozměrů se zvětšuje při zvýšení času ozařování a snížení tloušťky vrstvy.

Dalším cílem experimentů bylo zjištění samotného koeficientu smršťování. Modely byly po spékání v peci zbaveny podpor, zkontrolovány na přítomnost prasklin a následně změřeny. Výsledný koeficient byl spočítán podle vzorce 5.3.1

$$\Delta d = \frac{d_0 - d_1}{d_1} \cdot 100. \quad (5.3.1)$$

Tabulka 5.2: Přírůstky a smrštění u keramického tisku

<b>Číslo skupiny</b>	<b>Tloušťka vrstvy, <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Čas ozařování, s</b>	<b>Střední hodnota přírůstku, %</b>	<b>Střední hodnota smrštění, %</b>
1	100	7	3,29	20,00
2	100	5	2,76	19,26
3	100	3	1,51	19,74
4	75	7	3,76	19,76
5	75	5	3,25	19,55
6	75	3	1,69	20,06
7	50	7	6,10	19,10
8	50	5	3,85	19,60
9	50	3	3,17	19,95

Ve vzorci 5.3.1 je smrštění označeno  $\Delta d$  a je uvedeno procentech. Tloušťka stěny tisknutého modelu před a po spékání jsou označeny jako  $d_0$  a  $d_1$ . Výsledky se střední hodnotou pro každou skupinu jsou znázorněny v tabulce 5.2. Jak vidíme, hodnota koeficientu smrštění pro tento materiál je kolem 20 % a nezáleží na zkoušených parametrech tisku. Na druhou stranu, přírůstek rozměrů záleží na parametrech tisku a může ovlivnit výsledné rozměry modelů. Experiment je detailně popsán v článku [A1].

## 6 Závěr

Z hlediska výrobních technologií pokrývá v dnešní době aditivní výroba nejenom oblast rychlého jednodusového prototypování, ale také proniká do některých odvětví klasické výroby. Na nově vyvíjené 3D technologie a nově navrhované stroje jsou proto kladeny přísné požadavky na spolehlivost a opakovatelnost výroby z důvodu následné certifikace výrobků.

V představené disertační práci se řešila úloha vývoje prototypu 3D tiskárny na fotopolymery. Mezi dílčí úlohy patřily zkoušky různých metod tisku a zkoušky vlivu parametrů tisku na kvalitu konečného výrobku. Výzkum v oblasti detekce chyb se zaměřením na aplikace pro technologii fotopolymerizace v nádobě byl nedílnou částí této práce. Také probíhal výzkum v oblasti tisku materiálů s vysokou hustotou a kompozitních roztoků. V rámci této práce byl odzkoušen a odladěn tisk keramických a kovových materiálů. Postupy následného termického zpracování vytisknutých dílů, navržené v této práci a odzkoušené na postaveném prototypu tiskárny, jsou zaměřené na zavedení kompletního výrobního cyklu keramických a kovových modelů.

### 6.1 Zhodnocení výsledků

Výsledkem představené práce je postavená a odzkoušená 3D tiskárna schopná tisku z široké škály fotopolymerů s vysokým rozlišením. Technické parametry tiskárny jsou následující: maximální tiskový prostor je 80 x 50 x 160 mm; přesnost (rozlišení) tisku ve vodorovné rovině je 24 - 63  $\mu\text{m}$ ; přesnost tisku ve svislé rovině (tloušťka vrstvy) je 10 - 200  $\mu\text{m}$ ; rychlost tisku je 4 - 36 mm/hod.

Mezi materiály, jež umožňuje tiskárna zpracovávat, patří nejenom klasické radikálové fotopolymery, ale také různorodé směsi s fotopolymerním základem. Tiskárna disponuje širokou nabídkou nastavitelných parametrů tisku a několika variantami provede-

ní jednotlivých částí. Kombinace provedení a parametrů dovolují přizpůsobit tiskárnu k tisku za použití jakýchkoliv fotopolymerů aktivovaných UV světlem. Tiskárna je vybavena kombinací nástrojů umožňujících tisk z materiálů s vysokou hustotou. Je to velice výhodné pro materiály obsahující keramické částice, kovy a další příměsi. V současné době se na tiskárně realizují experimenty zaměřené na tisk z kovových a keramických materiálů. Připravuje se projekt základního výzkumu, jehož zaměřením je umožnění tisku skleněných výrobků prostřednictvím technologie DLP. Mimo jiné se projekt bude také zabývat vývojem vlastních fotopolymerních materiálů.

Dalším výsledkem práce je navržený, zrealizovaný a vyzkoušený algoritmus detekce chyb tisku pro DLP technologii. Algoritmus sleduje proces tisku a vyhodnocuje chyby při tisku na základě analýzy průběhu sil odlepování. Jeho aplikace dovoluje automaticky zastavit tisk při vzniku nevytvrzených částí modelu. Včasně zastavení tisku je užitečné pro úsporu materiálu, který se následně neplýtvá při tisku poškozeného dílu. Jeho použití také dovoluje ušetřit čas tisku, protože nepokračuje tisk modelu, který byl v nějaké fázi tisku poškozen. Další výhodou aplikace algoritmu je prevence poškození stroje když dojde k chybě při tisku. Data shromážděná algoritmem během tisku se také ukládají pro další případnou analýzu a mohou být použita pro certifikaci vytištěných modelů. Algoritmus je zveřejněn a je volně přístupný pro průmysl a výzkumné organizace pro další rozvoj a aplikace v této oblasti.

## 6.2 Doporučení pro pokračování výzkumu

Tiskárna je postavená jako celek, který se skládá z jednotlivých modulů umístěných na rámové konstrukci. Důvodem tohoto řešení je požadavek na flexibilitu a laboratorní použití tiskárny. Při komercializaci stroje bude potřeba nahradit rámovou konstrukci snadno vyrobitelným, ekonomicky výhodnějším řešením. Tím se sníží flexibilita zařízení, ale také výrazně klesne cena konečného výrobku.

Další vývoj z hlediska technologie tisku by mohl spočívat v modernizaci projekčního zařízení, konkrétně ve výměně DMD desky za desku s 4K rozlišením. Tím by se zvýšila přesnost tiskárny ve vodorovné rovině při stejném tiskovém prostoru na hodnoty 8 - 20  $\mu\text{m}$ .

Systém detekce chyb při dalším vývoji stroje by měl být spojen s řídicím systémem

tiskárny, aby bylo možné sledování tisku provádět rovnou z uživatelského rozhraní tiskárny. Dalším vylepšením navržených algoritmů by mohlo být automatické zjištění referenčních hodnot průběhu sil za použití strojového učení. Toto řešení by usnadnilo práci obsluhy při použití nových materiálů.

Tiskárna v současném provedení může být zabudována do tiskového klastru z několika tiskáren. Avšak řídicí systém není na takové použití připraven, proto v současném provedení každá tiskárna v klastru bude muset být ovládána zvlášť. Při vývoji nového řídicího systému by bylo vhodné počítat s možností ovládání celého tiskového klastru najednou.

## Literatura

- [1] Wood, H. T. *et al.*, "The Inventions of John Kay (1704—1770)," *Journal of the Royal Society of Arts*, vol. 60, no. 3081, pp. 73–86, 1911.
- [2] Crump, S. S., "Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects," p. 15, 1992.
- [3] Gibson, I., Rosen, D. W., a Stucker, B., *Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing*, 2010.
- [4] Waller, J. M. *et al.*, "Nondestructive Evaluation of Additive Manufacturing State-of-the-Discipline," pp. 1–36, 2014.
- [5] "Stratasys Chosen by Airbus to Produce 3D Printed Parts for A350 XWB," [cit. 2019-05-22]. [online]. Dostupné z: <http://blog.stratasys.com/2015/05/06/airbus-3d-printing/>
- [6] "Airbus to install new 3D printed parts," *Metal Powder Report*, vol. 72, no. 2, p. 140, mar 2017. [online]. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0026065717300413>
- [7] Shkolnik, A., El-Siblani, A., a John, H., "Continuous generative process for producing a three-dimensional object," 2011.
- [8] "Briefing Additive Manufacturing: The factories of the future," *The Economist*, vol. 424, no. 9047, pp. 17–19, 2017.
- [9] Bartolomeo, M., "Internet of Things: Science Fiction or Business Fact?" *Harvard Business Review*, p. 8, 2014.
- [10] Hermann, M., Pentek, T., a Otto, B., "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios," in *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. IEEE, jan 2016, pp. 3928–3937.
- [11] The Economist, "Special Report Manufacturing and Innovation: A third industrial revolution," *The Economist*, vol. 403, no. 8781, pp. 1–S0, 2012. [online]. Dostupné z: <http://www.economist.com/blogs/schumpeter/2012/04/special-report-manufacturing-and-innovation>
- [12] Wohlers, T., *Wohlers Report 2016. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*. Wohlers Associates, 2016.

- [13] Hull, C. W., "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography," pp. 1–16, 1986.
- [14] Smart, T., "Formlabs, a leader in desktop 3D printing," [cit. 2018-09-17]. [online]. Dostupné z: <http://techgenmag.com/2014/11/formlabs-leaders-in-desktop-3d-printing/>
- [15] Huang, Y.-M., Jeng, J.-Y., Jiang, C.-P., a Wang, J.-C., "Computer supported force analysis and layer imagine for masked rapid prototyping system," in *Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (IEEE Cat. No.01EX472)*. NRC Res. Press, 2001, pp. 562–567.
- [16] Hornbeck, L. J., "Frame addressed spatial light modulator," p. 26, 1984.
- [17] Dudley, D., Duncan, W. M., a Slaughter, J., "Emerging digital micromirror device (DMD) applications," in *SPIE Proceedings*, Urey, H., Ed., vol. 4985, jan 2003, p. 14.
- [18] "Getting Started with TI DLP® Display Technology," Dallas, Texas, pp. 5–6, 2015.
- [19] "DLP™ System Optics," pp. 2–4, 2010.
- [20] "DLP products – Getting started," [cit. 2019-02-18]. [online]. Dostupné z: <http://www.ti.com/dlp-chip/getting-started.html>
- [21] "DLP660TE 0.66 4K UHD DMD," Dallas, p. 44, 2017.
- [22] Nelson, P., "Geometric Optics for DLP®," pp. 5–8, 2013.
- [23] Guttag, K., "TI DLP® "Diamond" Pixel," [cit. 2018-10-12], 2012. [online]. Dostupné z: <https://www.kguttag.com/2012/02/09/ti-dlp-diamond-pixel/>
- [24] John, H., "Apparatus and method for the non-destructive separation of hardened material layers from a flat construction plane," p. 8, 2002.
- [25] Joyce, M., "Solid Image Apparatus With Improved Part Separation From The Image Plate," 2013.
- [26] Rohner, G. *et al.*, "Device and method for processing light-polymerizable material for building up an object in layers," 2014.
- [27] Holtrup, R., "Design and construction of a multi-material 3D DLP printer," Ph.D. dissertation, University of Twente, 2015.
- [28] Syao, K.-C., "Stereolithography apparatus," p. 7, 2016.
- [29] Tumbleston, J. R. *et al.*, "Continuous liquid interface production of 3D objects," *Science*, vol. 347, no. 6228, pp. 1349–1352, mar 2015.
- [30] Seymour, R. B. a Deanin, R. D., *History of Polymer Composites*. Utrecht: VNU Science Press BV, 1987.

- [31] Leggat, R., "A History of Photography from its beginnings till the 1920s," [cit. 2018-04-18], 1995. [online]. Dostupné z: <http://www.mpritchard.com/photohistory/index.html>
- [32] Nakamura, K., *Photopolymers*. Boca Raton: CRC Press, aug 2014.
- [33] Crivello, J. V. a Reichmanis, E., "Photopolymer Materials and Processes for Advanced Technologies," *Chemistry of Materials*, vol. 26, no. 1, pp. 533–548, 2014.
- [34] Travitzky, N. et al., "Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials," *Advanced Engineering Materials*, vol. 16, no. 6, pp. 729–754, jun 2014.
- [35] Prokopová, I., *Makromolekulární chemie*, 2nd ed. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007.
- [36] Hammond, G. S. a Bartlett, P. D., "Polymerization of allyl compounds. V. Inhibition by nitro compounds," *Journal of Polymer Science*, vol. 6, no. 5, pp. 617–624, may 1951.
- [37] Barnes, C. E., "Mechanism of Vinyl Polymerization. I. Role of Oxygen<sup>1</sup>," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 67, no. 2, pp. 217–220, feb 1945.
- [38] Bovey, F. A. a Kolthoff, I. M., "The Mechanism of Emulsion Polymerizations. III. Oxygen as a Comonomer in the Emulsion Polymerization of Styrene<sup>1</sup>," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 69, no. 9, pp. 2143–2153, sep 1947.
- [39] Bhanu, V. A. a Kishore, K., "Role of oxygen in polymerization reactions," *Chemical Reviews*, vol. 91, no. 2, pp. 99–117, mar 1991.
- [40] Lian, Q., Yang, F., Xin, H., a Li, D., "Oxygen-controlled bottom-up mask-projection stereolithography for ceramic 3D printing," *Ceramics International*, vol. 43, no. 17, pp. 14 956–14 961, 2017.
- [41] Licari, J. J. a Crepeau, P. P., "Electromagnetic radiation polymerization," p. 2, 1962.
- [42] Schlesinger, S. I., "Epoxy photopolymers in photoimaging and photofabrication," *Polymer Engineering and Science*, vol. 14, no. 7, pp. 513–515, jul 1974.
- [43] "Applications: Free Radical Initiators," Merck, Darmstadt, Tech. Rep. 1, 2001.
- [44] Lalevée, J., Mokbel, H., a Fouassier, J. P., "Recent developments of versatile photoinitiating systems for cationic ring opening polymerization operating at any wavelengths and under low light intensity sources," *Molecules*, vol. 20, no. 4, pp. 7201–7221, 2015.
- [45] Bernabé-Zafón, V., Beneito-Cambra, M., Simó-Alfonso, E., a Herrero-Martínez, J., "Comparison on photo-initiators for the preparation of methacrylate monolithic columns for capillary electrochromatography," *Journal of Chromatography A*, vol. 1217, no. 19, pp. 3231–3237, may 2010.



- [46] Zhou, J., Allonas, X., a Liu, X., "Synthesis and characterization of organozirconiums with type-II photoinitiator ligands as multifunctional photoinitiators for free radical photopolymerization," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 356, pp. 580–586, 2018.
- [47] Fouassier, J. P. a Lalevée, J., *Photoinitiators for Polymer Synthesis*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, jul 2012.
- [48] Schuster, D. I., Goldstein, M. D., a Bane, P., "Photochemistry of unsaturated ketones in solution. 51. Photophysical and photochemical studies of Michler's ketone," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 99, no. 1, pp. 187–193, jan 1977.
- [49] Karaca, N., Ocal, N., Arsu, N., a Jockusch, S., "Thioxanthone-benzothiophenes as photoinitiator for free radical polymerization," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 331, pp. 22–28, 2016.
- [50] Jenkins, A. D., Kratochvíl, P., Stepto, R. F. T., a Suter, U. W., "GLOSSARY OF BASIC TERMS IN POLYMER SCIENCE," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 68, no. 12, pp. 2287–2311, 1996.
- [51] Pandey, R., "Photopolymers in 3D printing applications," Ph.D. dissertation, University in Helsinki, 2014.
- [52] Ducháček, V., *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*, 3rd ed. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011.
- [53] Zhu, W., Holmes, B., Glazer, R. I., a Zhang, L. G., "3D printed nanocomposite matrix for the study of breast cancer bone metastasis," *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, vol. 12, no. 1, pp. 69–79, 2016.
- [54] Wang, J., Goyanes, A., Gaisford, S., a Basit, A. W., "Stereolithographic (SLA) 3D printing of oral modified-release dosage forms," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 503, no. 1-2, pp. 207–212, 2016.
- [55] Grogan, S. P. *et al.*, "Digital micromirror device projection printing system for meniscus tissue engineering," *Acta Biomaterialia*, vol. 9, no. 7, pp. 7218–7226, 2013.
- [56] Farzadi, A. *et al.*, "Effect of layer printing delay on mechanical properties and dimensional accuracy of 3D printed porous prototypes in bone tissue engineering," *Ceramics International*, vol. 41, no. 7, pp. 8320–8330, 2015.
- [57] Dawood, A., Marti, B. M., Sauret-Jackson, V., a Darwood, A., "3D printing in dentistry," *British Dental Journal*, 2015.
- [58] Chen, Z. *et al.*, "3D printing of ceramics: A review," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, no. 4, pp. 661–687, 2019.
- [59] Peñaloza, G. A. L., "Additive manufacturing of Zirconia," Ph.D. dissertation, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2018.

- [60] Safari, A., "Processing of advanced electroceramic components by fused deposition technique," *Ferroelectrics*, vol. 263, no. 1, pp. 45–54, jan 2001.
- [61] Yang, H., Yang, S., Chi, X., a Evans, J. R. G., "Fine ceramic lattices prepared by extrusion freeforming," *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, vol. 79B, no. 1, pp. 116–121, oct 2006.
- [62] Clare, A. T. *et al.*, "Selective laser sintering of barium titanate–polymer composite films," *Journal of Materials Science*, vol. 43, no. 9, pp. 3197–3202, may 2008. [online]. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-007-2396-x>
- [63] Tan, K. H. *et al.*, "Scaffold development using selective laser sintering of polyetheretherketone-hydroxyapatite biocomposite blends," *Biomaterials*, vol. 24, no. 18, pp. 3115–3123, aug 2003.
- [64] Franks, G. V. *et al.*, "Colloidal processing: enabling complex shaped ceramics with unique multiscale structures," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 100, no. 2, pp. 458–490, 2017.
- [65] Yoo, J., Cima, M. J., Khanuja, S., a Sachs, E. M., "Structural ceramic components by 3D printing," *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 40–50, 1993.
- [66] Agarwala, M. K. *et al.*, "Structural Ceramics by Fused Deposition of Ceramics," *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 1–8, 1995.
- [67] Agarwala, M. K., Van Weeren, R., a Bandyopadhyay, A., "Fused deposition of ceramics and metals: an overview," in *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium*, 1996, pp. 385–392.
- [68] Vail, N. K. a Barlow, J. W., "Ceramic Structures by Selective Laser Sintering of Microencapsulated , Finely Divided Ceramic Materials," in *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin: The University of Texas at Austin, 1992, pp. 124–130.
- [69] Li, K. a Zhao, Z., "The effect of the surfactants on the formulation of UV-curable SLA alumina suspension," *Ceramics International*, vol. 43, no. 6, pp. 4761–4767, 2017.
- [70] Griffith, M. L. a Halloran, J. W., "Freeform Fabrication of Ceramics via Stereolithography," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 79, no. 10, pp. 2601–2608, 2005.
- [71] Mühler, T., Gomes, C. M., Heinrich, J., a Günster, J., "Slurry-Based Additive Manufacturing of Ceramics," *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 18–25, jan 2015.
- [72] Felzmann, R. *et al.*, "Lithography-Based Additive Manufacturing of Cellular Ceramic Structures," *Advanced Engineering Materials*, vol. 14, no. 12, pp. 1052–1058, dec 2012.

- [73] Gmeiner, R., Mitteramskogler, G., Stampfl, J., a Boccaccini, A. R., "Stereolithographic ceramic manufacturing of high strength bioactive glass," *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 38–45, 2015.
- [74] Mitteramskogler, G. *et al.*, "Light curing strategies for lithography-based additive manufacturing of customized ceramics," *Additive Manufacturing*, vol. 1, pp. 110–118, 2014.
- [75] Schwentenwein, M. a Homa, J., "Additive manufacturing of dense alumina ceramics," *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 1–7, 2015.
- [76] Komissarenko, D. A. *et al.*, "Rheological and curing behavior of acrylate-based suspensions for the DLP 3D printing of complex zirconia parts," *Materials*, vol. 11, no. 12, 2018.
- [77] Ilie, N., Jelen, E., a Hickel, R., "Is the soft-start polymerisation concept still relevant for modern curing units?" *Clinical Oral Investigations*, vol. 15, no. 1, pp. 21–29, 2011.
- [78] Tadros, T. F., *Dispersion of Powders in Liquids and Stabilization of Suspensions*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, jun 2012.
- [79] Abouliatim, Y. *et al.*, "Optical characterization of stereolithography alumina suspensions using the Kubelka-Munk model," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 29, no. 5, pp. 919–924, 2009.
- [80] Santoliquido, O., Colombo, P., a Ortona, A., "Additive Manufacturing of ceramic components by Digital Light Processing: A comparison between the "bottom-up" and the "top-down" approaches," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, no. 6, pp. 2140–2148, jun 2019.
- [81] de Blas Romero, A. *et al.*, "Lithography-based additive manufacture of ceramic biodevices with design-controlled surface topographies," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, no. 5-8, pp. 1547–1555, 2017.
- [82] "Vitrolite," Omaha, Nebraska, pp. 4–5, 2016.
- [83] "Acer Projector X111/ X1140/ X1140A/ X111P/ X1240/ X1340W/ P1340W/ P1341W/ X1340WH/ P1340WG/ H6510BD/ P1500 Series User's Guide," San Jose, CA, p. 70, 2012.
- [84] "DLP®LightCrafter™ 4500 Evaluation Module User's Guide," Dallas, Texas, p. 75, 2015.
- [85] Mach, P., "Construction of 3D Printer for Photopolymers," Ph.D. dissertation, Technical University of Liberec, Liberec, 2014.
- [86] THK, "LM Guide Actuator," p. 92, 2011.

- [87] "Ezi-Servo ST Closed Loop Stepping System," [cit. 2019-05-22]. [online]. Dostupné z: [https://fastech.co.kr/new/board/bbs/board.php?bo\\_table=sub010201\\_motor\\_en](https://fastech.co.kr/new/board/bbs/board.php?bo_table=sub010201_motor_en)
- [88] "Raspberry Pi 3 Model B Technical Specifications," p. 8, 2016. [online]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- [89] Isermann, R., "Model-based fault-detection and diagnosis - Status and applications," pp. 71–85, 2005.
- [90] Sharratt, B. M., "Non-Destructive Techniques and Technologies for Qualification of Additive Manufactured Parts and Processes: A Literature Review," Tech. Rep. March, 2015.
- [91] Huang, Y., Leu, M. C., Mazumder, J., a Donmez, A., "Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 137, no. 1, p. 10, 2015.
- [92] Li, F., Yu, Z., Yang, Z., a Shen, X., "Real-time distortion monitoring during fused deposition modeling via acoustic emission," *Structural Health Monitoring*, pp. 1–12, may 2019.
- [93] Cerniglia, D., Scafidi, M., Pantano, A., a Rudlin, J., "Inspection of additive-manufactured layered components," *Ultrasonics*, vol. 62, pp. 292–298, 2015.
- [94] Carl, V., "Monitoring system for the quality assessment in additive manufacturing," in *41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol 34*, vol. 1650, 2015, pp. 171–176.
- [95] Rieder, H. *et al.*, "Online Monitoring of Additive Manufacturing Processes Using Ultrasound," in *Proceedings of the 11th European Conference on Non-Destructive Testing*, vol. 1, 2014, pp. 2194–2201.
- [96] An, Y. K., Park, B., a Sohn, H., "Complete noncontact laser ultrasonic imaging for automated crack visualization in a plate," *Smart Materials and Structures*, vol. 22, no. 2, 2013.
- [97] Huang, Y. M. a Jiang, C. P., "On-line force monitoring of platform ascending rapid prototyping system," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 159, no. 2, pp. 257–264, 2005.
- [98] "Why Cured Layers Could Stick to the Resin Container," [cit. 2019-01-18]. [online]. Dostupné z: <https://www.kudo3d.com/why-cured-layers-could-stick-to-the-resin-container/>
- [99] Ye, H., Venketeswaran, A., Das, S., a Zhou, C., "Investigation of separation force for constrained-surface stereolithography process from mechanics perspective," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 696–710, 2017.

- [100] Zhou, C., Chen, Y., Yang, Z., a Khoshnevis, B., "Digital Material Fabrication Using Mask-Image-Projection- based Stereolithography," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 13, pp. 153–165, 2013.
- [101] Delli, U. a Chang, S., "Automated Process Monitoring in 3D Printing Using Supervised Machine Learning," *Procedia Manufacturing*, vol. 26, pp. 865–870, 2018.
- [102] "PhidgetBridge 4-Input," p. 7, 2016. [online]. Dostupné z: <https://www.phidgets.com/?tier=3&catid=2&pcid=1&prodid=35>
- [103] Kuphaldt, T. R., *Lessons In Electric Circuits, Volume I – DC*, 5th ed., 2006.
- [104] "Testing Data. Model: TAL201," p. 1, 2018.
- [105] "Product Manual 1046 - PhidgetBridge 4-Input," p. 13, 2011.
- [106] Stuart, D. *et al.*, "Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments," Braunschweig, p. 120, 2015.

# **Přílohy**

# A Odborný životopis autora

## Osobní údaje

Jméno: Iaroslav Kovalenko  
Datum narození: 18. 05. 1987  
E-mail: iaroslav.kovalenko@tul.cz  
vedidk: 6631460  
ORCID iD: 0000-0002-4724-8156  
h-index: 2 (Scopus); 1 (WoS)

## Vzdělání

2013 – dodnes: Doktorské studium v oboru  
Výrobní systémy a procesy, TU v Liberci  
2009 – 2013: Navazující magisterské studium v oboru  
Automatizované systémy řízení ve strojírenství, TU v Liberci  
2004 – 2009: Magisterské studium v oboru, Automatizované systémy řízení  
NU Technologií a Designu, Kyjev

## Pracovní praxe

5. 2017 – dodnes: Odborný asistent. TU v Liberci, Fakulta strojní, (Liberec, Česká Republika)  
3. 2017 – 4. 2017: Doktorská stáž. LARIS (Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes), Univerzita v Angers, (Angers, Francie)  
8. 2013 – 4. 2017: Odborně technický pracovník. TU v Liberci, Fakulta strojní (Liberec, Česká Republika)  
3. 2016 – 5. 2016: Doktorská stáž. LARIS (Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes), Univerzita v Angers, (Angers, Francie)  
3. 2013 – 6. 2013: Pracovní stáž. Technolog. Tyco Electronics EC Trutnov s.r.o., (Trutnov, Česká Republika)

## Jazyky

Čeština: C1  
Angličtina: B2  
Ukrajínština: C2  
Ruština: C1  
Francouzština: A1

## B Publikační činnost autora

### Publikace vztahující se k tématu řešené práce:

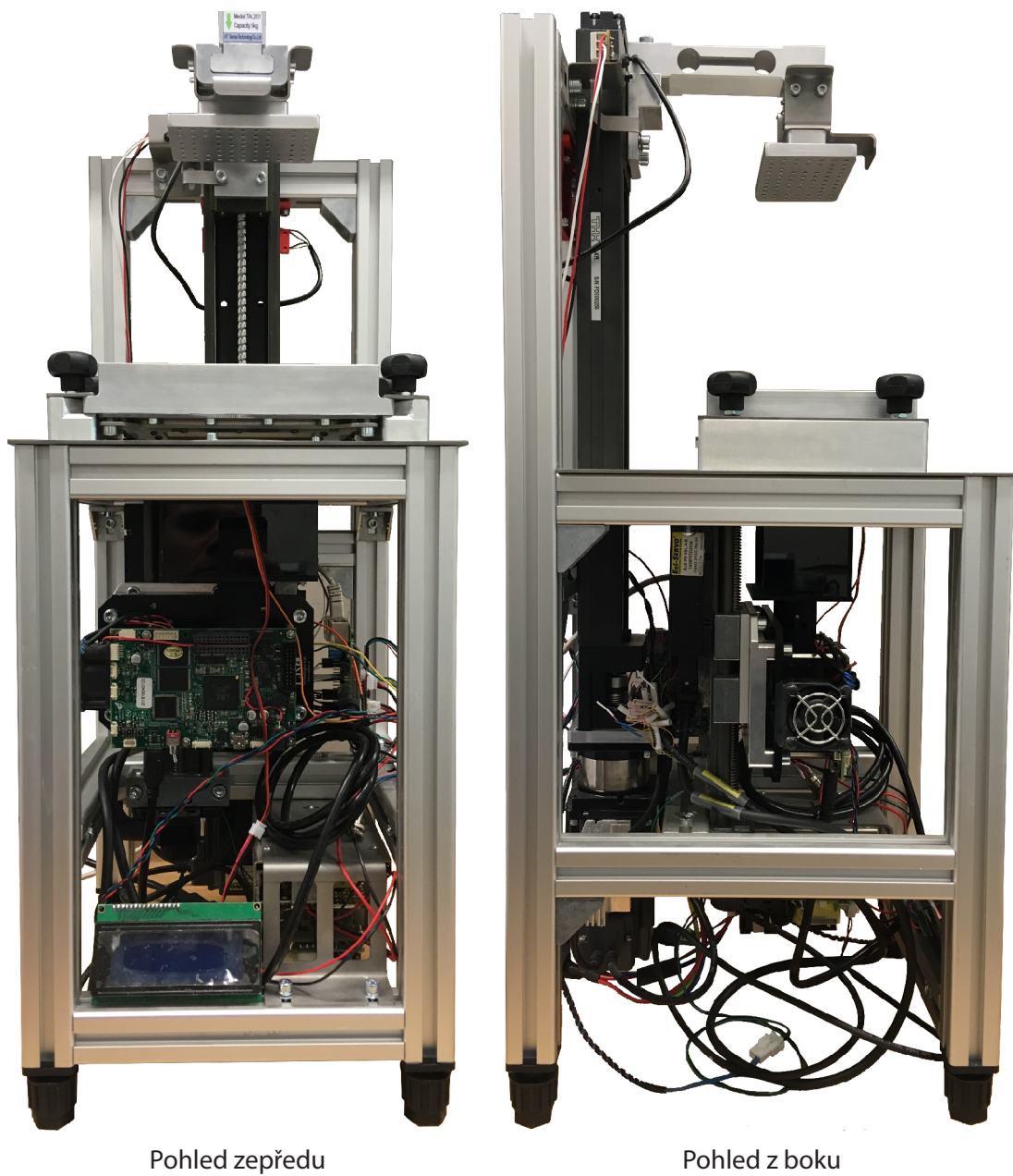
- [A1] Kovalenko, I., Ramachandran, Y., a Garan, M., "Experimental shrinkage study of ceramic DLP 3D printed parts after firing green bodies in a kiln," *MM Science Journal*, vol. 1, pp. 2767-2771, ISSN 1803-1269, 2019, [http://doi.org/10.17973/MMSJ.2019\\_03\\_2018113](http://doi.org/10.17973/MMSJ.2019_03_2018113)
- [A2] Kovalenko, I., Verron, S., Garan, M., Šafka, J., a Moučka, M., "Implementation of Non-Destructive Evaluation and Process Monitoring in DLP-based Additive Manufacturing," *Open Engineering*, vol. 7, pp. 100-105, ISSN 2391-5439, 2017, <https://doi.org/10.1515/eng-2017-0016>
- [A3] Kovalenko, I., Taich, J., a Garan, M., "Stavba 3D tiskárny na fotopolymery s kontrolou průběhu tisku," in: *10th Annual International Conference 2017 Manufacturing Systems Today and Tomorrow*, Liberec, 9. - 10. 11. 2017, Czech Republic: Department of Manufacturing Systems and Automation, ISBN 978-80-7494-370-6, 2017
- [A4] Kovalenko, I., a Garan, M., "Effect of UV radiation by projectors on 3D printing," in: *Proceedings of 2016 International Conference on Biomaterials, Nanomaterials and Composite Materials*, Chengdu, 4. - 6. 11. 2016, Francie: EDP Science, 2017, <https://doi.org/10.1051/mateconf/20178801001>
- [A5] Kovalenko, I., Garan, M., Shynkarenko, A., Zelený, P., a Šafka, J., "Examining the Relationship between Forces During Stereolithography 3D Printing and Geometric Parameters of the Model," in: *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering and Electrical Systems*, Singapore, 16. - 18. 12. 2015, Francie: EDP Science, 2016, <http://doi.org/10.1051/mateconf/20164002005>
- [A6] Kovalenko, I., "Prototyping of Compact DLP 3D Printer," in: *Workshop Světlanka 2015*, Rokytnice nad Jizerou, 22. - 25. 9. 2015, Czech Republic: Technical University of Liberec, pp.214-218, ISBN: 978-80-7494-229-7, 2015



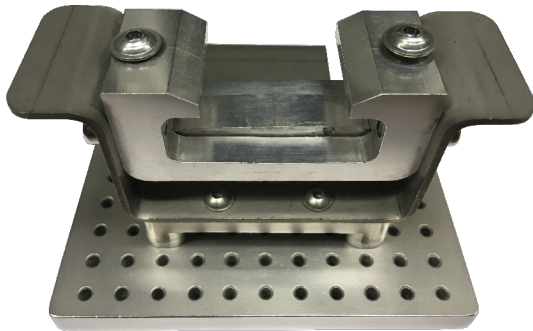
## Ostatní publikace:

- [A7] Garan, M., Verron, S., Kovalenko, I., Modrlák, O., a Lepšík, P., "Parameter Estimation in Linear Dynamic Systems using Bayesian networks," in: *Proceedings of the 2019 22nd International Conference on Process Control*, Štrbské Pleso, 11 – 14. 06. 2019, IEEE, pp. 203-208, ISBN: 978-1-72813-758-2, 2019
- [A8] Erben, J., Jirkovec, J., Kovalenko, I., a Chvojka, J., "The Combination of Bioprinting with 3D Fibrous Scaffolds Based on Electrospinning and Meltblown Technology," in: *AUTEX 2017 - Book of abstracts*, Corfu, 2017
- [A9] Garan, M. and Kovalenko, I., "Generalized Algorithm for Estimation of Output from Linear Dynamic Systems with Derivatives of Input Signal and Non-Zero Initial Conditions," in: *10th Annual International Conference 2017 Manufacturing Systems Today and Tomorrow*, Liberec, 9. - 10. 11. 2017, Czech Republic: Department of Manufacturing Systems and Automation, ISBN 978-80-7494-370-6, 2017
- [A10] Garan, M., a Kovalenko, I., "Recalculation of initial conditions for the observable canonical form of state-space representation," in: *Proceedings of the 5th International Conference on Mechatronics and Control Engineering*, Venice, 14. – 17. 12. 2016, New York: ACM, pp. 131-135, ISBN: 978-1-4503-5215-4, 2016
- [A11] Kovalenko, I., Shynkarenko, A., a Garan, M., "Digital Magnifying Device Based on Prusa i3," in: *Proceedings of the International Conference on Applied Mechanics and Mechatronics Engineering*, Bangkok, 25. – 26. 10. 2015, Lancaster: DEStech Publications, Inc., pp. 124-128, ISBN: 978-1-60595-021-1, 2015
- [A12] Tóhová, M., Vagaská, A., Bukovský, I., a Kovalenko, I., "Porovnanie rôznych prístupov k aproximácii statických charakteristík pneumatického umelého svalu," in: *Automatizace, regulace a procesy (ARaP 2015)*, Praha, 24. - 25. 11. 2015, Czech Republic: Dimart s.r.o., ISBN: 978-80-903844-9-1, 2015
- [A13] Moučka, M.; Garan M.; Kovalenko, I.; Tóhová, M.: Návrh adaptivního regulátoru pro řízení systému na bázi pneumatických svalů, *Principia Cybernetica*, 2015
- [A14] Garan, M.; Kovalenko, I.; Moučka, M.; Vagaská, A.: Electronic Emulator of Linear Dynamic Systems, *Principia Cybernetica*, 2015
- [A15] Kovalenko, I., "System For Motion Control of Angular Robot," in: *Workshop Světlanka 2014*, Rokytnice nad Jizerou, 16. - 19. 9. 2014, Czech Republic: Technical University of Liberec, pp.194-197, ISBN: 978-80-7494-100-9, 2014
- [A16] Zelený, P., Mach, P., Šafka, J., Kovalenko, I., a Shynkarenko, A., "Prototype of DLP 3D printer," in: *8th Annual International Conference 2014 Manufacturing Systems Today and Tomorrow*, Liberec, 20. - 21. 11. 2014, Czech Republic: Department of Manufacturing Systems, ISBN: 978-80-7494-150-4, 2014

## C Fotografická dokumentace



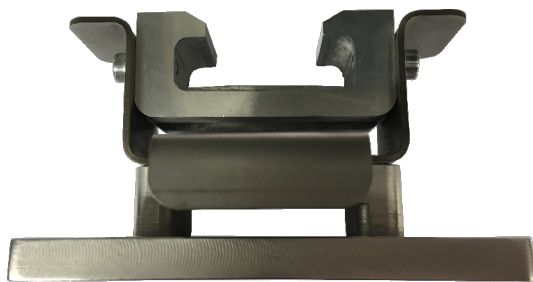
Obrázek C.1: Tiskárna bez krytu



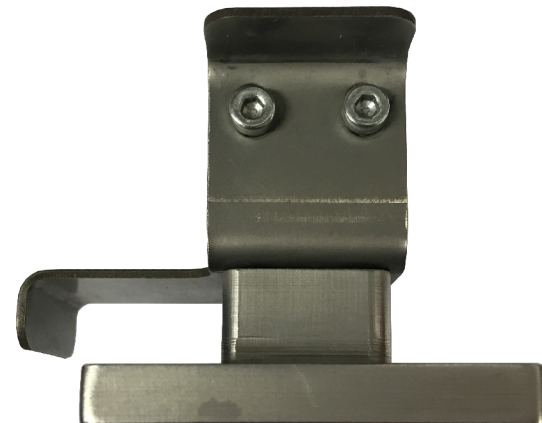
Platforma



Platforma ponořena do polymeru



Pohled zepředu

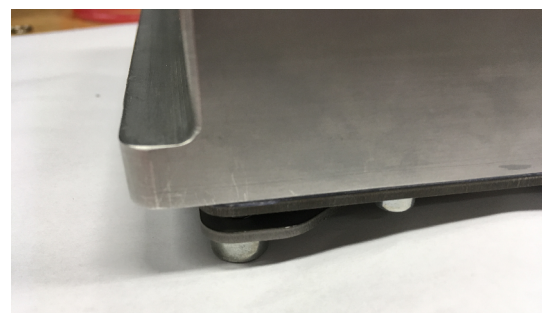


Pohled z boku

Obrázek C.2: Platforma s otvory a uchycení ke konzole



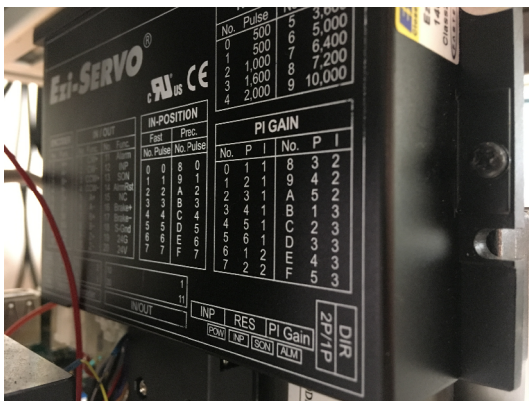
Uchycení nádoby



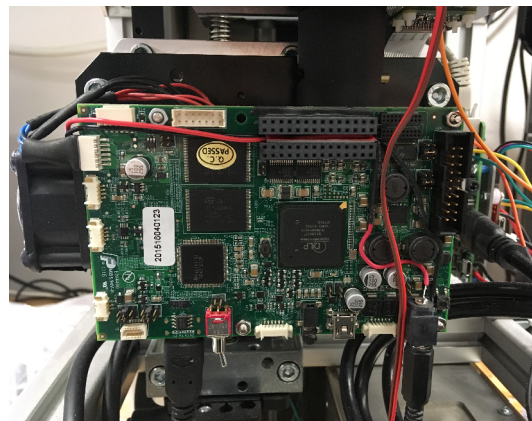
Systém napínání fólie

Obrázek C.3: Nádoba tiskárny

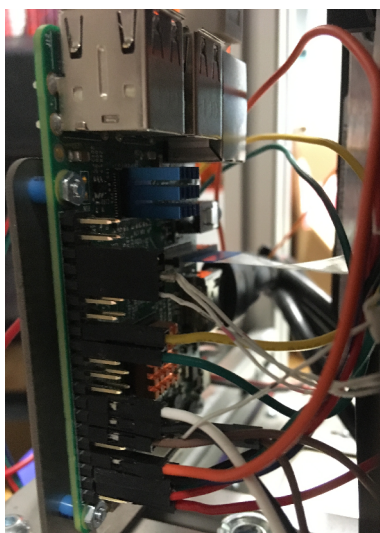




Ovladač motoru



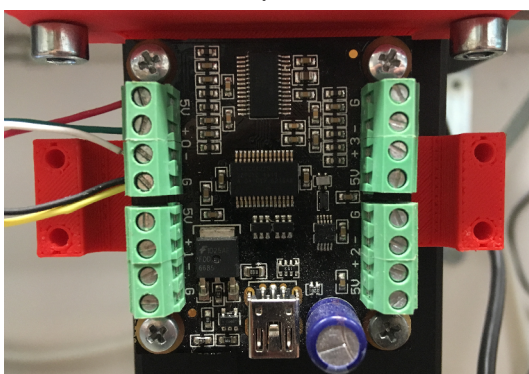
DLP projektor



Řídicí počítač



Zdroje napětí



Měřicí deska Phidget Bridge



Optický koncový spínač

Obrázek C.4: Elektronické komponenty tiskárny



Model zubu po spékání bez podpor



Model zubu po spékání bez podpor



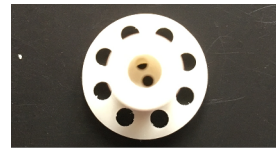
Model zubu po spékání s podporami



Držák termočláčku před a po spékání



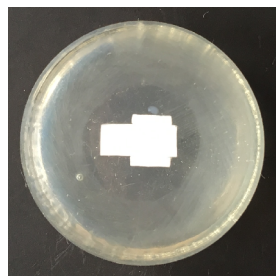
Držák termočláčku před a po spékání



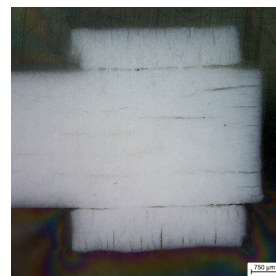
Držák termočláčku před spékáním



Spékání dvou modelu dohromady



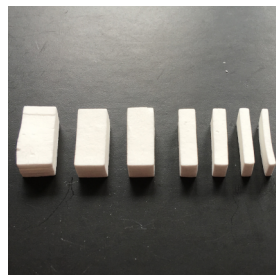
Výbrus vytisku po spékání



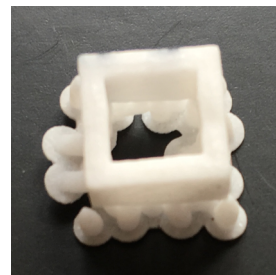
Trhliny pod mikroskopem



Batman



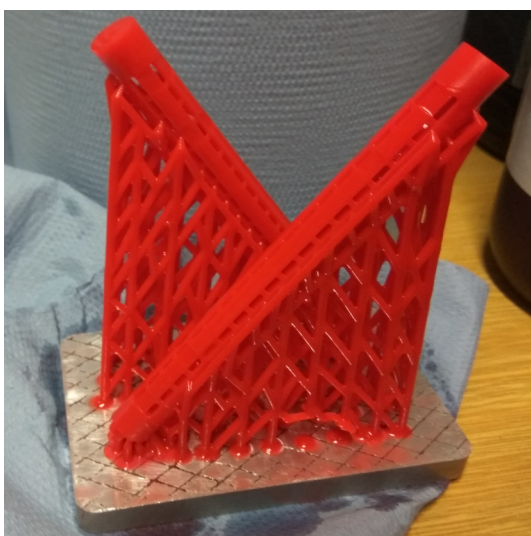
Vzorky pro zkoušku smrštění



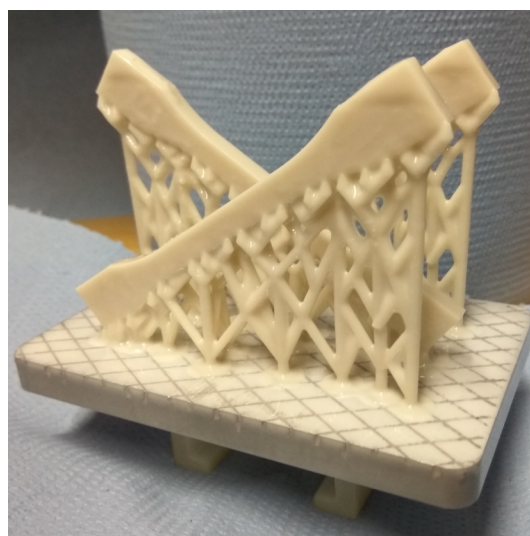
Model pro zkoušku smrštění stěny

Obrázek C.5: Keramické modely





Komplexní model z flexibilního polymeru



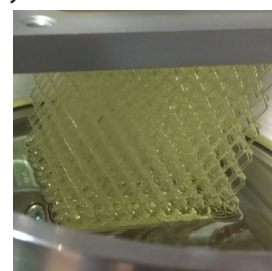
Testové vzorky na tahovou zkoušku



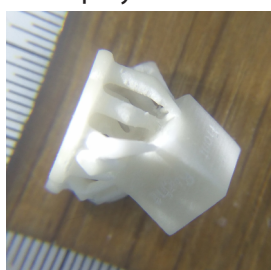
Prsten z klasického polymeru



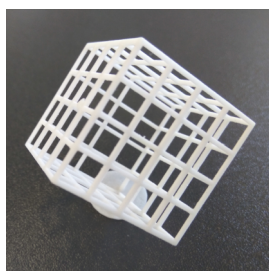
Kalibrační krychle zavěšena na platformě



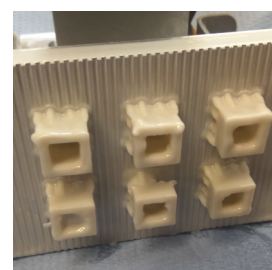
Krychle se složitou vnitřní strukturou



Kalibrační krychle po spékání



Prázdná keramická krychle



Testovací vzorky pro zkoušky smrštění

Obrázek C.6: Modely vytištěné z různých fotopolymerů

## D Komentované zdrojové kódy

V této části práce jsou uvedené zdrojové kódy programu pro detekci chyb. Program je napsaný v jazyku C s použitím knihoven od výrobce měřicí desky firmy Phidget. Program je rozdělený do několika sekcí pro lepší přehlednost. Důležité části kódu jsou okomentované.

### D.1 Nastavení PhidgetBridge

```
static void CCONV ssleep(int);

static void CCONV
onAttachHandler(PhidgetHandle phid, void *ctx) {
    PhidgetReturnCode res;
    int hubPort;
    int channel;
    int serial;

    res = Phidget_getDeviceSerialNumber(phid, &serial);
    if (res != EPHIDGET_OK) {
        fprintf(stderr, "failed to get device serial number\n");
        return;
    }
    res = Phidget_getChannel(phid, &channel);
    if (res != EPHIDGET_OK) {
        fprintf(stderr, "failed to get channel number\n");
        return;
    }
    res = Phidget_getHubPort(phid, &hubPort);
    if (res != EPHIDGET_OK) {
        fprintf(stderr, "failed to get hub port\n");
        hubPort = -1;
    }
    if (hubPort == -1)
        printf("channel %d on device %d attached\n", channel, serial);
    else
        printf("channel %d on device %d hub port %d attached\n", channel, serial, hubPort);
}

static void CCONV
onDetachHandler(PhidgetHandle phid, void *ctx) {
    PhidgetReturnCode res;
    int hubPort;
    int channel;
```

```

int serial;

res = Phidget_getDeviceSerialNumber(phid, &serial);
if (res != EPHIDGET_OK) {
    fprintf(stderr, "failed to get device serial number\n");
    return;
}
res = Phidget_getChannel(phid, &channel);
if (res != EPHIDGET_OK) {
    fprintf(stderr, "failed to get channel number\n");
    return;
}
res = Phidget_getHubPort(phid, &hubPort);
if (res != EPHIDGET_OK)
    hubPort = -1;

if (hubPort != -1)
    printf("channel %d on device %d detached\n", channel, serial);
else
    printf("channel %d on device %d hub port %d detached\n", channel, hubPort, serial);
}
static void CCONV
errorHandler(PhidgetHandle phid, void *ctx, Phidget_ErrorEventCode errorCode, const char *errorString) {

    fprintf(stderr, "Error: %s (%d)\n", errorString, errorCode);
}
static void CCONV
onVoltageRatioChangeHandler(PhidgetVoltageRatioInputHandle ch, void *ctx, double ratio) {
    printf("Voltage Ratio Changed: %.3g\n", ratio);
}

/* Iniciace komunikacniho kanalu */
static PhidgetReturnCode CCONV
initChannel(PhidgetHandle ch) {
    PhidgetReturnCode res;

    res = Phidget_setOnAttachHandler(ch, onAttachHandler, NULL);
    if (res != EPHIDGET_OK) {
        fprintf(stderr, "failed to assign on attach handler\n");
        return (res);
    }
    res = Phidget_setOnDetachHandler(ch, onDetachHandler, NULL);
    if (res != EPHIDGET_OK) {
        fprintf(stderr, "failed to assign on detach handler\n");
        return (res);
    }
    res = Phidget_setOnErrorHandler(ch, errorHandler, NULL);
    if (res != EPHIDGET_OK) {
        fprintf(stderr, "failed to assign on error handler\n");
        return (res);
    }
    return (EPHIDGET_OK);
}

```



## D.2 Hlavní funkce

```
double getVoltageRatio(PhidgetVoltageRatioInputHandle ch,int channel) {
    double value;
    PhidgetVoltageRatioInput_getVoltageRatio(ch,&value);
    return value;
}
```

```
int continue_or_exit() {
    int aux_option=0,option=0;
    while(aux_option==0) {
        printf("\nPress 1 to continue and 2 to exit\n");
        scanf("%d",&option);
        if(option==1) {
            aux_option=1;
            return 0;
        } else if(option==2) {
            return 1;
        } else {
            printf("\nInvalid option, try again\n");
        }
    }
}
```

```
void zerolizer(double vet[], int size) {
    int i;
    for (i = 0; i < size; i++ ) {
        vet[i]=0;
    }
}
```

```
double return_maximum(double vet[],int size) {
    int i;
    double max=0;
    for ( i = 0; i < size; i++ ) {
        if(vet[i] > max) {
            max = vet[i];
        }
    }
    return max;
}
```

```
bool kbhit(void) { //kbhit pro linux
    struct termios original;
    tcgetattr(STDIN_FILENO, &original);
    struct termios term;
    memcpy(&term, &original, sizeof(term));
    term.c_lflag &= ~ICANON;
    tcsetattr(STDIN_FILENO, TCSANOW, &term);
    int characters_buffered = 0;
    ioctl(STDIN_FILENO, FIONREAD, &characters_buffered);
    tcsetattr(STDIN_FILENO, TCSANOW, &original);
    bool pressed = (characters_buffered != 0);
    return pressed;
}
```

```

}

void echoOff(void) { //cast kbhit pro linux
    struct termios term;
    tcgetattr(STDIN_FILENO, &term);
    term.c_lflag &= ~ECHO;
    tcsetattr(STDIN_FILENO, TCSANOW, &term);
}

void echoOn(void) { //cast kbhit pro linux
    struct termios term;
    tcgetattr(STDIN_FILENO, &term);
    term.c_lflag |= ECHO;
    tcsetattr(STDIN_FILENO, TCSANOW, &term);
}

int main(int argc, char **argv) {

    PhidgetVoltageRatioInputHandle ch;
    PhidgetReturnCode res;
    const char *errs;
    Phidget_DeviceID deviceID;

    /* Pripojeni k stdout */
    PhidgetLog_enable(PHIDGET_LOG_INFO, NULL);
    res = PhidgetVoltageRatioInput_create(&ch);
    if (res != EPHIDGET_OK) {
        fprintf(stderr, "failed to create voltage ratio input channel\n");
        exit(1);
    }

    res = initChannel((PhidgetHandle)ch);
    if (res != EPHIDGET_OK) {
        Phidget_getErrorDescription(res, &errs);
        fprintf(stderr, "failed to initialize channel:%s\n", errs);
        exit(1);
    }

    /* Otevreni kanalu: cekani 5 sekund */
    res = Phidget_openWaitForAttachment((PhidgetHandle)ch, 5000);
    if (res != EPHIDGET_OK) {
        if (res == EPHIDGET_TIMEOUT) {
            printf("Channel did not attach after 5 seconds: please check that the device is attached\n");
        }
        else {
            Phidget_getErrorDescription(res, &errs);
            fprintf(stderr, "failed to open channel:%s\n", errs);
        }
        goto done;
    }

    res = Phidget_getDeviceID((PhidgetHandle)ch, &deviceID);
    if (res != EPHIDGET_OK) {
        fprintf(stderr, "failed to get device ID\n");
    }
}

```

```

    return;
}

if (deviceID == PHIDID_1046) {
    printf("setting bridge enabled\n");
    res = PhidgetVoltageRatioInput_setBridgeEnabled(ch, 1);
    if (res != EPHIDGET_OK) {
        fprintf(stderr, "failed to set bridge enabled\n");
        return;
    }
}
}

```

## D.3 Kalibrace

```

double offset=0; //Hodnota 1. bodu primky
double meas_ratio=0; //Hodnota 2. bodu primky
double meas_mass; //Hmotnost zavazi pro 2. bod
double gravity=9.80665; //Konstanta pro vypocet sily
double m,b; //Parametry pro y = mx + b
int i,k;
int samples_calibration; //Pocet vzorku za jedno mereni (vysledek stredni hodnota);
int samptime_calibration; //Cas v ms mezi mereni
int max_voltageratio=1; //Omezeni maximalni hodnoty vystupu z Phidget
int option_menu_calibration=0; //Menu
int aux_option_menu_calibration=0; //Menu
double aux_data,reliable_data; //Pro korekce chyb

time_t t = time(NULL);
struct tm *tm = localtime(&t); //Vytvori se slozka pro ukladani dat
char folder_name[64];
strftime(folder_name,sizeof(folder_name),"%c",tm);
mkdir(folder_name, S_IRUSR | S_IRGRP | S_IROTH | S_IXUSR | S_IXGRP | S_IXOTH | S_IWUSR | S_IWGRP | S_IWOTH);

if(!bcm2835_init()) //Inicializace bcm2835
    return 1;

while(aux_option_menu_calibration==0) {
    printf("\nPress 1 to configure calibration,2 to insert ratio values and 3 to run default\n");
    scanf("%d",&option_menu_calibration);

    if(option_menu_calibration==1) {
        printf("Calibration started, please remove any weight from the sensor\n");
        printf("Insert how many samples each parameter will have(200 is fine):\n");
        scanf("%d",&samples_calibration);
        printf("Insert the sample interval between each measurement(10~20ms is fine):\n");
        scanf("%d",&samptime_calibration);
        if(continue_or_exit()==1) {
            goto done;
        }
    };

    printf("\nGetting offset measurements:\n"); //Mereni ofsetu
    reliable_data=0;
    for(i=1; i<=samples_calibration; i++) {

```

```

    aux_data=getVoltageRatio(ch,0); //Kontrola obdrzenych ze senzoru dat na chyby
    if(aux_data<max_voltageratio) {
        reliable_data=aux_data;
        offset+=reliable_data;
    }
    else {
        offset+=reliable_data;
    }
    usleep(sampletime_calibration);
}
offset=offset/samples_calibration;
printf("The offset value is: %lf\n",offset);

printf("\nPlease insert the calibration weight(g)\n"); //Obdrzeni hmotnosti zavazi
scanf("%lf",&meas_mass);
if(continue_or_exit()==1) {
    goto done;
};
printf("Getting calibration weight ratio:\n");
reliable_data=0;
for(i=1; i<=samples_calibration; i++) {
    aux_data=getVoltageRatio(ch,0);
    if(aux_data<max_voltageratio) {
        reliable_data=aux_data;
        meas_ratio+=reliable_data;
    }
    else {
        meas_ratio+=reliable_data;
    }
    usleep(sampletime_calibration);
}
meas_ratio=meas_ratio/samples_calibration;
printf("The calibration weight ratio is: %lf\n",meas_ratio);

m = meas_mass/(meas_ratio-offset); //Vypocet konstant pro kalibracni primku
b = -m*offset;

FILE *filecfg; //Vytvoreni souboru pro zapis konstant
char cfgname[100];
sprintf(cfgname, "%s/configurationfile.txt",folder_name);
filecfg = fopen(cfgname, "w");
fprintf(filecfg, "m = %lf",m);
fprintf(filecfg, "\nb = %lf",b);
aux_option_menu_calibration=1;
}
else if(option_menu_calibration==2) { //Rucne dosazeni hodnot (menu 2)
    printf("Insert m:\n");
    scanf("%lf",&m);
    printf("Insert b:\n");
    scanf("%lf",&b);
    aux_option_menu_calibration=1;
}
else if(option_menu_calibration==3) { //Tady se natvrdo dosadi hodnoty kalibracni primky (menu 3)
    m=5066888.566255;

```

```

        b=-276.075165;
        aux_option_menu_calibration=1;
    }
    else {
        printf("Invalid option, try again\n");
    }
}
printf("\nThe sensor is now calibrated, we are ready to start printing\n");

```

## D.4 Čtení dat z Json souboru

```

char json_line[100];
char json_junk[100];
char json_value[100];
int TotalSolidArea_counter=0,LargestArea_counter=0,
SmallestArea_counter=0,PixDiff_counter=0,AreaCount_counter=0;
int json_layers =JSON_MAX_LAYERS;
double *TotalSolidArea_vector=malloc(sizeof(double)*json_layers);
double *LargestArea_vector=malloc(sizeof(double)*json_layers);
double *SmallestArea_vector=malloc(sizeof(double)*json_layers);
double *PixDiff_vector=malloc(sizeof(double)*json_layers);
double *AreaCount_vector=malloc(sizeof(double)*json_layers);
double json_aux;

FILE *json_file = fopen(JSON_PATH, "r");
if(!json_file) {
    printf("Could not open json_file. Exiting application. Bye");
    return 1;
}
while(!feof(json_file)) {
    fscanf(json_file,"%[^ \n\t\r]s",json_line);
    if(strcmp(json_line,"\"TotalSolidArea\":")==0) {
        fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
        fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
        fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
        fscanf(json_file,"%[^ \n\t\r]s",json_value);
        sscanf(json_value, "%lf", &json_aux);
        TotalSolidArea_vector[TotalSolidArea_counter]= json_aux;
        TotalSolidArea_counter++;
    }
    if(strcmp(json_line,"\"SmallestArea\":")==0) {
        fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
        fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
        fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
        fscanf(json_file,"%[^ \n\t\r]s",json_value);
        sscanf(json_value, "%lf", &json_aux);
        SmallestArea_vector[SmallestArea_counter]= json_aux;
        SmallestArea_counter++;
    }
    if(strcmp(json_line,"\"LargestArea\":")==0) {
        fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
        fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
        fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
    }
}

```

```

    fscanf(json_file,"%^[ \n\t\r]s",json_value);
    sscanf(json_value, "%lf", &json_aux);
    LargestArea_vector[LargestArea_counter]= json_aux;
    LargestArea_counter++;
}
if(strcmp(json_line, "\\PixDiff\\:") == 0) {
    fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
    fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
    fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
    fscanf(json_file,"%^[ \n\t\r]s",json_value);
    sscanf(json_value, "%lf", &json_aux);
    PixDiff_vector[PixDiff_counter]= json_aux;
    PixDiff_counter++;
}
if(strcmp(json_line, "\\AreaCount\\:") == 0) {
    fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
    fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
    fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk);
    fscanf(json_file,"%^[ \n\t\r]s",json_value);
    sscanf(json_value, "%lf", &json_aux);
    AreaCount_vector[AreaCount_counter]= json_aux;
    AreaCount_counter++;
}
fscanf(json_file,"%[ \n\t\r]s",json_junk); //Mazani mezer
}
fclose(json_file);

```

## D.5 Sběr dat

```

int total_layers; //Pocet vrstev modelu
int initial_layer; //Nastaveni pocatecni vrstvy. Dovoluje pokracovani tisku z teto vrstvy
int current_layer=0; //Ukladani cisla vrstvy pri preruseni mereni.
int samptime_printing=20; //Perioda vzorkovani
int flag_startedprinting; //Vlajka ukazujici zacatek tisku
int count_zero; //Pro potlacen vlivu sumu v komunikaci mezi driverem a Raspberry
int count_one; //Pro potlacen vlivu sumu v komunikaci mezi driverem a Raspberry
int one_trigger=100; //Ukazuje kolikrat program musi dostat vysoky uroven signalu od driveru pro zacatek sberu dat
int zero_trigger=100; //Ukazuje kolikrat program musi dostat nizky uroven signalu od driveru pro konec sberu dat
int aux_data_acquirer=0; //Promenna cyklu pro sber dat
int samples_perlayer=2000; //Pro analyzu dat v kazde vrstve. Vetsinou dostavame 580 - 680 zaznamu z kazde vrstvy.
//Zalezi taky na periode vzorkovani
double *aux_vector=malloc(sizeof(double)*samples_perlayer); //Vektor pro ukladani dat kazde vrstvy pro analyzu
double parameter_initial_force=7; //Parametr pro detekci chyby
double parameter_minimum_force=0.1; //Parametr pro detekci chyby
int c = '\0'; //Pouziva se v kbhit pro hledani stisknuti ESC

printf("Insert how many layers will be:\n");
scanf("%d",&total_layers);
total_layers=total_layers-1;
printf("Insert which layer it will start (1 for default):\n");
scanf("%d",&initial_layer);
double *maximum_vector=malloc(sizeof(double)*total_layers); //Vektor pro ukladani maximalni sily v kazde vrstve
zerolizer(maximum_vector,total_layers); //Iniciacni vektor, vynuluje hodnoty

```

```

if(continue_or_exit()==1) {
    goto done;
};

char filename[100]; //Vytvoreni souboru pro ukladani dat
FILE *file;
sprintf(filename, "%s/Force_data.txt",folder_name);
file = fopen(filename, "w");
printf("\nReady to start gathering data, press ESC to exit during the printing\n");

for(i=initial_layer; i<=total_layers; i++) { //Hlavni cyklus pro sber dat
    flag_startedprinting=0;
    count_zero=0;
    count_one=0;
    k=0;
    reliable_data=0;
    aux_data_acquirer=0;
    zerolizer(aux_vector,samples_perlayer);
    if(i==1) {
        fprintf(file, "clear\n");
    }
    fprintf(file, "F%d = [\n",i);

    while(aux_data_acquirer==0) { //Cyklus pro ukladani dat kazde vrstvy
        echoOff(); //Hledani stisknuti ESC
        if (kbhit()) {
            c = getchar();
            if(c==27) {
                break;
                return 1;
            }
        }
        echoOn();

        if(bcm2835_gpio_lev(PIN_PRINTER)==1) { //Detekce smeru pohybu motoru(NAHORU = 1, DOLE = 0)
            count_one++;
        }

        if(count_one>one_trigger) { //Podminka pro zacatek sberu dat
            printf("\nGetting data from layer %d, pls be good data\n",i);
            flag_startedprinting=1; //Vlajka ukazujici zacatek tisku
            while(count_zero<zero_trigger) { //Cyklus sberu dat
                usleep(sampletime_printing);
                aux_data=getVoltageRatio(ch,0);
                if(aux_data<max_voltageratio) {
                    reliable_data=((aux_data*m+b)*(gravity/1000));
                    fprintf(file, "%lf\n",reliable_data); //Uklada odpovidajici hodnoty pro dalsi analyzu v MATLABu
                    aux_vector[k]=reliable_data; //Uklada odpovidajici data do vektoru pro FD
                    k++;
                } else {
                    fprintf(file, "%lf\n",reliable_data); //V pripade poruchy zapisuje posledni odpovidajici data
                }
            }
            if(bcm2835_gpio_lev(PIN_PRINTER)==0) { //Detekce smeru pohybu motoru(NAHORU = 1, DOLE = 0)
                count_zero++;
            }
        }
    }
}

```

```

    }
  }
}
if(flag_startedprinting==1) {
  aux_data_acquirer=1; //Podminka udrzeni aktualni tisknute vrstvy
}
}
fprintf(file, "];\n");
current_layer=i;
maximum_vector[i]=return_maximum(aux_vector,total_layers); //Zapisuje maximalni hodnotu sily
printf("Finished gathering data from layer %d, the maximum value was : %.2lf N\n",i,maximum_vector[i]);

if(c==27) { //Hledani stisknuti ESC
  break;
  return 1;
}

if(i>0 && i<=10 && (maximum_vector[i]<=parameter_initial_force)) {
  printf("The initial force is a little low, maybe something happened\n");
}
if(maximum_vector[i]<parameter_minimum_force) {
  printf("The maximum force for this layer didnt reach the minimum force parameter =
%.2lf N,probably unsticked\n",parameter_minimum_force);
}
}
}

```