



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VLIV PARAMETRŮ STEREOLITOGRAFICKÉHO 3D TISKU NA DOBU TISKU

THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF STEREOLITHOGRAPHIC 3D PRINTING ON THE
PRINTING TIME

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Kůst

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aneta Zatočilová, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Martin Kůst
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Aneta Zatočilová, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

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

Vliv parametrů stereolitografického 3D tisku na dobu tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aditivní stereolitografická 3D tiskárna Solflex 650 pracuje na principu vytvrzování fotopolymeru DLP projektorem. V současné době je výpočet doby trvání tisku na této tiskárně nepřesný a proměnný v průběhu tisku. Celkový čas tisku ovlivňuje doba osvitů, počet vrstev a mnoho dalších parametrů. Přesnější výpočet doby trvání tisku by usnadnil práci s tiskárnou a tím přispěl k rozšiřování této technologie.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je nalezení vztahů mezi parametry 3D tisku a délkou trvání tisku.

Díličí cíle bakalářské práce:

- identifikace parametrů ovlivňujících dobu tisku: doba osvitů, počet vrstev a další,
- návrh a realizace experimentů k odhalení vztahů mezi jednotlivými parametry a délkou trvání tisku,- vyhodnocení experimentálně zjištěných dat a vyvození závěrů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:
http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

BÁRTOLO, Paulo Jorge (ed.). Stereolithography: Materials, Processes and Applications [online]. USA: Springer US, 2011. ISBN 978-0-387-92904-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá stereolitografickým 3D tiskem (SLA). Popisuje konstrukci jak s horním, tak spodním osvitem a uvádí rozdíly mezi osvitem laserem a DLP (Digital Light Processing) projektorem.

Další částí je nalezení závislosti mezi dobou osvitu a vytvrzenou tloušťkou vrstvy neboli materiálového profilu u materiálu DETAX šedý, tak aby bylo možné s tímto materiálem pracovat a provádět další experimenty.

Tyto experimenty jsou prováděny na SLA tiskárně SolFlex650 společnosti Way2production. Pro snazší práci s touto tiskárnou byly identifikovány parametry ovlivňující dobu tisku a následně nalezen model, na jehož základě je možné celkový čas tisku spočítat.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aditivní technologie, stereolitografie, SLA, parametry tiskárny, délka trvání tisku, rychlost tisku, materiálový profil

ABSTRACT

This paper deals with stereolithographic 3D printing (SLA). It describes both upper and lower lighting design and shows the differences between laser light and DLP (Digital Light Processing) projector.

Another part is to find the dependence between the time of exposure and the thickness of the layer also known as material profile on the DETAX, gray. So another work and further experiments can be done using this material.

These experiments are performed on Way2production's SolFlex650 SLA printer. For ease of use with this printer, parameters affecting print time have been identified and a model is then found to calculate the total print time

KEYWORDS

Additive technology, stereolithography, SLA, printer parameters, print duration, print speed, material profile

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KŮST, M. Vliv parametrů stereolitografického 3D tisku na dobu tisku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 63 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aneta Zatočilová, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci Vliv parametrů stereolitografického 3D tisku na dobu tisku jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Anety Zatočilové, Ph.D.. Současně prohlašuji, že jsem v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 19. května 2017

..... Podpis autora

OBSAH

Obsah	11
1 ÚVOD	12
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
2.1 Konstrukční řešení tiskáren	13
2.1.1 Tiskárny s horním osvitem	13
2.1.2 Tiskárny se spodním osvitem	14
2.2 Osvit paprskem laseru a DLP (Digital Light Processing) projektorem	14
2.2.1 Osvit laserem	15
2.2.2 Osvit DLP projektorem	16
2.2.3 Porovnání kvality	17
2.3 Materiály	18
2.3.1 Vlastnosti materiálů a aditiva	18
2.3.2 Základní princip vytvrzování	18
2.3.3 Postprocessing	21
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	22
4 MATERIÁL A METODY	23
4.1 Popis tiskárny	23
4.1.1 Inovace u tiskárny SolFlex 650	24
4.1.2 Software	24
4.2 Určení materiálového profilu	27
4.2.1 Tvorba PNG souborů	27
4.2.2 Úprava BS a MP souborů	27
4.2.3 Postprocessing a měření	28
4.3 Stanovení času tisku	28
4.3.1 Identifikace parametrů ovlivňujících rychlost tisku	28
4.3.2 Analýza a výpočet času tisku s parametry ze skupiny 1	29
4.3.3 Analýza a výpočet času tisku s parametry ze skupiny 1 a 2	33
4.3.4 Analýza a výpočet času tisku s parametry ze skupiny 1, 2 a 3	35
4.3.5 Analýza a výpočet času tisku s parametry ze skupiny 1, 2, 3 a segmenty 40	40
4.3.6 Analýza a výpočet času tisku s parametry ze skupiny 1, 2, 3, segmenty a scale	42
4.3.7 Návrh experimentu pro ověření konečného vzorce	44
5 VÝSLEDKY	46
5.1 Nalezení materiálového profilu	46
5.2 Zjištění času tisku	48
6 DISKUZE	50
7 ZÁVĚR	51
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	52
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	55
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A GRAFŮ	56
SEZNAM TABULEK	57
SEZNAM PŘÍLOH	58

1 ÚVOD

Aditivní technologie v dnešním slova smyslu mají počátky v 80. letech. Díky dostupnějším a levnějším technologiím se v poslední době dostávají do podvědomí i širší veřejnosti. Nejznámější používanou technologií je FDM (Fused Deposition Modeling). Vedle toho ale existuje obrovské množství dalších technologií, jako jsou SLS (Selective Laser Sintering), EBM (Electronic Beam Melting), PolyJet, SLA (Stereolithography) a další. Každá technologie má určité výhody, ať už jde o vyšší přesnost, rychlejší tisk, širší tvarové možnosti a nižší náklady, ale také s tím spojené nevýhody [1].

Tato práce se zabývá tiskárnou využívající metodu SLA (Stereolithography), někdy také označovanou jako SL. Jedná se o nejstarší aditivní metodu, kterou si právě v 80. letech patentoval Charles W. Hull a popisuje ji následovně.

Stereolitografický 3D tisk je proces vytváření prostorového modelu za pomoci postupného vytvrzování tenkých vrstev fotopolymeru na jeho povrchu. Fotopolymerem je materiál, který se při osvětlení UV zářením vytvrzuje. Po vytvrzení dané vrstvy se objekt posune o tloušťku jedné vrstvy a celý proces se opakuje, dokud není vytvořen celý objekt [1].

Výhodou této metody je vysoká přesnost a kvalita povrchu, která je dána tloušťkou vrstvy a rozlišením, s jakým je daná vrstva osvětlena. Díky těmto dobrým vlastnostem v poměru k relativně jednoduché konstrukci a tím pádem nižší ceně se jedná, vedle metody FDM, o nejrozšířenější metodu na poli stolních 3D tiskáren, jako je právě v této práci zkoumaná tiskárna SolFlex 650 od společnosti Way2production.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2

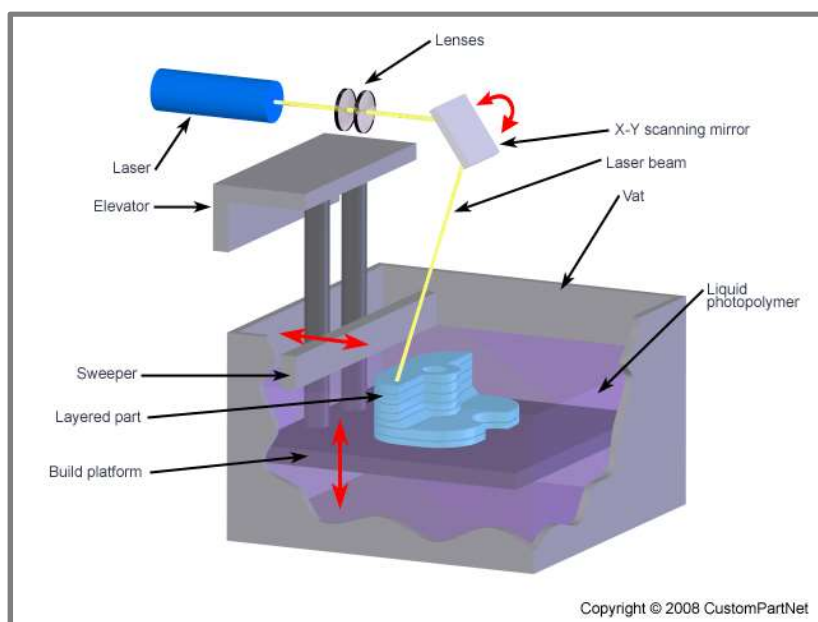
2.1 Konstrukční řešení tiskáren

2.1

2.1.1 Tiskárny s horním osvitem

2.1.1

Prvním a dodnes používaným způsobem vytváření modelu je postupné vytvrzování jedné vrstvy nad druhou se zdrojem záření umístěným nad nádobou s tekutinou, tak jak to popisuje Charles W. Hull ve svém patentu. Největší nevýhodou tohoto řešení je problematické nanášení další, tenké a ještě nevytvrzené vrstvy polymeru. Tento proces (recoating) se nejčastěji řeší pomocí speciálního stěrače, u kterého je možné přesně nastavit požadovanou tloušťku vrstvy. Po vytvrzení vrstvy se plošina s modelem posune dolů o tloušťku jedné vrstvy a stěrač (recoater blade) poté přejede nad celým modelem a vyhladí hladinu polymeru [2]. Tímto problémem se detailně zabývá například Renap K, Kruth JP [3] [2].



Obr. 1 Model konstrukce s horním osvitem [6]

Společnost 3D Systems používá patentovaný Zephyr™ Recoating System, který za pomoci mírného podtlaku distribuuje polymer na již vytvořenou vrstvu a odstraňuje ho z míst s dutinou [2] [4]. Problém s nanášením nové vrstvy polymeru se zejména u nízkorozpočtových a po domácku vyráběných tiskáren dá řešit ponořením modelu do větší hloubky než jen o tloušťku vrstvy, tak aby bylo překonáno povrchové napětí fotopolymeru a ten se rozlil po celém povrchu modelu, a následného povytažení modelu do požadované výšky. Tento způsob použil například L. Pendl [5]. Autor zde

potvrzuje, že toto řešení je proveditelné, ale je zapotřebí použít polymer s velmi nízkou viskozitou.

2.1.2 Tiskárny se spodním osvitem

V roce 2003 společnost EnvisionTEC uvedla na trh jednu z prvních 3D tiskáren používajících DLP (Digital Light Processing) projektor, jako zdroj UV záření [2]. Vzhledem k tomu, že s DLP projektorem bylo možné u menších modelů dosáhnout větší přesnosti než u tiskáren s laserem, byl kladen větší důraz na přesnost tloušťky vrstvy nově nanášeného polymeru.

Z toho důvodu se u některých tiskáren začaly ozařovat vrstvy ze spodu, skrze průhledné sklo nádoby s fotopolymerem. Model byl tím pádem tvořen obráceně - vzhůru nohama. Tento přístup přináší tři hlavní výhody. První z nich je absence roztíracího mechanismu (recoating mechanism), protože samotná tíhová síla stačí k tomu, aby se mezi vytvrzenou vrstvou a sklo dostal tekutý polymer. Další výhodou je větší přesnost vytvořené vrstvy, protože ta je dokonale plochá, definovaná průhledným sklem nádoby. Třetí výhodou je, že fotopolymeru v nádobě nemusí být tolik, aby v ní byl celý model ponořen, což vede i k snadnější kontrole a udržení potřebné hladiny. [2]

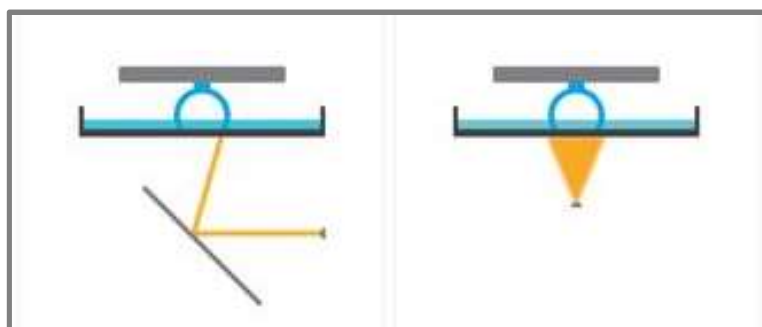
Nevýhodou je, že malé a jemné části modelu mohou být poškozeny během separace nově vytvrzené vrstvy od skla, [2] neboť na novou vrstvu při odtrhu působí síly. O těchto silách pojednává I. Kovalenko, M Garan, A. Shynkarenko, P. Zelený aj. Šafka [7]. Z výzkumu vyplynulo, že odtrhová síla je přímo úměrná ploše vytvrzené vrstvy. Proto je třeba volit jiný způsob orientace modelu pro tisk, než třeba u metody FDM (Fuse deposit modeling). Stejně tak může pomoci pohyb konaný zároveň v ose z a x. [8] Dalším problémem je tisk dutin, u kterých musí být zajištěn odtok nevytvřené fotopolymeru. Minimálními rozměry odtokových kanálků z pohledu chemického složení polymeru, tloušťky vrstvy a rozlišení tiskárny se zabývají H.Gong a M. Beauchamp [9].

Tento princip s osvitem ze spodu nabývá společně s rozmachem stolních tiskáren, díky své jednodušší konstrukci a snazší obsluze, na popularitě. Příkladem může být produkt společnosti Formlabs. Tiskárna Form 1 má naklápěcí nádobu s fotopolymerem, tak aby se vytvrzená vrstva oddělovala od skla pod mírným úhlem a eliminovalo se riziko poškození jemných prvků při odtrhu. U modelu Form 2 uvedeného na trh v roce 2015 byla přidána stěrka, zabraňující přilnutí tuhých částic na skle.

2.2 Osvit paprskem laseru a DLP (Digital Light Processing) projektorem

Metoda osvit DLP projektorem je podstatně novější, než metoda osvit laserem. Oba způsoby osvit vrstvy fungují ale na stejných principech s velmi podobnou konstrukcí

tiskárny, ale s poměrně výrazným rozdílem v kvalitě povrchu, přesnosti a rychlosti tisku v závislosti na typu modelu [10].



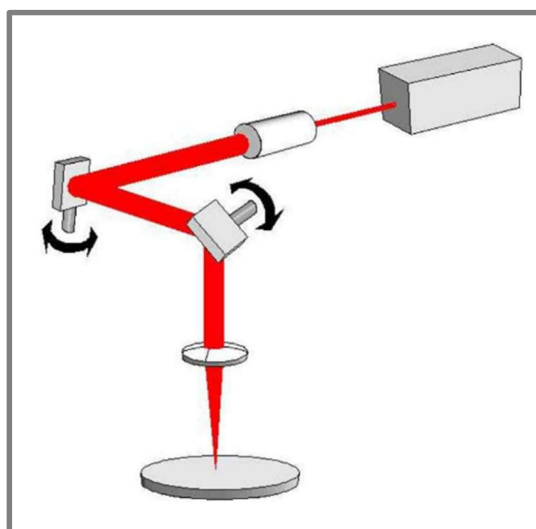
Obr. 2 Grafické porovnání osvětlení laserem (vlevo) a DLP projektorem (vpravo) [10]

2.2.1 Osvětlení laserem

2.2.1

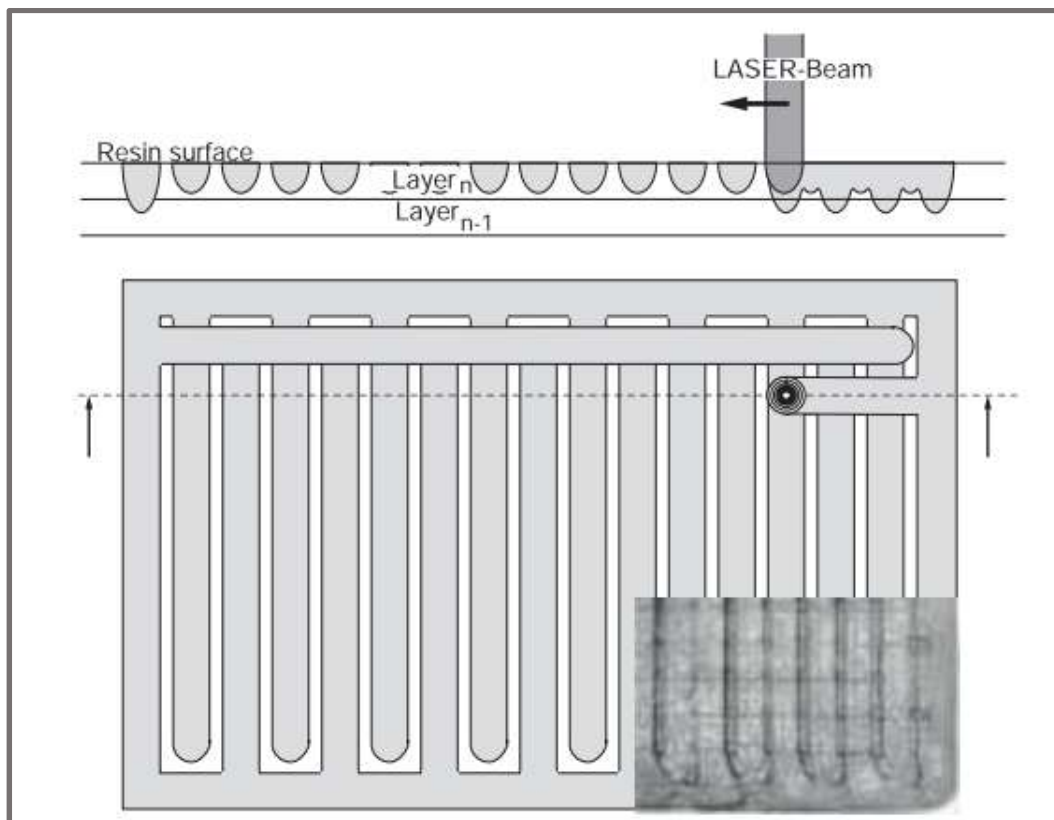
Prvními používanými lasery byly Ar^{++} a HeCd , protože s nimi bylo možné dosáhnout požadovaných vlnových délek, ale s velmi malou účinností. V dnešní době se používají výhradně lasery pevnolátkové [4].

Nejčastěji používaným způsobem osvětlení vrstvy fotopolymeru laserem je soustava polohovatelných zrcadel a čoček (scanner). Tato zrcadla jsou polohována servomotory s vysokou přesností. Tímto způsobem lze dosáhnout všech bodů vytvrzované roviny. Pro zaostření paprsku i v rozích se používá F-Theta čočka. S aktuálně používanými lasery a s optickou soustavou se průměr paprsku laseru pohybuje okolo 0,3 mm. [4]



Obr. 3 Mechanismus a princip scanneru [4]

Tímto vektorovým způsobem je třeba postupně osvětlit celou vytvrzovanou plochu. Je proto evidentní, že tento způsob je, zejména u větších modelů, velmi pomalý. Pro dosažení kratších časů a zachování přesnosti a kvality povrchu jsou zkoumány různé typy vykreslování požadované plochy. Vliv vzoru na rozměrovou přesnost zkoumal například K.K.B. Hon a C. Han, S.P. Edwardson [11].



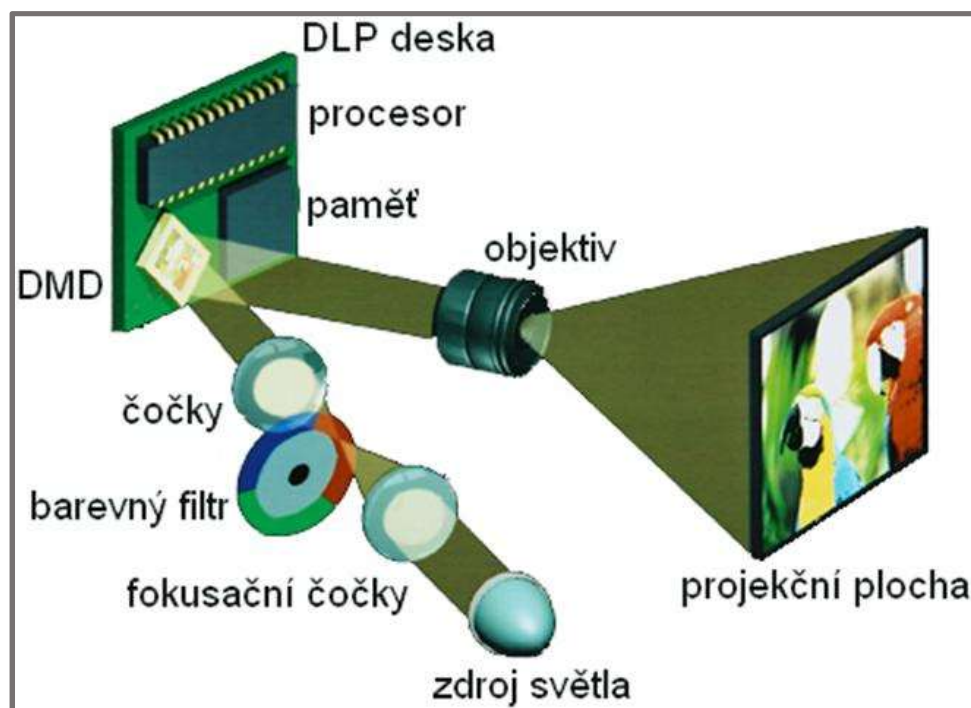
Obr. 4 Schématické znázornění vzoru vykreslování laserového paprsku STAR-Weave [4].
Hloubka vytvrzení (horní část obrázku), reálná struktura (pravý dolní roh obrázku).

Aby bylo možné určit výšku resp. hloubku a šířku vytvrzení, bylo potřeba vytvořit matematické modely. První a základní model vytvořil v roce 1992 P. Jacobs [12], který je ještě dnes využíván například společností 3D Systems. Tento model dále rozšiřuje J. Bártolo [13], který mimo jiné uvažuje i lom paprsku laseru při dopadu na hladinu polymeru. Jiný způsob modelování volí T. Yanyan [14], určující míru vytvrzení (DOC – degree of cure). Pro dosažení přesnosti na molekulární úrovni jsou zkoumány kinetické modely uvažující jak tepelné, tak chemické reakce [15].

2.2.2 Osvit DLP projektorem

Druhou možností je osvit DLP projektorem přes masku. Maska je geometricky stejná s požadovaným tvarem vytvrzované vrstvy, ale v menším měřítku. Celá vrstva je pak přes masku ozářena. Přesnost tohoto procesu závisí na kvalitě (rozlišení) používané masky, resp. projektoru. Jako maska se používá buď technologie LCD (Liquid Crystal Display) monitorů, kde je světlo promítáno skrze tekuté krystaly, nebo je maska vytvářena přímo v DLP projektoru. Lze použít také masku mechanickou [4]. Vzhledem k tomu, že při použití masky je vrstva nasvícena celá najednou a nemusí být postupně vykreslována, jako v případě laseru, lze touto metodou, zejména v případě velkých ploch, dosáhnout vyšších rychlostí [10].

DLP projektory jsou založeny na technologii DMD (Digital Micromirror Device), kde je čip tvořen více než dvěma miliony zrcadel o velikosti přibližně 16 μ m. Tato zrcadla jsou elektronicky polohovatelná a odrazem od těchto zrcadel vzniká požadovaný obraz. Nejvyšší běžně dostupné rozlišení DLP projektorů je 1920 x 1080 [16].



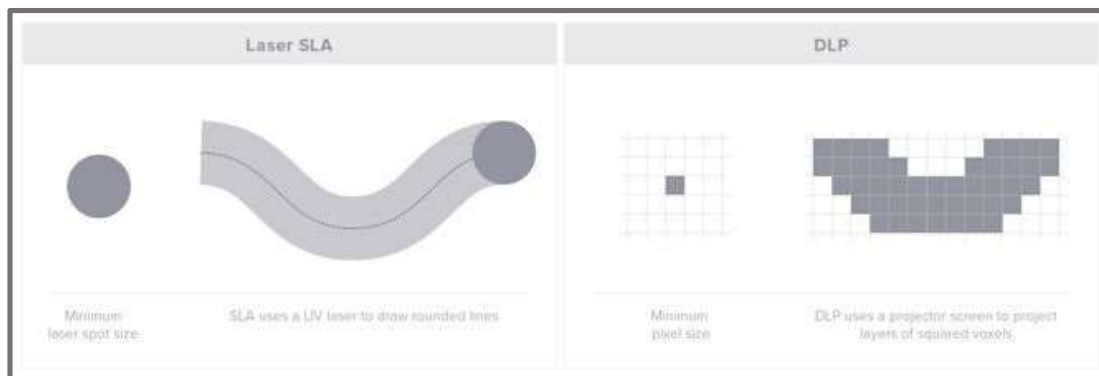
Obr. 5 Schéma DLP projektoru [16]

Tak jak popisuje Pehl L. [5] ve své práci, pro SLA tisk lze použít v podstatě jakýkoli DLP projektor, záleží pouze na intenzitě záření v oblasti modrého světla a UV záření. DLP projektor není schopný dodat tak vysokou energii jako laser, proto se z pravidla používají akrylové fotopolymery, které k vytvrzení nepotřebují energie tolik. Pro základní určení hloubky vytvrzení lze použít standardní model podle Jacobse [12] [9]. Stejně tak bude možné uplatnit pokrok ve výzkumu termokinetických modelů [15].

2.2.3 Porovnání kvality

Vhodnost použití DLP projektoru a laseru názorně popisuje společnost Formlabs [17] na svých stránkách. Zatímco s DLP projektorem jsme schopni velmi rychle a detailně vykreslit malý objekt, pro vykreslení více malých a detailních objektů najednou na velké ploše je vhodnější použití laseru, který udržuje konstantní rozlišení nezávisle na velikosti plochy [17].

Z toho vyplývá, že i kvalita samotného povrchu se bude lišit. Při vykreslování vrstvy laserem je sice rozlišení dáno velikostí průměru paprsku, ale nikdy zde nemůže dojít ke schodovitému efektu v x-y rovině. Zatímco DLP projektor je vždy limitován počtem pixelů, který u větších ploch zabraňuje vytisknutí detailního modelu.



Obr. 6 Rozdíl mezi laserem a DLP projektorem [17]

Logicky se nabízí kombinace těchto dvou principů, jak za účelem dosažení vyšší přesnosti, tak dosažení vyšších rychlostí. Tento koncept je popsán v článku Chi Zhou, Hang Ye, Feng Zhang [18].

2.3 Materiály

Metoda SLA pracuje na principu vytvrzování polymeru po vrstvách. Do kategorie polymerů spadá obrovská škála materiálů od běžných plastů, přes polystyren a kaučuk až po škrob a celulózu. Metoda SLA pracuje s polymery vytvrditelnými zářením neboli fotopolymery a má mnoho specifických požadavků jak na mechanické vlastnosti konečného výrobku, tak na vlastnosti ještě nevytvrzeného fotopolymery, jako je například viskozita. Některé vlastnosti se dají ovlivnit aditivami, zatímco u jiných vlastností se přistupuje ke kompromisům.

2.3.1 Vlastnosti materiálů a aditiva

Polymer použitelný pro SLA musí splňovat několik základních požadavků. Jednak je to disperzní stálost, nutná pro zajištění stejných vlastností během tisku, zároveň musí být zachována relativně nízká viskozita (menší než 5 Pa·s), aby bylo možné vytvořit vyhovující tloušťku nové vrstvy a zároveň zachovat co nejkratší čas. Dále je to požadavek na vyhovující hloubku vytvrzení a rozlišení. Velmi důležitou vlastností ovlivňující přesnost je také smrštivost materiálu během vytvrzení [13].

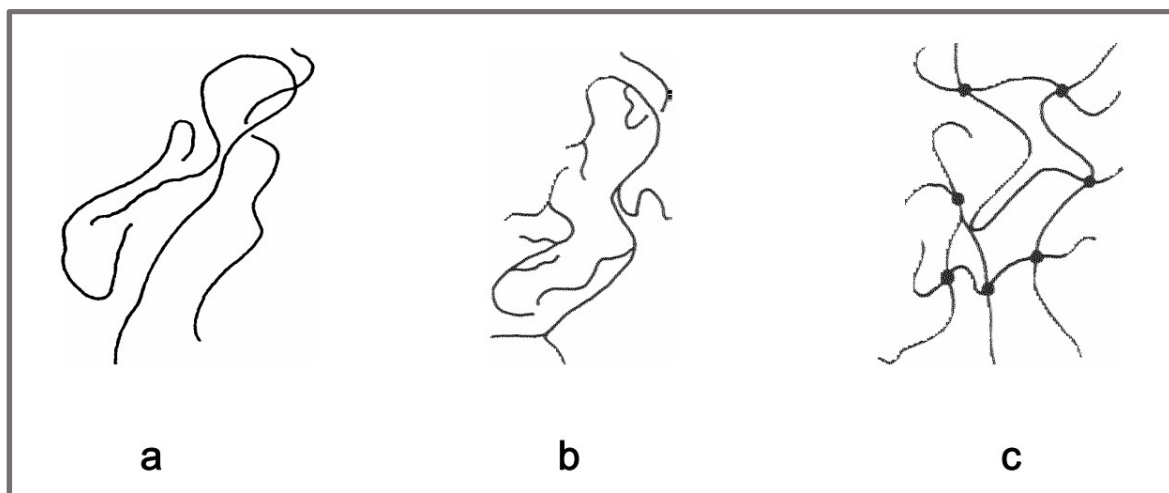
Všechny tyto vlastnosti jsou ovlivňovány aditivami, které detailně popisuje Důcháček V. [19]. O postupu přípravy a vývoji nových materiálů pojednává například článek na webu Formlabs [20], který se zaměřuje i na konečný vzhled materiálů, tak aby byl atraktivní pro koncového uživatele. Po určení si základních požadavků na mechanické vlastnosti a jejich dosažení za pomoci náležitých aditiv se přistupuje k pigmentování, které je ovšem často na úkor požadovaných vlastností. Platí, že transparentní materiály mají obecně lepší vlastnosti, než materiály neprůhledné, či obarvené.

2.3.2 Základní princip vytvrzování

Vytvrzování neboli polymerace je proces spojování malých molekul (monomerů) a oligomerů do molekul větších (polymerů) složených z mnoha monomerních jednotek [12].

Za pomoci síťovacího činidla tyto makromolekulární látky mohou buď vzájemně, nebo se zbylými monomery vytvářet trojrozměrnou prostorovou síť.

Sesíťováním se mění vlastnosti polymeru – ztrácí rozpustnost, tavitelnost a termoplasticitu. Naopak se ale zlepšují mechanické vlastnosti, rozměrová stálost a odolnost vůči chemikáliím [19].



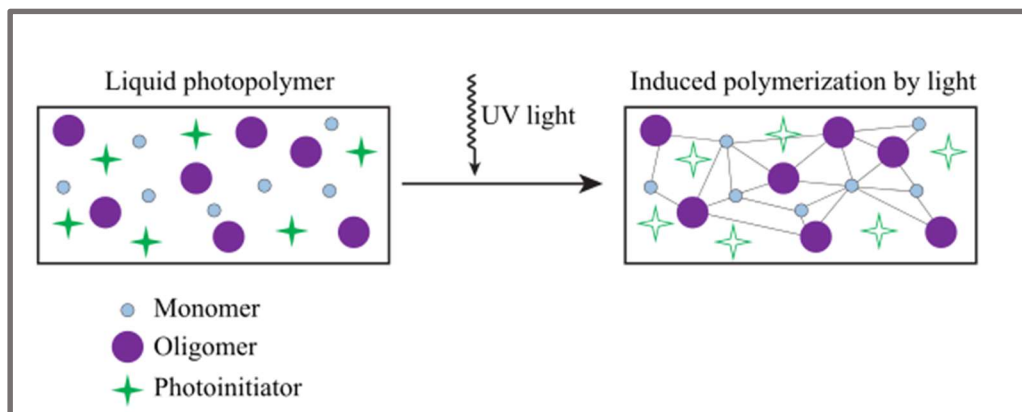
Obr. 7 Schématické znázornění makromolekul: a) lineární, b) rozvětvený, c) sesíťovaný [19]

Polymerace je vedle polyadice a polykondenzace jedním ze základních způsobů syntézy polymerů a používá se právě pro metodu SLA. Nevznikají při ní vedlejší produkty, tudíž chemické složení výsledného polymeru je stejné, jako složení monomeru. Pro zahájení procesu je třeba dodat počáteční energii, tzv. aktivační energii. Tu lze dodat teplem, zářením nebo iniciátorem. Podle druhu aktivních částic rozlišujeme polymeraci radikálovou, iontovou a koordinační [19].

Polymerace radikálová i iontová jsou reakcemi monomeru s aktivními konci vznikající makromolekuly, při čemž vznikající řetězec je čistě náhodný. Zatímco při polymeraci koordinační se monomer včleňuje mezi rostoucí konce řetězce dle přesných geometrických pravidel. Jak iontová, tak koordinační polymerace kladou při výrobě vyšší nároky na prostředí (zejména na teplotu) [19]. Proto je u SLA tiskáren využívána metoda radikálové polymerace.

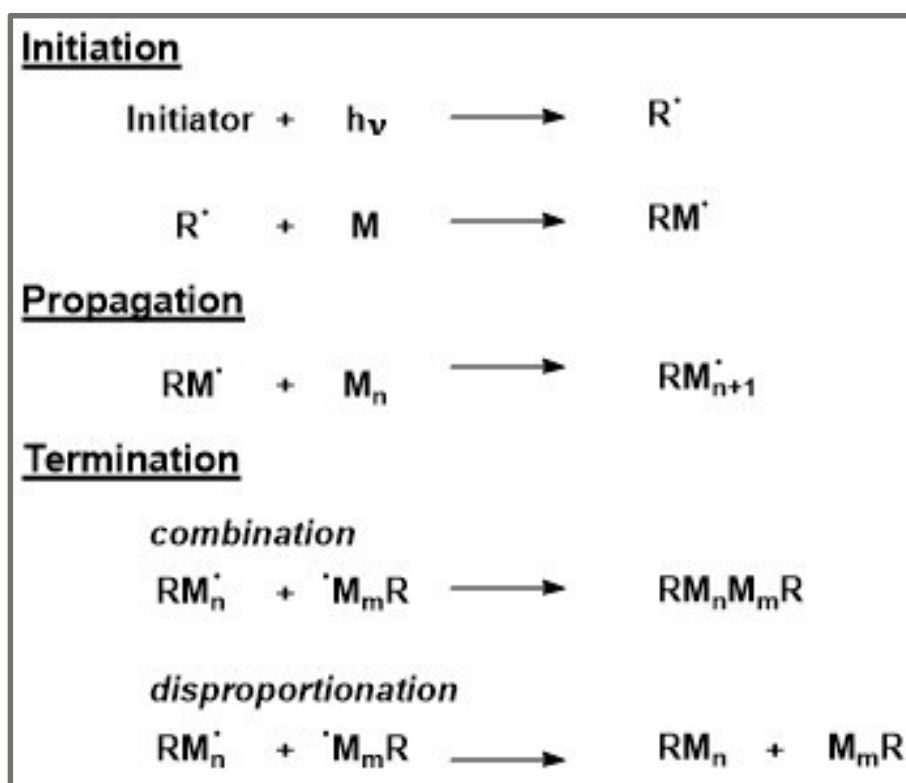
Radikálová polymerace

V případě SLA jsou do směsi polymeru přidány látky (fotoiniciátory), které se při ozáření rozpadají na volné radikály a tím urychlují proces síťování.



Obr. 9 Znárodnění vytvrzení fotopolymery UV zářením [21]

Radikálová polymerace se skládá ze tří základních částí, kde první je iniciace, při které je fotoiniciátoru dodána energie zářením. Ten se rozpadá na volné radikály (R^*), které vytvářejí aktivní monomery (M). Tyto aktivované monomery během druhé části – propagace vytvářejí rostoucí polymerní řetězce. Posledním krokem je terminace, která probíhá buď prostřednictvím kombinace (combination), kde jsou dva řetězce spojeny dohromady, nebo pomocí disproporce (disproportionation), která je důsledkem vzniku dvou řetězců.



Obr. 8 Průběh radikálové polymerace [21]

2.3.3 Postprocessing

Tento proces můžeme dle Jacobse [12] rozdělit do 4 dílčích procesů.

1. Odejmutí modelu
2. Čištění modelu
3. Postcuring neboli dotvrzení
4. Dokončení

Odejmutí modelu

Spočívá v oddělení vytvrzeného materiálu od platformy. Před samotným odejmutím je vhodné nechat objekt odkapat, abychom jednak zamezili znečištění tiskárny při další manipulaci a za druhé minimalizovali nebezpečný odpad v podobě zbývajícího polymeru. Polymery používané pro SLA jsou vysoce toxické s neblahým dopadem na životní prostředí, zejména na vodní faunu. Abychom zabránili podráždění pokožky, je doporučeno při manipulaci s nedokončeným objektem používat ochranné rukavice [12].

Čištění modelu

Je nedílnou, i když opomíjenou, součástí 3D tisku. Nejčastějším postupem je odmočení modelu v izopropylalkoholu (IPA), nebo podobném roztoku na bázi alkoholů. Součástí je také odstranění podpor, které lze před vytvrzením snadněji odlomit či odštípnout kleštěmi [12].

Postcuring

Je proces výrazně ovlivňující konečné mechanické vlastnosti modelu. Během tvorby modelu nedochází k úplnému vytvrzení (stále jsou přítomny volné radikály) [14]. Proto je ve většině případů nezbytné umístit model do vytvrzovací komory, kde je předem danou vlnovou délkou dodatečně ozářen. Vliv vlnové délky a doby osvětlení na mechanické vlastnosti popisuje výzkum společnosti Formlabs [22].

Dokončení

Spočívá hlavně v dobroušení zbytků podpor a dohlazení různých detailů modelu. Požadavky na vzhled průmyslových dílů budou pochopitelně jiné, než požadavky na sochy a umělecká díla jako jsou například charaktery z filmů a seriálů. V takových případech probíhá malování a lakování pro dosažení maximálního efektu a celý postprocessing se tím značně prodlužuje.

I přes nesporný vliv postprocessingu na konečné rozměry, mechanické vlastnosti a vzhled objektu je různorodost v postupech a používaných metodách různých společností i jedinců obrovská. Je to dáno jednak odlišnými technickými možnostmi, dále různými používanými technologiemi a materiály a také tím, že neexistují jasné a prokazatelné výzkumy, které by nastavily jasná pravidla a standardy.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Je zřejmé, že za posledních několik let se v oblasti SLA tisku provedlo velké množství výzkumů a pokusů. Ty vedly jednak ke zlepšení přesnosti a kvality tisku, objevu nových materiálů s velmi odlišnými mechanickými a vizuálními vlastnostmi, ale také k ověření různých metod a principů SLA tisku. Ať už jde o metody vytvrzování laserem či DLP projektorem, nebo osvitem shora, či ze spodu. To má za důsledek celkové zjednodušení technologie, čehož využívají společnosti nabízející menší, stolní tiskárny, které nejsou primárně určeny pro průmyslovou výrobu. Téměř by se dalo mluvit o tiskárnách domácích, i když toto označení může být poněkud zavádějící. Jednak příprava tisku, ale hlavně postcuring jsou stále natolik nestandardní operace, vyžadující specifické prostředí, nástroje, ale i znalosti, že s 3D tiskárnou není možné pracovat tak, jako s tiskárnou na inkoust a papír.

Tato práce je zaměřena na analýzu faktorů ovlivňujících rychlost tisku. Veškeré experimenty vedoucí k dosažení výsledků byly provedeny na tiskárně SolFlex 650.

Tiskárna SolFlex 650 je právě tou stolní tiskárnou, která se snaží zákazníkovi celý proces co nejvíce zjednodušit a usnadnit. K tomu mimo jiné přispívá i informace o čase zbývajícím do konce tisku. V současnosti je čas zobrazovaný na displeji velmi nepřesný a v průběhu tisku se výrazně mění. Mým hlavním cílem je tedy nalezení parametrů nastavených v souborech materiálového profilu a tiskového profilu, které ovlivňují rychlost tisku a na jejich základě vypočítat celkovou délku trvání tisku.

Sekundárním cílem je určení materiálového profilu u materiálu DETAX šedý, který byl dodán společně s tiskárnou. Toto je nezbytné pro nastavení vhodné tloušťky a doby osvitu, tak aby byly vrstvy jakýchkoli experimentálních objektů tisknutých na tiskárně správně vytvrzeny a spojeny.

Hlavní cíl práce:

- nalezení vztahů mezi parametry 3D tisku a délkou trvání tisku.

Dílčí cíle práce:

- nalezení materiálového profilu pro materiál DETAX, šedý
- identifikace parametrů ovlivňujících dobu tisku: doba osvitu, počet vrstev a další
- návrh a realizace experimentů vedoucích k odhalení vztahů mezi jednotlivými parametry a délkou trvání tisku
- určení konstant, jako je rychlost posuvu nebo čas počáteční inicializace tiskárny
- vyhodnocení experimentálně zjištěných dat a vyvození závěrů

4 MATERIÁL A METODY

4

4.1 Popis tiskárny

4.1



Obr. 10 Tiskárna SolFlex 650 [23]

Way2production je nová společnost, která na svých stránkách nabízí dva typy tiskáren. Jedná se o SolFlex 350 a SolFlex 650, lišící se hlavně velikostí prostoru pro tisk. Veškerá měření a experimenty v této práci jsou prováděny na tiskárně SolFlex 650 s parametry dle tabulky (Tab. 1).

Tab. 1 Technické parametry tiskárny SolFlex 650 [23]

Technické parametry tiskárny SolFlex 650	
Technologie	UV-LED DLP®
	Vlnová délka: 385 nm
Stavěcí objem	120 x 128 x 100 mm
Velikost pixelu	50 μm
Tloušťka vrstvy	25 - 200 μm
Rozměry tiskárny	400 x 400 x 400 mm
Váha	cca. 20 kg
Pracovní teplota	18 - 28 °C
Napájení	85 -260 V
	50/60 Hz
	138 W

Tiskárna má DLP projektor používající technologii UV-LED DLP®. Jedná se o nahrazení UV lampy LED (Light-Emitting Diode), vyzařující požadovanou vlnovou délku. To umožňuje odstranění barevných filtrů, nacházejících se u běžných projektorů. Výhodou této technologie je vyšší svítivost a životnost zařízení (díky absenci UV lampy), a také větší variabilita vlnových délek, od 365 nm až po 405 nm i s možností kombinace. To umožňuje SLA tiskárnám pracovat s více druhy polymerů [24]. Tiskárna SolFlex 650 s rozlišením projektoru 1280 x 800 obrazových bodů je nastavena na vlnovou délku 385 nm.

Projektor je umístěn pod nádobou s polymerem a osvit tudíž probíhá zespodu s tvorbou modelu vzhůru nohama. Platforma je k posuvné plošině připevněna elektromagnety a po dokončení tisku ji lze i s nově vzniklým modelem z tiskárny odejmout.

4.1.1 Inovace u tiskárny SolFlex 650

Odtrh nově vytvrzené vrstvy

Inovativním způsobem je řešen odtrh nově vytvrzené vrstvy od nádoby s fotopolymerem. Tak jako u všech standardních tiskáren s dolním osvitom, i zde vznikají při posunu v ose z síly, které mohou jemné detaily modelu poškodit. Metody snižující riziko poškození modelu při odtrhu byly zmíněny v sekci 2.1.2 *Tiskárny se spodním osvitom*, jednalo se zejména o naklápění nádoby s fotopolymerem [10], nebo kombinaci posuvu v ose z i v ose x [8].

Tiskárny SolFlex používají místo běžných skleněných či plastových nádob na fotopolymer nádobu silikonovou. Ta je před tiskem upevněna na 4 pohyblivé šrouby. Silikon zachovává čírost, tak aby skrze nádobu bylo možné fotopolymer osvětlovat, ale zároveň jej lze při odtrhu deformovat (natahovat a kroutit), tak aby se vrstva co nejladčeji oddělila a snížily se nežádoucí odtrhové síly.

Pixel seaming

Rozlišení v rovině x-y je limitováno rozlišením projektoru. Maximální rozlišení běžně prodávaných DLP projektorů je 1920 x 1200 obrazových bodů. Společnost BenQ uvedla na konci roku 2016 projektor W11000 se 4K rozlišením, tedy 3840 x 2160 obrazových bodů.

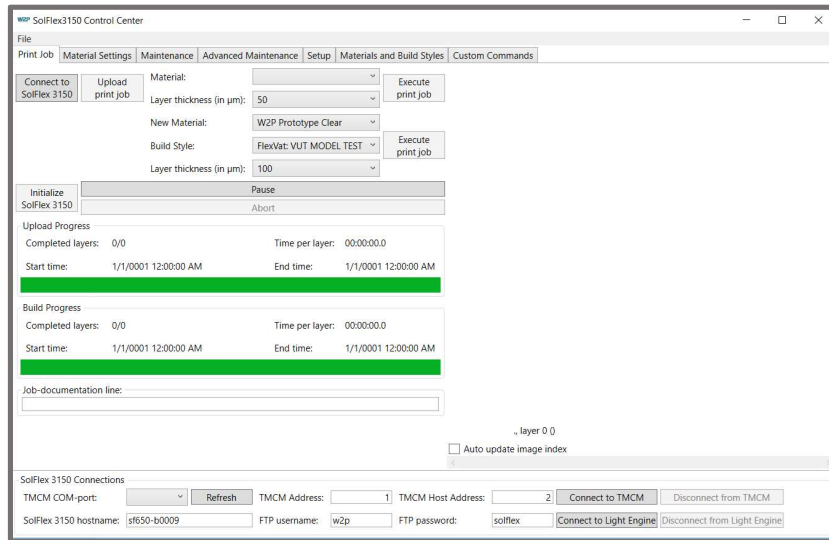
Way2production však pro lepší rozlišení i v případě velkých objektů volí metodu pixel seaming, která spočívá v rozdělení stavěcí plochy na více částí, které jsou osvětlovány postupně. SolFlex 650 díky tomu, s projektorem o rozlišení 1280 x 800, je schopno osvětlit vrstvu s celkovým rozlišením 2560 x 2400. Výhodou je značná finanční úspora. Nevýhodou je delší čas tisku, který je vždy třeba vynásobit počtem oblastí, do kterých tisknutý objekt zasahuje. Je také nutné zajistit dobré napojení (seaming faktor) daných oblastí, tak aby došlo k vytvrzení a byly zachovány požadované mechanické vlastnosti.

4.1.2 Software

K práci s tiskárnou jsou kromě libovolného softwaru na vytváření 3D objektů a následného převedení do formátu STL nebo SLC používány dva programy dodané

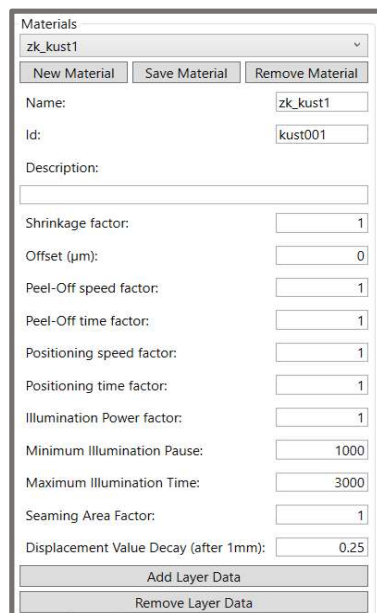
výrobce. Tiskárnu lze ovládat skrze ethernetové připojení, nebo přímo na displeji tiskárny s tím, že přes flashdisk je možné nahrát potřebné soubory. Tyto soubory nezbytné pro tisk jsou v podstatě jen tři. Jedná se o soubor materiálového profilu (MP) s příponou .sfm, dále soubor tiskového profilu - build style (BS) s příponou .sfb a nakonec .ZIP soubor s obrázky jednotlivých vrstev formátu .png. Tyto soubory tvoří dohromady takzvaný Jobfile.

Solflex Control Center



Obr. 11 Prostředí programu Solflex Control Center

Tento program slouží, zjednodušeně řečeno, k nastavení, vytváření a editaci MP a BS souborů. Patří do rukou vývojářů a běžný uživatel nemá možnost tento program využít.



Obr. 12 Základní nastavení materiálového profilu

Poskytuje informace a možnost editace všech parametrů tiskárny. Kromě nastavení pozic a technických údajů o tiskárně se většina parametrů nastavuje přes faktor, kde hodnota 1 představuje přednastavenou hodnotu (například intenzitu osvětlení) a je možné pomocí změny faktoru (například na hodnotu 1,2) tento parametr měnit (zvětšit intenzitu osvětlení).

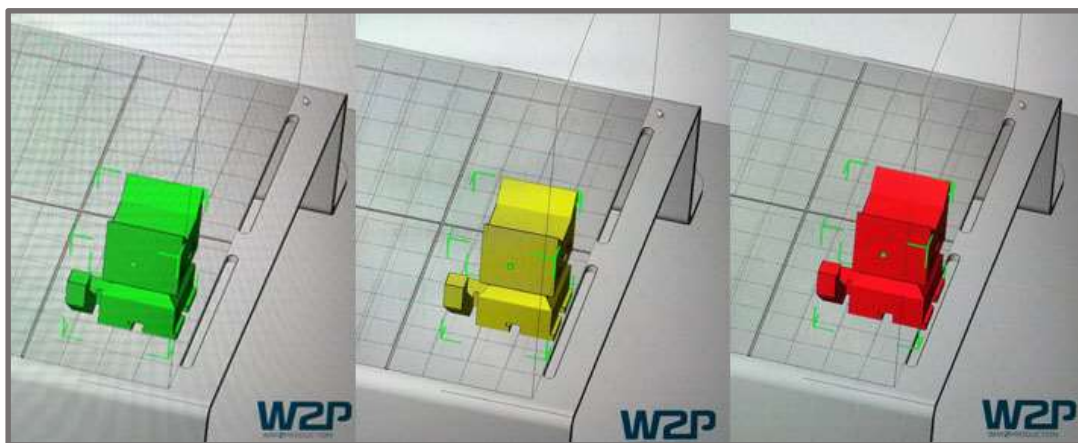
Pro vytvoření MP souboru a obdobně pro BS soubor je třeba si v záložce *Materials and Build Styles* vytvořit nový MP či BS, pojmenovat je a zadat jim unikátní ID, tak aby s nimi mohla tiskárna pracovat (viz Obr. 12). U MP se jedná zejména o nastavení tloušťky vrstvy a následné doby osvětlení, která může být pro různé vrstvy jiná. Jeden soubor MP může, ale nemusí, obsahovat informace pro různé tloušťky vrstev. U BS se jedná především o nastavení faktorů rychlostí posuvů a odtrhů. Čekacích časů a faktoru intenzity osvětlení.

Po nastavení parametrů je možné si přes *File* nový soubor vyexportovat. Je vhodné při vytváření nového souboru vycházet z již existujících přednastavených MP a BS, tak aby byly cíleně měněny jen určité parametry a tisk fungoval bez problémů.

Netfabb

Netfabb je freeware software na úpravu a práci s .STL soubory. K tiskárně je dodáván s doplňkem Way2production rozšiřujícím možnosti práce s tiskárnami SoliFlex. Tento program slouží primárně pro import objektů a jejich orientaci vůči platformě, ke kontrole a doděláním podpor a rozřezání objektu na vrstvy. Vedle toho je také možné objekty vytvářet a upravovat, ale uživatelské prostředí tomu není příliš nakloněno. Dobře použitelné jsou ale základní objekty z knihovny.

Po importování souboru .STL je možné objekt zorientovat, umístit ho na předvytvořenou platformu reprezentující reálné tvary skutečné platformy na tiskárně. Uživatel je také upozorněn (změnou barvy objektu) když se objekt nachází na hraně, nebo za hranou platformy.



Obr. 13 Barevný indikátor umístění objektu na platformě

K dispozici je také nástroj na identifikaci ploch, které potřebují podpory. Následně je možné si vybrat ze 3 druhů podpor, které jsou automaticky vygenerovány.

Před samotným exportováním .STL modelu do jednotlivých vrstev v podobě obrázků formátu .png je možné provést základní nastavení v podobě tloušťky vrstvy (která by

měla odpovídat tloušťce nastavené v BS souboru) a také upravit koeficient smrštění modelu a offset, v závislosti na použitém materiálu.

4.2 Určení materiálového profilu

4.2

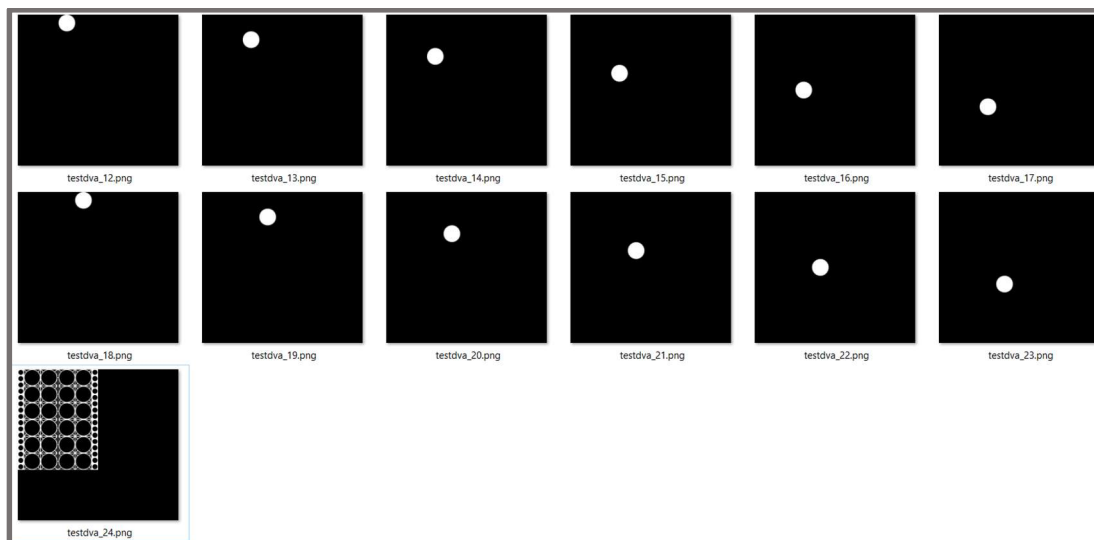
Cílem tohoto experimentu je zjištění závislosti tloušťky vytvrzené vrstvy na době osvitu, neboli materiálového profilu u námi používaného fotopolymeru. Tím je Detax šedý, z chemického hlediska se jedná o směs akrylové/methakrylové pryskyřice s dalšími aditivy. Určení materiálového profilu je nezbytné pro další práci s materiálem. Příliš dlouhá doba osvitu by zbytečně prodlužovat dobu tisku, naopak malá tloušťka nezajistí dostatečné propojení sousedních vrstev.

Tisk nebude probíhat s posuvnou platformou, tak jako u normálních tisků, ale všechny osvity budou provedeny do jedné vrstvy, která se posléze odloupne od dna nádoby a proměří se tloušťky jednotlivých koleček.

4.2.1 Tvorba PNG souborů

4.2.1

Vycházelo se ze vzorového experimentu, který měřil celkem 12 různých tlouštěk. Pro zpřesnění experimentu byl model rozšířen v bitmapovém editoru na celkem 24 možných měření. Zazipovaný soubor tedy obsahuje 25 obrázků formátu .png, z nichž 24 představuje kolečka rozmístěná v prostoru, tak aby mohla být postupně osvětlena po různou dobu, a poslední soubor tvoří mřížku, která všechna kolečka spojuje a usnadňuje manipulaci s celou vytvrzenou vrstvou.



Obr. 14 Náhled části .png souborů

4.2.2 Úprava BS a MP souborů

4.2.2

BS soubory řídí posuvné pohyby platformy a také pohyb, napínání a jinou deformaci nádoby s polymerem. Nic z toho nebylo v tomto experimentu žádoucí, protože by to jednak zpomalilo celý proces a také by to v případě deformace nádoby mohlo způsobit

určité nepřesnosti. Proto byly všechny tyto pohyby nastaveny na 0. Kompletní BS se nachází v příloze 5.

U MP souboru byl offset nastaven na 0 a zbylé faktory na 1, protože v experimentu nehrají žádnou roli. Dále bylo zapotřebí u jedné libovolné tloušťky vypsat postupně všech 24 požadovaných časů osvitů v milisekundách, tak aby byl každý .png soubor, počínaje testdva_00.png a konče testdva_23.png, osvícen po různou dobu. Poslední 25. čas byl nastaven na 15 000 milisekund, což se vztahovalo k souboru testdva_24.png, kterým byla mřížka spojující všechna vytvrzená kolečka. Kompletní MP soubor se nachází v příloze 5.

4.2.3 Postprocessing a měření

Po dokončení tisku byla nádoba s polymerem vyndána z tiskárny. Špachtlí jemně odloupnuta vytvrzená vrstva od dna nádoby a objekt se nechal 15 minut odkapat. Poté byl umístěn na 1 minutu do Izopropylalkoholu (IPA) a po další minutu ještě ultrazvukově čištěn. Následně se objekt vysušil proudem vzduchu z vysokotlaké pumpy a nakonec byl umístěn do UV komory s počtem záblesků 2 000, který se po otočení opakoval. Měření tloušťky vytvrzené vrstvy bylo provedeno mikrometrem, umístěným na střed vytvrzeného kola a výsledky pro jednotlivá měření zaneseny do tabulky (viz. str. 46, Tab. 15).

4.3 Stanovení času tisku

Pro stanovení času potřebného na tisk daného objektu je třeba najít parametry, které jednak ovlivňují rychlost tisku (posuvy, odtrhy) a také přímo samotný čas (čekací časy). Po nalezení těchto parametrů je vyhodnocen jejich vliv na dobu tisku a postupně jsou přidávány do vzorce pro celkový čas. Každá část vzorce je průběžně ověřována.

Je dobré si uvědomit, že oproti osvitů pomocí laseru, doba u tiskárny používající DLP projektor není v principu ovlivněna velikostí modelu, protože vrstva je vždy osvícena celá najednou. V našem případě to však platí pouze v situaci, kdy daný objekt zasahuje pouze do jednoho ze šesti segmentů (viz. kapitola 4.3.5) a také pouze v případě, že se dané parametry přímo nevztahují k velikosti vytvrzené plochy (viz. kapitola 4.3.6).

Vzorce byly z důvodu přehlednosti a názornosti vytvářeny v programu Mathcad 14. Pro snadnější orientaci ve vzorcích a pochopení symbolů je možné využít manuál [25] a seznam použitých zkratk a symbolů.

4.3.1 Identifikace parametrů ovlivňujících rychlost tisku

Každý Jobfile obsahuje celkem 3 soubory, ve kterých jsou všechny uživatelem zadané parametry ovlivňující tisk. Ze souborů .sfm a .sfb byly vybrány všechny parametry a zapsány do tabulek (viz. Příloha 1). Vybrané parametry ovlivňující rychlost byly zařazeny do skupin, podle kterých budou postupně přidávány do vzorce pro celkový čas tisku. Třetí částí Jobfile je soubor .ZIP, který obsahuje .png soubory všech vrstev modelu. Z toho lze určit další informace, jako je například počet vrstev, plocha vytvrzovaných vrstev nebo počet segmentů, do kterých model zasahuje (viz. příloha 1).

Tabulka (viz. Tab. 2) s rozřazenými parametry do skupin slouží pro lepší orientaci v následujících kapitolách. Celá tabulka s identifikovanými parametry a jejich popisem je v příloze 1.

Tab. 2 Rozřazení parametrů do skupin

	Parametr	Skupina
.SFM	PeelOffSpeedFactor	3
	PositioningSpeedFactor	3
	PeelOffTimeFactor	3
	PositioningTimeFactor	3
	Item1 (tloušťka vrstvy)	1
	Item1 (doba osvitů)	1
	MaxIlluminationTime	1
	MinIlluminationPause	1
	DisplacementValueDecay	scale
.SFB	IlluminationTimeFactor	3
	Position	2
	SpeedFactor	3
	Wait	1
	WaitTime	1
	ScaleWaitTime	scale
	Position	2
	SpeedFactor	3
	Wait	1
	WaitTime	1
ScaleWaitTime	scale	
.ZIP	n	1
	segmenty	segmenty
	plocha	scale

4.3.2 Analýza a výpočet času tisku s parametry ze skupiny 1

4.3.2

Do skupiny 1 jsou zařazeny doby osvitů včetně podmínky maximální doby osvitů a také čekací časy po jednotlivých pohybech.

Celkový čas je součtem jednotlivých časů z níže popsaných vzorců. To platí v případě, že jsou další, níže nezmíněné parametry, vypnuty nebo nastaveny na hodnoty neovlivňující celkový čas.

$$\text{cassk1} = \text{PromenneVrstvy} + \text{Vrstvy} + \text{Preruseni} + \text{WaitPeel} + \text{WaitRepos} \quad (1)$$

Kde:

<i>cassk1</i> [ms]	- celkový čas tisku při nastavení parametrů skupiny 1
<i>PromenneVrstvy</i> [ms]	- součet časů prvních vrstev s proměnným časem
<i>Vrstvy</i> [ms]	- celkový čas osvitů vrstev se standardním časem
<i>Preruseni</i> [ms]	- součet časů všech přerušení, ke kterým dojde během vytváření vrstev s proměnným časem
<i>WaitPeel</i> [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů vzhůru pro celý tisk
<i>WaitRepos</i> [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů dolů pro celý tisk

Jsou sečteny časy prvních vrstev, které jsou proměnné a obvykle vyšší, než běžný čas osvitů.

$$\text{PromenneVrstvy} := \sum \text{promM} = \quad (2)$$

Kde:

<i>PromenneVrstvy</i> [ms]	- součet časů prvních vrstev s proměnným časem
<i>promM</i> [ms]	- časy pro jednotlivé vrstvy

Dále je vynásoben počet vrstev, zmenšený o počet vrstev s odlišným časem, dobou osvitů.

$$\text{Vrstvy} := (\text{n} - \text{pocetPromennych}) \cdot \text{DobaOsvitu} = \quad (3)$$

Kde:

<i>Vrstvy</i> [ms]	- celkový čas osvitů vrstev se standardním časem
<i>n</i> [-]	- počet vrstev
<i>pocetPromennych</i> [-]	- počet vrstev s proměnným časem
<i>DobaOsvitu</i> [ms]	- standardní doba osvitů vrstev

Dále je nastavena podmínka, při které dojde k přerušení osvitů v případě, že doba osvitů překoná maximální dovolený čas.

$$\text{Preruseni} := \begin{cases} s \leftarrow 0 & \\ \text{for } x \in 0.. \text{pocetPromennych} - 1 & \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + \text{trunc} \left(\frac{\text{promM}_{0,x}}{\text{MaxIlluminationTime}} \right) \cdot \text{MinIlluminationPause} \text{ if } \text{promM}_{0,x} > \text{MaxIlluminationTime} \\ 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. & \\ s & \end{cases} = \quad (4)$$

Kde:

$Preruseni$ [ms]	- součet časů všech přerušení, ke kterým dojde během vytváření vrstev s proměnným časem
$pocetPromennych$ [-]	- počet vrstev s proměnným časem
$promM$ [ms]	- časy pro jednotlivé vrstvy
$MaxIlluminationTime$ [ms]	- maximální dovolený čas osvětlení bez přerušení
$MinIlluminationPause$ [ms]	- čekací doba při přerušení osvětlení

A nakonec čekací čas, který je proveden po každém posunu v případě, že je hodnota nastavena na TRUE. Samotné časy posuvů jsou uvažovány ve skupině 2, ale i když je hodnota posuvu nastavena na hodnotu 0, čekací časy musí být započítány. Ty mohou být nastaveny 3 v sekci pro posun vzhůru *WaitPeel* a 3 v sekci pro posun dolů *WaitRepos*.

$$WaitPeel := \left(\begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..3 \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + WaitTimeP_i \text{ if } WaitP_i = TRUE \\ 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ s \end{array} \right) \cdot n = \quad (5)$$

Kde:

$WaitPeel$ [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů vzhůru pro celý tisk
$WaitTimeP$ [ms]	- hodnota čekacího času po každém pohybu vzhůru
$WaitP$ [-]	- parametr zapínající/vypínající čekací čas po daném pohybu
n [-]	- počet vrstev

$$WaitRepos := \left(\begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..3 \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + WaitTimeR_i \text{ if } WaitR_i = TRUE \\ 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ s \end{array} \right) \cdot n = \quad (6)$$

Kde:

$WaitRepos$ [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů dolů pro celý tisk
$WaitTimeR$ [ms]	- hodnota čekacího času po každém pohybu dolů
$WaitR$ [-]	- parametr zapínající/vypínající čekací čas po daném pohybu
n [-]	- počet vrstev

Ověření experimentem

Jsou provedena 2 měření, u kterých byly všechny parametry, kromě aktuálně zkoumaných, nastaveny na hodnoty, které nemají žádný vliv na tisk. Počet vrstev je 75 a 749.

Tab. 3 Výsledky při použití vzorce (1)

počet vrstev modelu	vypočítaný čas [s]	reálný čas [s]	rozdíl na vrstvu [s]
75	717	1085	4,906666667
749	5932	7670	2,320427236

Vzhledem k tomu, že výsledný čas neměl být teoreticky ničím ovlivněn, jsou stanoveny konstanty kompenzující daný rozdíl.

Start je čas po spuštění tisku, po který se tiskárna inicializuje, neprobíhá tedy vytvrzování vrstev, a bylo experimentálně zjištěno, že je pro všechny tisky konstantní.

Odchylka vrstvy byla experimentálně určena a bude používána jako konstanta pro další měření.

Celkový čas tisku tedy odpovídá tomuto vzorci:

$$\begin{aligned} \text{CASsk1} = & \text{start} + \text{PromenneVrstvy} + \text{Vrstvy} + \text{Preruseni} + \text{WaitPeel} \\ & + \text{WaitRepos} + n * \text{odchylkaVrstvysk1} \end{aligned} \quad (7)$$

Kde:

<i>CASsk1</i> [ms]	- celkový čas tisku při nastavení parametrů skupiny 1
<i>start</i> [ms]	- konstantní čas inicializace tiskárny po spuštění tisku [160 s]
<i>PromenneVrstvy</i> [ms]	- součet časů prvních vrstev s proměnným časem
<i>Vrstvy</i> [ms]	- celkový čas osvětlení vrstev se standardním časem
<i>Preruseni</i> [ms]	- součet časů všech přerušování, ke kterým dojde během vytvrzování vrstev s proměnným časem
<i>WaitPeel</i> [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů vzhůru pro celý tisk
<i>WaitRepos</i> [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů dolů pro celý tisk
<i>n</i> [-]	- počet vrstev
<i>odchylkaVrstvysk1</i> [ms]	- experimentálně zjištěná odchylka na jednu vrstvu [2600 ms]

Tab. 4 Výsledky při použití vzorce (7)

počet vrstev modelu	vypočítaný čas [s]	reálný čas [s]	rozdíl na vrstvu [s]
75	1073	1085	0,16
749	8040	7670	-0,49399199

Po zahrnutí daných konstant výsledky odpovídají předpokladům a dále lze ze vzorce (7) vycházet.

4.3.3 Analýza a výpočet času tisku s parametry ze skupiny 1 a 2

Skupina 1 je rozšířena o časy potřebné na posuvy platformy. K těm dochází jednak v důsledku samotné tvorby modelu, kdy je platforma po každé vrstvě posunuta o tloušťku jedné vrstvy, ale také z technických důvodů - aby byla vrstva řádně oddělena od dna nádoby a fotopolymer mohl opět vyplnit celé dno, je model vytažen z fotopolymeru a následně opět ponořen.

Celkový čas tisku pro parametry zahrnuté do skupin 1 a 2 je:

$$CASsk2 = start + PromenneVrstvy + Vrstvy + Preruseni + WaitPeel + WaitRepos + n * odchylkaVrstvysk2 + posuvyPeel + posuvyRepos \quad (8)$$

Kde:

$CASsk2$ [ms]	- celkový čas tisku při nastavení parametrů skupiny 1 a 2
$start$ [ms]	- konstantní čas inicializace tiskárny po spuštění tisku [160 s]
$PromenneVrstvy$ [ms]	- součet časů prvních vrstev s proměnným časem
$Vrstvy$ [ms]	- celkový čas osvětlení vrstev se standardním časem
$Preruseni$ [ms]	- součet časů všech přerušení, ke kterým dojde během vytvrzování vrstev s proměnným časem
$WaitPeel$ [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů vzhůru pro celý tisk
$WaitRepos$ [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů dolů pro celý tisk
n [-]	- počet vrstev
$odchylkaVrstvysk2$ [ms]	- experimentálně zjištěná odchylka na jednu vrstvu
$posuvyPeel$ [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů vzhůru pro celý tisk
$posuvyRepos$ [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů dolů pro celý tisk

Posuv vzhůru je určen v sekci *PeelOffCoordinates* a můžou být nastaveny až 3 různé hodnoty, do kterých se platforma postupně dostává. Hodnoty jsou udávány v milimetrech jako absolutní hodnota od aktuálně vytvrzované vrstvy.

Rychlost posuvu je experimentálně změřena a bude považována za konstantu. Pro každý posuv může být upravena faktorem. Hodnota celkového času posuvů je součtem časů potřebných na vykonání daných pohybů vynásobeného počtem vrstev.

$$posuvyPeel := \left[\begin{array}{l} cp \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 2..3 \\ \quad cp \leftarrow cp + \frac{|PositionP_i - PositionP_{i-1}|}{(vPosuv \cdot SpeedFactorP_i)} \\ \quad cp + \frac{PositionP_1}{(vPosuv \cdot SpeedFactorP_1)} \end{array} \right] \cdot n = \quad (9)$$

Kde:

- $posuvyPeel$ [ms] - celkový čas potřebný na vykonání posuvů vzhůru pro celý tisk
- $PositionP$ [mm] - absolutní hodnota posuvu vzhůru od aktuálně vytvrzované vrstvy
- $vPosuv$ [mm/ms] - experimentálně změřená rychlost posuvu [3, 7 mm/s]
- $SpeedFactorP$ [-] - faktor ovlivňující rychlost posuvu vzhůru
- n [-] - počet vrstev

Stejně tak je tomu u pohybů dolů, jen je třeba nalézt poslední výchozí polohu, danou předchozím pohybem vzhůru.

$$posuvyRepos := \left[\begin{array}{l} cp \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 2..3 \\ \quad cp \leftarrow cp + \frac{|PositionR_i - PositionR_{i-1}|}{(vPosuv \cdot SpeedFactorR_i)} \\ \quad \left| \begin{array}{l} PositionR_1 - \left| \begin{array}{l} \text{hladina} \leftarrow PositionP_3 + TLvrstvy \text{ if } PositionP_3 \neq 0 \\ \text{otherwise} \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{hladina} \leftarrow PositionP_2 + TLvrstvy \text{ if } PositionP_2 \neq 0 \\ \text{otherwise} \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{hladina} \leftarrow PositionP_1 + TLvrstvy \text{ if } PositionP_1 \neq 0 \\ \text{otherwise} \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{hladina} \leftarrow TLvrstvy \\ \text{otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \\ \text{hladina} \end{array} \right. \\ \quad cp + \frac{\text{hladina}}{(vPosuv \cdot SpeedFactorR_1)} \end{array} \right] \cdot n = \quad (10)$$

Kde:

- $posuvyRepos$ [ms] - celkový čas potřebný na vykonání posuvů dolů pro celý tisk
- $PositionR$ [mm] - absolutní hodnota posuvu dolů od aktuálně vytvrzované vrstvy
- $vPosuv$ [mm/ms] - experimentálně změřená rychlost posuvu [3,7 mm/s]
- $SpeedFactorR$ [-] - faktor ovlivňující rychlost posuvu dolů
- n [-] - počet vrstev
- $TLvrstvy$ [mm] - tloušťka jedné vrstvy

Ověření experimentem

Jsou provedeny zkušební tisky, uvažující s *odchylkaVrstvyskl*, které potvrdily principiální správnost vzorců.

Tab. 5 Výsledky při uvažování posuvů

počet vrstev modelu	vypočítaný čas [s]	reálný čas [s]	rozdíl na vrstvu [s]
75	1980	2103	1,64
749	18010	18210	0,267023

Vyšší odchylka u tisků s menším počtem vrstev je pravděpodobně způsobena nedokonalou charakteristikou elektromotorů a je vykompenzována úpravou odchylky na vrstvu.

$$\text{odchylkaVrstvysk2} := \text{odchylkaVrstvysk1} + \frac{75s}{n} \quad (11)$$

Kde:

- odchylkaVrstvysk2* [ms] - experimentálně zjištěná odchylka na jednu vrstvu pro vzorec zahrnující parametry ze skupiny 1 a 2
- odchylkaVrstvysk1* [ms] - experimentálně zjištěná odchylka na jednu vrstvu pro vzorec zahrnující parametry ze skupiny 1
- n* [-] - počet vrstev

Po úpravě odchylky je rozdíl na vrstvu minimální (viz. Tab. 6).

Tab. 6 Výsledky při použití vzorce (8)

počet vrstev modelu	vypočítaný čas [s]	reálný čas [s]	rozdíl na vrstvu [s]
75	2055	2103	0,64
749	18080	18210	0,173565

4.3.4 Analýza a výpočet času tisku s parametry ze skupiny 1, 2 a 3

4.3.4

Do této skupiny spadá nastavení faktorů v .sfm souboru a hodnoty faktoru času osvitu v .sfb souboru.

Celkový čas je počítán jako:

$$\text{cassk3} = \text{start} + \text{PromenneVrstvysFactorem} + \text{VrstvysFactorem} + \text{Preruseni} + \text{WaitPeelsFactorem} + \text{WaitRepossFactorem} + n * \text{odchylkaVrstvysk2} + \text{posuvyPeelsFactorem} + \text{posuvyRepossFactorem} \quad (12)$$

Kde:

- cassk3* [ms] - celkový čas tisku při nastavení parametrů skupiny 1, 2 a 3
- start* [ms] - konstantní čas inicializace tiskárny po spuštění tisku [160 s]
- PromenneVrstvysFactorem* [ms] - součet časů prvních vrstev s proměnným časem a s vlivem faktoru
- VrstvysFactorem* [ms] - celkový čas osvitu vrstev se standardním časem a s vlivem faktoru
- Preruseni* [ms] - součet časů všech přerušení, ke kterým dojde během vytvrzování vrstev s proměnným časem
- WaitPeelsFactorem* [ms] - součet čekacích časů všech pohybů vzhůru pro celý tisk a s vlivem faktoru

$WaitRepossFactorem$ [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů dolů pro celý tisk a s vlivem faktoru
n [-]	- počet vrstev
$odchylkaVrstvysk2$ [ms]	- experimentálně zjištěná odchylka na jednu vrstvu
$posuvyPeelsFactorem$ [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů vzhůru pro celý tisk a s vlivem faktoru
$posuvyRepossFactorem$ [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů dolů pro celý tisk a s vlivem faktoru

Hodnota $IlluminationTimeFactor$ je nastavna na 2 a předpokládá se, že danou hodnotou jsou vynásobeny všechny časy osvitů. Dojde tedy k úpravě vzorců (2) a (3):

$$PromenneVrstvysFactorem := \sum promM \cdot IlluminationTimeFactor = \quad (2a)$$

Kde:

$PromenneVrstvysFactorem$ [ms]	- součet časů prvních vrstev s proměnným časem a s vlivem faktoru
$promM$ [ms]	- časy pro jednotlivé vrstvy
$IlluminationTimeFactor$ [-]	- faktor z .sfb souboru

$$VrstvysFactorem := (n - pocetPromennych) \cdot DobaOsvitu \cdot IlluminationTimeFactor = \quad (3a)$$

Kde:

$VrstvysFactorem$ [ms]	- celkový čas osvitů vrstev se standardním časem a s vlivem faktoru
n [-]	- počet vrstev
$pocetPromennych$ [-]	- počet vrstev s proměnným časem
$DobaOsvitu$ [ms]	- standardní doba osvitů vrstvy
$IlluminationTimeFactor$ [-]	- faktor z .sfb souboru

Stejný princip je aplikován u $PeelOffTimeFactor$ a $PositioningTimeFactor$, kde jsou čekací časy vynásobeny daným faktorem. Dojde k úpravě vzorců (5) a (6):

$$WaitPeelsFactorem := \left(\begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..3 \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + WaitTimeP_i \text{ if } WaitP_i = TRUE \\ 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ s \end{array} \right) \cdot n \cdot PeelOffTimeFactor = \quad (5a)$$

Kde:

$WaitPeelsFactorem$ [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů vzhůru pro celý tisk s vlivem faktoru
--------------------------	---

$WaitTimeP$ [ms]	- hodnota čekacího času po každém pohybu vzhůru
$WaitP$ [-]	- parametr zapínající/vypínající čekací čas po daném pohybu
n [-]	- počet vrstev
$PeelOffTimeFactor$ [-]	- faktor v .sfm souboru

$$WaitRepossFactorem := \left(\begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..3 \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + WaitTimeR_i \text{ if } WaitR_i = TRUE \\ 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ s \end{array} \right) \cdot n \cdot PositioningTimeFactor =$$

(6a)

Kde:

$WaitRepossFactorem$ [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů dolů pro celý tisk
$WaitTimeR$ [ms]	- hodnota čekacího času po každém pohybu dolů
$WaitR$ [-]	- parametr zapínající/vypínající čekací čas po daném pohybu
n [-]	- počet vrstev
$PositioningTimeFactor$ [-]	- faktor v .sfm souboru

Zohledněny jsou také faktory $PeelOffSpeedFactor$ a $PositioningSpeedFactor$. Předpokládá se, že se jedná o faktory ovlivňující rychlost posuvů, proto jsou vzorce (9) a (10) upraveny následovně:

$$posuvyPeelsFactorem := \left[\begin{array}{l} cp \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 2..3 \\ \quad cp \leftarrow cp + \frac{|PositionP_i - PositionP_{i-1}|}{(vPosuv \cdot SpeedFactorP_i \cdot PeelOffSpeedFactor)} \\ \quad cp + \frac{PositionP_1}{(vPosuv \cdot SpeedFactorP_1 \cdot PeelOffSpeedFactor)} \end{array} \right] \cdot n =$$

(9a)

Kde:

$posuvyPeelsFactorem$ [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů vzhůru pro celý tisk s vlivem faktoru
$PositionP$ [mm]	- absolutní hodnota posuvu vzhůru od aktuálně vytvrzované vrstvy
$vPosuv$ [mm/ms]	- experimentálně změřená rychlost posuvu [3,7 mm/s]
$SpeedFactorP$ [-]	- faktor ovlivňující rychlost posuvu vzhůru
n [-]	- počet vrstev
$PeelOffSpeedFactor$ [-]	- faktor v .sfm souboru

$$\text{posuvyRepossFactorem} := \left[\begin{array}{l}
 \text{cp} \leftarrow 0 \\
 \text{for } i \in 2..3 \\
 \quad \text{cp} \leftarrow \text{cp} + \frac{|\text{PositionR}_i - \text{PositionR}_{i-1}|}{(v\text{Posuv} \cdot \text{SpeedFactorR}_i \cdot \text{PositioningSpeedFactor})} \\
 \quad \left[\begin{array}{l}
 \text{PositionR}_i - \text{hladina} \leftarrow \text{PositionP}_3 + \text{TLvrstvy} \text{ if } \text{PositionP}_3 \neq 0 \\
 \quad \text{otherwise} \\
 \quad \quad \text{hladina} \leftarrow \text{PositionP}_2 + \text{TLvrstvy} \text{ if } \text{PositionP}_2 \neq 0 \\
 \quad \quad \quad \text{otherwise} \\
 \quad \quad \quad \quad \text{hladina} \leftarrow \text{PositionP}_1 + \text{TLvrstvy} \text{ if } \text{PositionP}_1 \neq 0 \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \text{hladina} \leftarrow \text{TLvrstvy} \text{ otherwise}
 \end{array} \right] \\
 \text{cp} + \frac{\text{hladina}}{(v\text{Posuv} \cdot \text{SpeedFactorR}_i \cdot \text{PositioningSpeedFactor})}
 \end{array} \right] \cdot n = \tag{10a}$$

Kde:

- posuvyRepossFactorem* [ms] - celkový čas potřebný na vykonání posuvů dolů pro celý tisk s vlivem faktoru
- PositionR* [mm] - absolutní hodnota posuvu dolů od aktuálně vytvrzované vrstvy
- vPosuv* [mm/ms] - experimentálně změřená rychlost posuvu [3,7 mm/s]
- SpeedFactorR* [-] - faktor ovlivňující rychlost posuvu dolů
- n* [-] - počet vrstev
- TLvrstvy* [mm] - tloušťka jedné vrstvy
- PositioningSpeedFactor* [-] - faktor v .sfm souboru

Ověření experimentem

Nejprve je vytvořen soubor .sfb s hodnotou *IlluminationTimeFactor* nastavenou na 2. Všechny ostatní parametry jsou nastaveny na hodnotu 1 a tak, aby do experimentu nebyly vnášeny další neznámé.

Tab. 7 Výsledky pro *IlluminationTimeFactor*

počet vrstev modelu	vypočítaný čas [s]	reálný čas [s]	rozdíl na vrstvu [s]
75	1329	1308	-0,28

Z tabulky je patrné, že odchylka na vrstvu je minimální, a proto lze vzorec považovat za správný.

Další experiment obdobně ověřil vzorec pro *PeelOffTimeFactor*, který opět dle výsledků v tabulce odpovídá realitě.

Tab. 8 Výsledky pro *PeelOffTimeFactor*

počet vrstev modelu	vypočítaný čas [s]	reálný čas [s]	rozdíl na vrstvu [s]
75	1411	1393	-0,24

Dále jsou provedeny dva experimenty na ověření všech parametrů. Byl použit model s 75 vrstvami a model s 749 vrstvami a s různě nastavenými parametry (viz Tab. 9).

Tab. 9 Hodnoty nastavených parametrů pro jednotlivé modely

	model o 75 vrstvách	model o 749 vrstvách
<i>IlluminationTimeFactor</i>	1,5	2
<i>PeelOffSpeedFactor</i>	1	1,2
<i>PositioningSpeedFactor</i>	2	1,4
<i>PeelOffTimeFactor</i>	1,5	1,6
<i>PositioningTimeFactor</i>	2	1,8

Tab. 10 Výsledky pro vzorec (12)

počet vrstev modelu	vypočítaný čas [s]	reálný čas [s]	rozdíl na vrstvu [s]
75	1632	1645	0,173333
749	19230	21960	3,64486

Zejména na modelu s 749 vrstvami je evidentní, že se odchylka razantně zvyšuje. To je způsobeno vlivem *PeelOffSpeedFactor* a *PositioningSpeedFactor*. Ukazuje se, že vzorec nezahrnující tyto dva faktory je výrazně přesnější. Tyto faktory se pravděpodobně vztahují na *ScaleSpeed* a *ScaleDistance*, které nejsou v této práci uvažovány.

Pro další výpočty je tudíž dále používán upravený vzorec (12) bez vlivu *PeelOffSpeedFactor* a *PositioningSpeedFactor*.

$$\begin{aligned}
 CASsk3 = & \text{start} + \text{PromenneVrstvysFactorem} + \text{VrstvysFactorem} + \\
 & \text{Preruseni} + \text{WaitPeelsFactorem} + \text{WaitRepossFactorem} + n * \\
 & \text{odchylkaVrstvysk2} + \text{posuvyPeel} + \text{posuvyRepos}
 \end{aligned}
 \tag{12a}$$

Kde:

<i>CASsk3</i> [ms]	- celkový čas tisku při nastavení parametrů skupiny 1,2,3
<i>start</i> [ms]	- konstantní čas inicializace tiskárny po spuštění tisku [160 s]
<i>PromenneVrstvysFactorem</i> [ms]	- součet časů prvních vrstev s proměnným časem a s vlivem faktoru
<i>VrstvysFactorem</i> [ms]	- celkový čas osvitů vrstev se standardním časem a s vlivem faktoru
<i>Preruseni</i> [ms]	- součet časů všech přerušení, ke kterým dojde během vytváření vrstev s proměnným časem
<i>WaitPeelsFactorem</i> [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů vzhůru pro celý tisk a s vlivem faktoru
<i>WaitRepossFactorem</i> [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů dolů pro celý tisk a s vlivem faktoru

n [-]	- počet vrstev
$odchylkaVrstvysk2$ [ms]	- experimentálně zjištěná odchylka na jednu vrstvu
$posuvyPeel$ [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů vzhůru pro celý tisk
$posuvyRepos$ [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů dolů pro celý tisk

Tab. 11 Výsledky pro vzorec (12a)

počet vrstev modelu	vypočítaný čas [s]	reálný čas [s]	rozdíl na vrstvu [s]
75	1633	1645	0,16
749	21800	21960	0,213618

4.3.5 Analýza a výpočet času tisku s parametry ze skupiny 1, 2, 3 a segmenty

Tiskárna SolFlex 650 dosahuje vyššího rozlišení tisku díky posuvnému projektoru, který tiskovou plochu pomyslně rozdělí na 6 dílů, které jsou osvicovány postupně. To má samozřejmě vliv na dobu tisku.

Do vzorce pro celkový čas je přidána podmínka (P), která v případě, že se model nachází pouze v jednom segmentu, počítá s přerušením dle vzorce (4). Pokud je model ve více segmentech, je uvažována hodnota *PreruseniSegmenty* dle vzorce (15).

Celkový čas se tedy spočítá jako:

$$\begin{aligned}
 CASsegmenty &= start + PromenneVrstvysFactorem * segmenty \\
 &+ VrstvysFactorem * segmenty + posuvyPeel + PosuvyRepos \\
 &+ WaitPeelsFactorem + WaitRepossFactorem + (P) \\
 &+ casyNaPrejezdy + n * odchylkaVrstvysk2
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Kde:

PromenneVrstvysFactorem a *VrstvysFactorem* jsou vynásobeny počtem segmentů, neboť v každém segmentu musí dojít k vytvrzení.

CASsegmenty [ms] - celkový čas tisku při nastavení parametrů skupiny 1, 2, 3 a segmenty

start [ms] - konstantní čas inicializace tiskárny po spuštění tisku [160 s]

PromenneVrstvysFactorem [ms] - součet časů prvních vrstev s proměnným časem a s vlivem faktoru

VrstvysFactorem [ms] - celkový čas osvitů vrstev se standardním časem a s vlivem faktoru

Preruseni [ms] - součet časů všech přerušení, ke kterým dojde během vytvrzování vrstev s proměnným časem

WaitPeelsFactorem [ms] - součet čekacích časů všech pohybů vzhůru pro celý tisk a s vlivem faktoru

WaitRepossFactorem [ms] - součet čekacích časů všech pohybů dolů pro celý tisk a s vlivem faktoru

n [-] - počet vrstev

<i>odchylkaVrstvysk2</i> [ms]	- experimentálně zjištěná odchylka na jednu vrstvu
<i>posuvyPeel</i> [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů vzhůru pro celý tisk
<i>posuvyRepos</i> [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů dolů pro celý tisk
<i>casNaPrejezdy</i> [ms]	- celkový čas potřebný na všechny přejezdy během tisku, kromě přejezdů po přerušení
<i>segmenty</i> [-]	- počet segmentů, do kterých model zasahuje

Čas na přejezd projektoru mezi segmenty je určen na základě jednoduchého experimentu. Je vytvořen model válce, který je jednou umístěn pouze do jednoho segmentu a podruhé umístěn na rozhraní segmentů, tak aby pro jeho vytvrzení muselo dojít k přejezdu projektoru. Rozdíl časů těchto dvou tisků je vydělen počtem přejezdů.

Projektor začíná osvětlovat vždy vrstvu, nad kterou se právě nachází (nepřejíždí do výchozí polohy). Proto lze celkový počet přejezdů resp. čas potřebný na všechny přejezdy spočítat:

$$\text{casNaPrejezdy} := (\text{segmenty} - 1) \cdot \text{casPrejezdu} \cdot (n - \text{pocetPromennych} - 1) = \quad (14)$$

Kde:

<i>casNaPrejezdy</i> [ms]	- celkový čas potřebný na všechny přejezdy během tisku, kromě přejezdů po přerušení
<i>segmenty</i> [-]	- počet segmentů, do kterých model zasahuje
<i>casPrejezdu</i> [ms]	- experimentálně změřený čas potřebný na přejezd projektoru mezi segmenty [1,6 s]
<i>pocetPromennych</i> [-]	- počet vrstev s proměnným časem
<i>n</i> [-]	- počet vrstev

Musí se uvažovat, že pokud je osvit přerušen z důvodu překročení hodnoty *MaxIlluminationTime*, nedochází k čekacímu času *MinIlluminationPause*, ale projektor hned přejede do dalšího segmentu a začne osvětlovat zde.

$$\text{PreruseniSegmenty} := \begin{cases} s \leftarrow 0 & \\ \text{for } x \in 0.. \text{pocetPromennych} - 1 & \\ \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + \text{trunc} \left(\frac{\text{promM}_{0,x}}{\text{MaxIlluminationTime}} \right) \cdot \text{casPrejezdu} \text{ if } \text{promM}_{0,x} > \text{MaxIlluminationTime} \\ 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. & \\ s & \end{cases} = \quad (15)$$

Kde:

<i>PreruseniSegmenty</i> [ms]	- součet časů potřebných na přejezd projektoru po přerušení
-------------------------------	---

<i>pocetPromennych</i> [-]	- počet vrstev s proměnným časem
<i>promM</i> [ms]	- časy pro jednotlivé vrstvy
<i>MaxIlluminationTime</i> [ms]	- maximální dovolený čas osvitu bez přerušení
<i>casPrejezdu</i> [ms]	- experimentálně změřený čas potřebný na přejezd projektoru mezi segmenty [1,6 s]

4.3.6 Analýza a výpočet času tisku s parametry ze skupiny 1, 2, 3, segmenty a scale

Jak bylo zmíněno na začátku kapitoly 4.4, při použití DLP projektoru není čas tisku v principu závislý na velikosti modelu resp. na velikosti plochy vytvrzované vrstvy. Tiskárna SolFlex 650 však může hodnotu plochy uvažovat a na jejím základu upravit rychlosti nebo čekací doby tak, aby byla zvýšena pravděpodobnost úspěšného odtrhu, či zalití celého dna fotopolymérem před dalším osvitem.

V programu SolFlex 650 Control Center lze nastavit hodnoty *None*, *PeelOffValue*, nebo *DisplacementValue* pro *Speed Scale Type*, *Distance Scale Type* a pro *Wait time* u každého pohybu nahoru či dolů. Žádný z experimentálních tisků prováděných na tiskárně SolFlex 650 nevyužívá nastavení *Speed Scale Type* a *Distance Scale Type*. Stejně tak nejsou používány ani ve výchozích souborech *.sfm* a *.sfb* dodaných výrobcem. Proto nebudou v této práci uvažovány. Ze stejných důvodů nebude uvažována hodnota *PeelOffValue* u nastavení *Wait time*.

Výrobce poskytl hrubé informace ke vztahům mezi hodnotou *DisplacementValue* nastavenou pro *Wait time* a dobou osvitu. Samotný parametr *DisplacementValue* říká, že se do vzorce dosazuje plocha, která je od aktuálně vytvrzované plochy vzdálena 1mm. Tato plocha je následně vynásobena hodnotou *DisplacementValueDecay* ze souboru *.sfm* a porovnána s velikostí plochy aktuálně vytvrzené vrstvy. Pokud je hodnota velikosti plochy vzdálené 1mm po vynásobení koeficientem menší, je uvažována tato plocha. Pokud tomu tak není, uvažuje se plocha aktuálně vytvrzovaná, tak aby koeficient násobící čekací čas byl co největší.

Tato funkce částečně řeší nepřesnosti, které by mohly vznikat u modelů, kde se skokově mění plochy průřezů.

Pro získání hodnoty velikosti plochy dané vrstvy je vytvořen skript v Matlabu (viz. příloha 4), který do tabulky v Excelu exportuje počet bílých pixelů pro každou vrstvu.

Na tomto základu jsou vytvořeny vzorce upravující hodnoty čekacích časů, tedy rovnice (5b) a (6b) v příloze 2.

Celkový čas pro všech pět skupin se tudíž vypočte podle vzorce (13) s nahrazením *WaitPeelsFactorem* a *WaitRepossFactorem* za *WaitPeelsFactoremaScale* a *WaitRepossFactoremaScale* dle vzorců (5b) a (6b) v příloze 2.

$$\begin{aligned}
 \text{CASscale} = & \text{start} + \text{PromenneVrstvysFactorem} * \text{segmenty} + \\
 & \text{VrstvysFactorem} * \text{segmenty} + \text{posuvyPeel} + \text{PosuvyRepos} + \\
 & \text{WaitPeelsFactoremaScale} + \text{WaitRepossFactoremaScale} + (P) + \\
 & \text{casyNaPrejezdy} + n * \text{oschylkaVrstvysk2t}
 \end{aligned}
 \tag{13a}$$

Kde:

$PromenneVrstvysFactorem$ a $VrstvysFactorem$ jsou vynásobeny počtem segmentů, neboť v každém segmentu musí dojít k vytvrzení.

$CASscale$ [ms]	- celkový čas tisku při nastavení parametrů skupiny 1, 2, 3, segmenty a scale
$start$ [ms]	- konstantní čas inicializace tiskárny po spuštění tisku [160 s]
$PromenneVrstvysFactorem$ [ms]	- součet časů prvních vrstev s proměnným časem a s vlivem faktoru
$VrstvysFactorem$ [ms]	- celkový čas osvitů vrstev se standardním časem a s vlivem faktoru
$Preruseni$ [ms]	- součet časů všech přerušení, ke kterým dojde během vytvrzování vrstev s proměnným časem
$WaitPeelsFactoremaScale$ [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů vzhůru pro celý tisk a s vlivem faktoru a velikosti plochy [vzorec (5b) v příloze 2]
$WaitRepossFactoremaScale$ [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů dolů pro celý tisk a s vlivem faktoru a velikosti plochy [vzorec (6b) v příloze 2]
n [-]	- počet vrstev
$odchylkaVrstvysk2$ [ms]	- experimentálně zjištěná odchylka na jednu vrstvu
$posuvyPeel$ [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů vzhůru pro celý tisk
$posuvyRepos$ [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů dolů pro celý tisk
$casNaPrejezdy$ [ms]	- celkový čas potřebný na všechny přejezdy během tisku, kromě přejezdů po přerušení
$segmenty$ [-]	- počet segmentů, do kterých model zasahuje

Ověření experimentem

Jsou provedeny 3 rozdílné tisky s parametry zahrnujícími hodnoty $DisplacementValueDecay$. Výsledky jsou zaneseny do tabulek (Tab. 12 – 14).

Tab. 12 Výsledky 1 pro vzorec (13a)

Tisk 1 pro sk. scale				
	počet vrstev modelu	vypočítaný čas [s]	reálný čas [s]	rozdíl na vrstvu [s]
podle vzorce (15)	224	4474	5565	4,870536
podle vzorce (15a)	224	5012	5565	2,46875

Tab. 13 Výsledky 2 pro vzorec (13a)

Tisk 2 pro sk. scale				
	počet vrstev modelu	vypočítaný čas [s]	reálný čas [s]	rozdíl na vrstvu [s]
podle vzorce (15)	190	4066	6410	12,33684
podle vzorce (15a)	190	5039	6410	7,215789

Tab. 14 Výsledky 3 pro vzorec (13a)

Tisk 3 pro sk. scale				
	počet vrstev modelu	vypočítaný čas [s]	reálný čas [s]	rozdíl na vrstvu [s]
podle vzorce (15)	749	16840	13110	-4,97997
podle vzorce (15a)	749	17010	13110	-5,20694

Z výsledků lze konstatovat, že vzorec (13a) neodpovídá realitě a v případě tisku *Tisk 3 pro scale* je výsledek dokonce horší než s použitím vzorce (13). S informacemi, které jsou od výrobce k dispozici nelze nalézt vztah, dle kterého by bylo možné určit výsledný čas. Chybí elementární informace o principu, s jakým tiskárna posuzuje velikost plochy a jaké parametry a za jakých podmínek do vzorce vstupují.

4.3.7 Návrh experimentu pro ověření konečného vzorce

Pro ověření správnosti vzorce budou provedeny 3 tisky, s různými modely, velikostmi modelů a s různým umístěním modelu na platformě, včetně obsazení více segmentů. V souborech .sfm a .sfb budou nastaveny různé parametry (viz. příloha 6).

Vzorec pro celkovou dobu trvání tisku vychází ze vzorce (13) a jeho části jsou rozepsány v souboru .xmcd v příloze 3.

$$\begin{aligned}
 CAS = & \text{start} + \text{PromenneVrstvysFactorem} * \text{segmenty} + \text{VrstvysFactorem} \\
 & * \text{segmenty} + \text{posuvyPeel} + \text{PosuvyRepos} + \text{WaitPeelsFactorem} \\
 & + \text{WaitRepossFactorem} + (P) + \text{casyNaPrejezdy} + n \\
 & * \text{oschylkaVrstvysk2}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Kde:

PromenneVrstvysFactorem a *VrstvysFactorem* jsou vynásobeny počtem segmentů, neboť v každém segmentu musí dojít k vytvrzení.

CAS [ms] - celkový čas tisku při nastavení parametrů skupiny 1, 2, 3 a segmenty

start [ms] - konstantní čas inicializace tiskárny po spuštění tisku [160 s]

PromenneVrstvysFactorem [ms] - součet časů prvních vrstev s proměnným časem a s vlivem faktoru

VrstvysFactorem [ms] - celkový čas osvětlení vrstev se standardním časem a s vlivem faktoru

<i>Preruseni</i> [ms]	- součet časů všech přerušení, ke kterým dojde během vytvrzování vrstev s proměnným časem
<i>WaitPeelsFactorem</i> [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů vzhůru pro celý tisk a s vlivem faktoru
<i>WaitRepossFactorem</i> [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů dolů pro celý tisk a s vlivem faktoru
<i>n</i> [-]	- počet vrstev
<i>odchylkaVrstvysk2</i> [ms]	- experimentálně zjištěná odchylka na jednu vrstvu
<i>posuvyPeel</i> [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů vzhůru pro celý tisk
<i>posuvyRepos</i> [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů dolů pro celý tisk
<i>casyNaPrejezdy</i> [ms]	- celkový čas potřebný na všechny přejezdy během tisku, kromě přejezdů po přerušení
<i>segmenty</i> [-]	- počet segmentů, do kterých model zasahuje

5 VÝSLEDKY

5.1 Nalezení materiálového profilu

Byla provedena celkem tři měření na třech po sobě vytisknutých vzorcích (viz. Obr. 15). Během oddělování vytvrzeného vzorku od dna nádoby a také během následného postprocessingu (zejména ultrazvukového čištění) se některá kolečka prothla a nebylo možné je změřit, proto jsou tyto hodnoty vynechané. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky (Tab. 15).



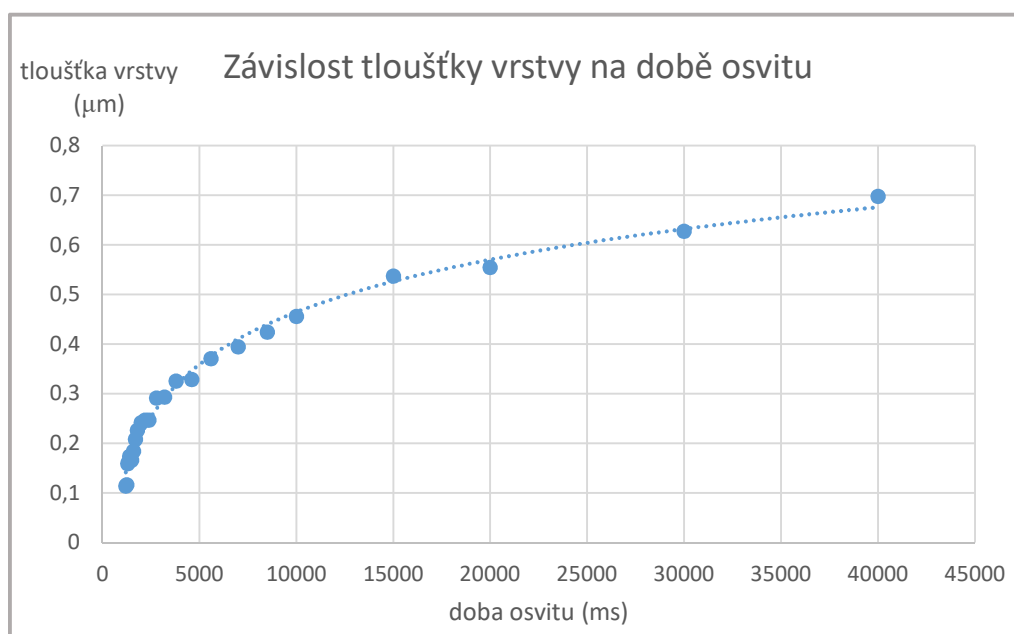
Obr. 15 Vzorky pro měření materiálového profilu

Tab. 15 Hodnoty tloušťky vrstvy v závislosti na době osvětlení

číslo měření	doba osvětlení (ms)	tloušťka vrstvy (mm)			průměr (mm)
		vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	
1	1200		0,114		0,114
2	1250	0,098	0,136		0,117
3	1300	0,13	0,163	0,185	0,159333333
4	1350		0,142	0,184	0,163
5	1400		0,17	0,179	0,1745
6	1500	0,128	0,149	0,223	0,166666667
7	1600	0,168	0,194	0,192	0,184666667
8	1700	0,199	0,205	0,221	0,208333333
9	1800	0,215	0,224	0,24	0,226333333
10	2000	0,228	0,241	0,256	0,241666667
11	2200	0,254	0,236	0,252	0,247333333
12	2400	0,214	0,234	0,293	0,247
13	2800	0,262	0,345	0,267	0,291333333

14	3200	0,284	0,327	0,269	0,293333333
15	3800	0,306	0,347	0,324	0,325666667
16	4600	0,319	0,348	0,321	0,329333333
17	5600	0,36	0,366	0,386	0,370666667
18	7000	0,382	0,406	0,396	0,394666667
19	8500	0,408	0,487	0,379	0,424666667
20	10000	0,442	0,503	0,424	0,456333333
21	15000	0,504	0,572	0,536	0,537333333
22	20000	0,533	0,599	0,533	0,555
23	30000	0,615	0,649	0,62	0,628
24	40000	0,655	0,704	0,736	0,698333333

Z těchto naměřených hodnot byl vypočten průměr, který byl zanesen do grafu (viz. Obr. 16).



Obr. 16 Graf závislosti tloušťky vrstvy na době osvitů

Z grafu je patrné, že s dobou osvitů roste i tloušťka vzniklé vrstvy. Nejlepší aproximací vzniklého materiálového profilu je logaritmická křivka:

$$y = 0,1523 \ln(x) - 0,938$$

(17)

5.2 Zjištění času tisku

Postupně byly zjištěny časy jednotlivých tisků a na jejich základě stanoveny konstanty (viz. Tab. 16).

Tab. 16 Stanovené konstanty

konstanta	hodnota	popis
start	160 s	Čas přípravy tisku po spuštění
odchylkaVrstvysk1	2600 ms	Odchylka vztažená na jednu vrstvu
vPosuv	3,7 mm/s	Rychlost pohybu platformy
casPrejezdu	1,6 s	Čas přejezdu projektoru mezi jednotlivými segmenty

Posuvy platformy byly dále kompenzovány dle vzorce (10), který rozšířil konstantu *odchylkaVrstvysk1*.

$$\text{odchylkaVrstvysk2} := \text{odchylkaVrstvysk1} + \frac{75s}{n} \quad (10)$$

Kde:

- odchylkaVrstvysk2* [ms] - experimentálně zjištěná odchylka na jednu vrstvu
odchylkaVrstvysk1 [ms] - experimentálně zjištěná odchylka na jednu vrstvu pro vzorec zahrnující parametry ze skupiny 1
n [-] - počet vrstev

Při použití těchto konstant a vztahů nebyla překročena odchylka odhadu o více jak 6 %. Postupně byl vytvořen vzorec, který zahrnuje všechny parametry ze skupin 1, 2, 3 a segmenty, díky kterému je možné spočítat celkový čas tisku. Jedná se o vzorec (16), jehož části jsou rozepsány v souboru .xmsd v příloze 3.

$$\begin{aligned} \text{CAS} = & \text{start} + \text{PromenneVrstvysFactorem} * \text{segmenty} + \text{VrstvysFactorem} \\ & * \text{segmenty} + \text{posuvyPeel} + \text{PosuvyRepos} \\ & + \text{WaitPeelsFactorem} + \text{WaitRepossFactorem} + (\text{P}) \\ & + \text{casyNaPrejezdy} + n * \text{oschylkaVrstvysk2} \end{aligned} \quad (16)$$

Kde:

PromenneVrstvysFactorem a *VrstvysFactorem* jsou vynásobeny počtem segmentů, neboť v každém segmentu musí dojít k vytvrzení.

- CAS* [ms] - celkový čas tisku při nastavení parametrů skupiny 1, 2, 3 a segmenty
start [ms] - konstantní čas inicializace tiskárny po spuštění tisku [160 s]
PromenneVrstvysFactorem [ms] - součet časů prvních vrstev s proměnným časem a s vlivem faktoru
VrstvysFactorem [ms] - celkový čas osvitů vrstev se standardním časem a s vlivem faktoru
Preruseni [ms] - součet časů všech přerušení, ke kterým dojde během vytvrzování vrstev s proměnným časem

<i>WaitPeelsFactorem</i> [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů vzhůru pro celý tisk a s vlivem faktoru
<i>WaitRepossFactorem</i> [ms]	- součet čekacích časů všech pohybů dolů pro celý tisk a s vlivem faktoru
<i>n</i> [-]	- počet vrstev
<i>odchylkaVrstvysk2</i> [ms]	- experimentálně zjištěná odchylka na jednu vrstvu
<i>posuvyPeel</i> [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů vzhůru pro celý tisk
<i>posuvyRepos</i> [ms]	- celkový čas potřebný na vykonání posuvů dolů pro celý tisk
<i>casyNaPrejezdy</i> [ms]	- celkový čas potřebný na všechny přejezdy během tisku, kromě přejezdů po přerušení
<i>segmenty</i> [-]	- počet segmentů, do kterých model zasahuje

Správnost vzorce byla ověřena na 3 různých modelech, různě umístěných na platformu s odlišným nastavením parametrů.

Tab. 17 Výsledky 1 pro vzorec (16)

vysl_tisk1 (příloha 6)				
počet vrstev modelu	vypočítaný čas [s]	reálný čas [s]	rozdíl na vrstvu [s]	celková odchylka [%]
430	5100	4850	0,581395	5,154639

Tab. 18 Výsledky 2 pro vzorec (16)

vysl_tisk2 (příloha 6)				
počet vrstev modelu	vypočítaný čas [s]	reálný čas [s]	rozdíl na vrstvu [s]	celková odchylka [%]
129	3122	3052	0,542636	2,293578

Tab. 19 Výsledky 3 pro vzorec (16)

vysl_tisk3 (příloha 6)				
počet vrstev modelu	vypočítaný čas [s]	reálný čas [s]	rozdíl na vrstvu [s]	celková odchylka [%]
224	4474	4576	-0,45536	2,229021

Odchylky do 6% opět potvrzují správnost vzorce, který může být pro tyto parametry používán.

6 DISKUZE

Určení materiálového profilu bylo provedeno dle doporučení výrobce. Na základě předchozích měření a vzorků poskytnutých výrobcem byl vytvořen vzorek nový, který umožňoval provést měření o dvojnásobném počtu dat, tudíž bylo celé měření výrazně zpřesněno. Podařilo se změřit tloušťky i velmi tenkých vrstev, které byly osvicovány po minimální nutnou dobu. Jen některé z těchto vrstev se během manipulace poškodily a nebylo možné jejich hodnoty zaneść do grafu. Drobné odchylky byly způsobeny především tím, že se tenké vytvrzené vrstvy deformovaly (zkroutily) a bylo obtížné odhadnout utahovací moment na mikrometru tak, aby se tato deformace překonala, ale zároveň se nezvětřovala plastická deformace samotného materiálu.

Podařilo se tedy získat velmi široký rozsah osvitů, který velmi dobře a přesně charakterizuje zkoumaný materiál DETAX, šedý a může být použit v dalších měřeních a experimentech (viz. str. 47 Obr. 16).

Výrobce dále doporučuje, vynásobit získané hodnoty osvitu koeficientem 1,2 až 1,8. To umožní spojení dvou na sobě vytvrzených vrstev při tisku a zajistí přesný a bezproblémový tisk.

Pro výpočet délky trvání tisku bylo dosaženo vzorce (16), který zahrnuje parametry ze skupiny 1, 2, 3 a segmenty (dle tabulek v příloze 1). Přesnost tohoto vzorce se pohybuje okolo 95 %, což je velmi dobrý výsledek. Odchylky na vrstvu jsou maximálně okolo 0,5 s. Tyto odchylky jsou způsobeny mírnou nepřesností konstant, jako je doba počáteční inicializace nebo rychlost posuvu platformy. Takto malé odchylky mohou být ale způsobeny i výpočtovými procesy přístroje, které nelze přesně definovat.

Na základě velmi omezených informací poskytnutých výrobcem byl vytvořen vzorec (15a) zahrnující do celkového času tisku i parametry operující s velikostí plochy vytvrzované vrstvy. Jedná se zejména o změnu čekacích časů po pohybu platformy. Nepodařilo se však nalézt dostatečně přesný vztah, který by odpovídal reálným časům tisku. Proto je používán vzorec (16), nezahrnující velikosti plochy do celkového času. Při nastavení parametrů ovlivněných velikostí plochy tak může docházet k odchylkám větším než 6 %.

7 ZÁVĚR

V první části práce byla určena závislost mezi dobou osvitů a tloušťkou vytvrzené vrstvy neboli materiálový profil pro materiál DETAX, šedý, který dále sloužil pro vhodné nastavení parametrů tisku.

Byly identifikovány parametry ovlivňující délku trvání tisku, přehledně vyneseny do tabulky a popsány. Poté byly systematicky a postupně hledány vztahy mezi těmito parametry a dobou tisku. Byly navrženy a realizovány experimenty pro získání hodnot referenčních vlastností tiskárny, jako jsou rychlost posuvu v ose z či rychlost přejezdu DLP projektoru mezi jednotlivými segmenty. Na základě těchto hodnot, parametrů a dílčích vztahů byl sestaven vzorec pro výpočet celkové délky trvání tisku včetně zohlednění počtu segmentů, do kterých tisknutý model zasahuje. Oproti prvotním předpokladům nebylo možné zjistit vztah pro parametry, které jsou ovlivněny velikostí modelu resp. velikostí vytvrzované plochy.

Nejvýraznějším přínosem této práce je možnost zjištění času tisku ještě před spuštěním, což samotná tiskárna vůbec neumožňuje. To samozřejmě zefektivní a zpříjemní práci, nehledě na to, že v komerční sféře toto umožní rychlejší a přesnější nacenění objednávek.

Pro další výzkum může být velmi užitečná možnost „rozložení si“ celkového času tisku na časy pohybů, osvitů nebo dalších. To umožní přesnější a názornější analýzu nastavení tisku.

Navázání na tuto práci by bylo možné jednak rozšířením vzorce i na parametry ovlivněné velikostí modelu, za druhé skrze zkracování délky trvání tisku právě na základě vzorce vytvořeného v této práci. Ale také zjednodušením vkládání parametrů do vzorce a celkovým automatizováním procesu, tak aby bylo možné analyzovat více tisků a tím ještě zvyšovat přesnost odhadu, která se nyní pohybuje okolo 95%.

Cíl práce, kterým bylo nalezení vztahů mezi parametry a délkou trvání tisku, byl tedy splněn a nad jeho rámec bylo provedeno určení materiálového profilu DETAX, šedý.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HULL, Charles W. Apparatus For Production Of Three-dimensional Objects By Stereolithography. USA. US4575330A. Uděleno 11.3. 1986.
- [2] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. Second edition. New York: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.
- [3] RENAP, K. a J.P. KRUTH. Recoating issues in stereolithography. Rapid Prototyping Journal. 1995, 1(3), 4-16. DOI: 10.1108/13552549510094223. ISSN 1355-2546. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/13552549510094223>
- [4] Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing [online]. Munich: Carl Hanser Verlag GmbH & Co., 2016 [cit. 2017-04-29]. ISBN 978-1-56990-583-8. Dostupné z: 10.3139/9781569905838
- [5] PEML, Luboš. Návrh a realizace 3D tiskárny s vysokým rozlišením tisku [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/32453>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Daniel Dušek.
- [6] Custompart.net [online]. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- [7] KOVALENKO, Iaroslav, Maryna GARAN, Andrii SHYNKARENKO, et al. Examining the Relationship between Forces During Stereolithography 3D Printing and Geometric Parameters of the Model. MATEC Web of Conferences [online]. 2016, 40, 02005- [cit. 2017-04-29]. DOI: 10.1051/mateconf/20164002005. ISSN 2261-236x. Dostupné z: <http://www.matec-conferences.org/10.1051/mateconf/20164002005>
- [8] PAN, Yayue, Chi ZHOU a Yong CHEN. A Fast Mask Projection Stereolithography Process for Fabricating Digital Models in Minutes. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME [online]. 2012, (5) [cit. 2017-04-29]. DOI: 10.1115/1.4007465. ISBN 10.1115/1.4007465. Dostupné z: <http://ManufacturingScience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1484473>
- [9] GONG, Hua, Michael BEAUCHAMP, Steven PERRY, Adam T. WOOLLEY a Gregory P. NORDIN. Optical approach to resin formulation for 3D printed microfluidics. RSC Advances. 2015, (129). DOI: 10.1039/C5RA23855B. ISBN 10.1039/C5RA23855B. Dostupné také z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5RA23855B>

- [10] Formlabs [online]. Somerville, MA: Formlabs [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <https://formlabs.com/>
- [11] HON, K.K.B., C. HAN a S.P. EDWARDSON. Investigations on New Scanning Pattern for Stereolithography. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2006, 55(1), 217-220. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60402-8. ISSN 00078506. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607604028>
- [12] JACOBS, Paul F. a David T. REID. Rapid prototyping: fundamentals of stereolithography. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers in cooperation with the Computer and Automated Systems Association of SME, c1992. ISBN 978-0872634251.
- [13] BÁRTOLO, Paulo. Stereolithography: materials, processes and applications. New York: Springer, 2011. ISBN 978-0-387-92904-0.
- [14] TANG, Yanyan. Stereolithography Cure Process Modeling. Georgia Institute of Technology, 2005.
- [15] BÁRTOLO, Paulo. Thermo-kinetic curing model for stereolithographic applications. *AIP Conference Proceedings* [online]. 2012, , 1579-1583 [cit. 2017-04-29]. DOI: 10.1063/1.4756466. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4756466>
- [16] Encyklopedie fyziky: DLP projektory. *Fyzika.jreichl.com* [online]. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1566-dlp-projektory>
- [17] Formlabs: 3D Printing Technology Comparison: SLA vs. DLP. *Formlabs.com* [online]. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/>
- [18] ZHOU, Chi, Hang YE a Feng ZHANG. A Novel Low-Cost Stereolithography Process Based on Vector Scanning and Mask Projection for High-Accuracy, High-Speed, High-Throughput and Large-Area Fabrication. *ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conferenc*. 2014, (34), 17-20. DOI: 10.1115/DETC2014-35384. ISBN 10.1115/DETC2014-35384. Dostupné také z: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/DETC2014-35384>
- [19] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [20] 1 Year, 9 Resins: Behind the Scenes with Formlabs Materials Scientists. *Formlabs.com* [online]. Somerville, MA: Formlabs [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/behind-the-scenes-with-formlabs-materials-scientists/>

- [21] INFOGALACTIC: THE PLANETARY KNOWLEDGE CORE CONTRIBUTORS. Photopolymer. In: Infogalactic.com [online]. Infogalactic: the planetary knowledge core, 2016 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <https://infogalactic.com/info/Photopolymer>
- [22] Post-Curing Prints. Formlabs [online]. Someville, MA: Formlabs, 2016 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <https://support.formlabs.com/hc/en-us/articles/115000024604>
- [23] Way2production [online]. Austria: Way2production, 2015 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://www.way2production.com/>
- [24] Next-generation LumiBright 3300B UV-LED Illuminators for DLP Applications. Printingnews [online]. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://www.printingnews.com/product/12156048/innovations-in-optics-uv-led-illuminators-for-dlp-applications>
- [25] User's Guide: Mathcad 14.0. February 2007. 140 Kendrick Street, Needham, MA 02494 USA: Parametric Technology Corporation, 2007.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>DLP</i>	- Digital Light Processing
<i>FDM</i>	- Fused Deposition Modeling
<i>SLS</i>	- Selective Laser Sintering
<i>EBM</i>	- Electronic Beam Melting
<i>SLA (SL)</i>	- Stereolitografie, stereolitografický 3D tisk
<i>UV</i>	- Ultrafialové záření
<i>DOC</i>	- Degree of Cure
<i>LCD</i>	- Liquid Crystal Display
<i>DMD</i>	- Digital Micromirror Device
<i>IPA</i>	- Izopropylalkohol
<i>STL</i>	- Formát souborů pro 3D tisk
<i>SLC</i>	- Formát souborů pro 3D tisk
<i>MP</i>	- Soubor materiálového profilu .sfm
<i>BS</i>	- Soubor build style, tiskového profilu formátu .sfb
<i>ID</i>	- Identifikační číslo souboru
\parallel	- Oblast programu
Σ	- Suma všech prvků vektoru/matice
$:=$	- Přiřazovací rovnítko
$=$	- Rovnítko pro výpis hodnoty
$x..y$	- Celá čísla od x do y s krokem 1
\leftarrow	- Lokální (programovací) definice
<i>Round</i>	- Zaokrouhlí na celá čísla
<i>Trunc</i>	- Zaokrouhlí dolů na celá čísla
<i>Max</i>	- Porovná a vyhodnotí nejvyšší hodnotu
<i>Min</i>	- Porovná a vyhodnotí nejnižší hodnotu

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A GRAFŮ

- Obr. 1** Model konstrukce s horním osvitem [6]
- Obr. 2** Grafické porovnání osvitu laserem (vlevo) a DLP projektorem (vpravo) [10]
- Obr. 3** Mechanismus a princip scanneru [4]
- Obr. 4** Schématické znázornění vzoru vykreslování laserového paprsku STAR-Weave [4].
- Obr. 5** Schéma DLP projektoru [16]
- Obr. 6** Rozdíl mezi laserem a DLP projektorem [17]
- Obr. 7** Schématické znázornění makromolekul: a) lineární, b) rozvětvený, c) sesíťovaný [19]
- Obr. 8** Průběh radikálové polymerace [21]
- Obr. 9** Znázornění vytvrzení fotopolymeru UV zářením [21]
- Obr. 10** Tiskárna SolFlex 650 [23]
- Obr. 11** Prostředí programu Solflex Control Center
- Obr. 12** Základní nastavení materiálového profilu
- Obr. 13** Barevný indikátor umístění objektu na platformě
- Obr. 14** Náhled části .png souborů
- Obr. 15** Vzorky pro měření materiálového profilu
- Obr. 16** Graf závislosti tloušťky vrstvy na době osvitu

SEZNAM TABULEK

- Tab. 1** Technické parametry tiskárny SolFlex 650 [23]
- Tab. 2** Rozřazení parametrů do skupin
- Tab. 3** Výsledky při použití vzorce (1)
- Tab. 4** Výsledky při použití vzorce (7)
- Tab. 5** Výsledky při uvažování posuvů
- Tab. 6** Výsledky při použití vzorce (8)
- Tab. 7** Výsledky pro IlluminationTimeFactor
- Tab. 8** Výsledky pro PeelOffTimeFactor
- Tab. 9** Hodnoty nastavených parametrů pro jednotlivé modely
- Tab. 10** Výsledky pro vzorec (12)
- Tab. 11** Výsledky pro vzorec (12a)
- Tab. 12** Výsledky 1 pro vzorec (13a)
- Tab. 13** Výsledky 2 pro vzorec (13a)
- Tab. 14** Výsledky 3 pro vzorec (13a)
- Tab. 15** Hodnoty tloušťky vrstvy v závislosti na době osvitů
- Tab. 16** Stanovené konstanty
- Tab. 17** Výsledky 1 pro vzorec (16)
- Tab. 18** Výsledky 2 pro vzorec (16)
- Tab. 19** Výsledky 3 pro vzorec (16)

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Tabulky s identifikovanými parametry tisku a jejich vlivem na dobu trvání tisku

Příloha 2 Vzorce (5b) a (6b)

Příloha 3 Vzorec (16) pro výpočet celkové doby trvání tisku

Příloha 4 Skript vytvořený v Matlabu pro výpočet plochy jednotlivých vrstev

Příloha 5 Jobfile použitý při měření materiálového profilu

Příloha 6 Jobfiles použité k ověření vzorce (16) pro výpočet celkové doby trvání tisku

PŘÍLOHA 1

Tabulky s identifikovanými parametry a jejich vlivem na dobu trvání tisku.

.ZIP

Označení	Parametr	Popis	Vliv na dobu tisku	Skupina
n	Počet vrstev	Je roven počtu .png souborů	ANO	1
segmenty	Počet segmentů	Počet segmentů do kterých model zasahuje	ANO	segmenty
plocha	Vytvrzovaná plocha dané vrstvy	Počet bílých pixelů v daném .png souboru	ANO	scale

.SFB

Kategorie	Parametr	Popis	Možné hodnoty	Vliv na dobu tisku	Skupina
PeelOffCoordinates	IlluminationPowerFactor	Intenzita osvitu.	(0,2)	NE	x
	IlluminationTimeFactor	Koeficient násobící hodnoty času osvitu.	(0,2)	ANO	3
	BurnInFactor	<i>Nepodařilo se zjišťit u výrobce. Vliv na dobu tisku byl experimentálně ověřen a následně vyloučen.</i>		NE	x
	BurnInDistanceFactor		NE	x	
	BurnInAdditionalHeight		NE	x	
	SeamingFactor		NE	x	
	Position		Hodnota překryvu jednotlivých segmentů.	(0,2)	NE
	SpeedFactor	Hodnota pozice odjezdu od nulové hladiny.	posun v mm	ANO	2
	Wait	Koeficient násobící rychlost posuvu vzhůru v ose z.	(0,2)	ANO	3
	ScaleSpeed	Rozhoduje o tom, jestli po vykonání pohybu nastane čekací doba.	True/False	ANO	1
	ScaleDistance	Upravuje rychlost pohybu podle velikosti plochy.	none/PeelOffValue/DisplacementValue	zanedbatelný	x
		Upravuje vzdálenost odjezdu podle velikosti plochy.	none/PeelOffValue/DisplacementValue	zanedbatelný	x
		Čas čekání po provedení pohybu.	hodnota v ms	ANO	1
	Čas čekání v závislosti na ploše.	none/PeelOffValue/DisplacementValue	ANO	scale	
RepositioningCoordinates	Position	Hodnota pozice příjezdu.	posun v mm	ANO	2
	SpeedFactor	Rychlost posuvu ndolů v ose z.	(0,2)	ANO	3
	Wait	Rozhoduje o tom, jestli po vykonání pohybu nastane čekací doba.	True/False	ANO	1
	ScaleSpeed	Upravuje rychlost pohybu podle velikosti plochy.	none/PeelOffValue/DisplacementValue	zanedbatelný	x
	ScaleDistance	Upravuje vzdálenost odjezdu podle velikosti plochy.	none/PeelOffValue/DisplacementValue	zanedbatelný	x
	WaitTime	Čas čekání po provedení pohybu	hodnota v ms	ANO	1
	ScaleWaitTime	Čas čekání v závislosti na ploše	none/PeelOffValue/DisplacementValue	ANO	scale

.SFM

Kategorie	Parametr	Popis	Možné hodnoty	Vliv na dobu tisku	Skupina
	Offset	Kompence smrštění v xy	hodnota v µm	NE	x
	Shrinkage	Kompence smrštění v z	(0,2)	NE	x
	PeelOffSpeedFactor	Koeficient upravující ScaleSpeed	(0,2)	ANO	3
	PositioningSpeedFactor	Koeficient upravující ScaleDistance	(0,2)	ANO	3
	PeelOffTimeFactor	Koeficient násobící čekací čas po posunu vzhůru.	(0,2)	ANO	3
	PositioningTimeFactor	Koeficient násobící čekací čas po posunu dolů.	(0,2)	ANO	3
Illumination Data	Item1 (tloušťka vrstvy)	Výška jedné vrstvy.	hodnota v µm	ANO	1
	Item1 (doba osvitu)	Doba po kterou je vrsta osvicována.	hodnota v ms	ANO	1
	IlluminationPowerFactor	Koeficient násobící intenzitu osvitu.	(0,2)	NE	x
	MaxIlluminationTime	Maximální doba osvitu bez přerušení.	hodnota v ms	ANO	1
	MinIlluminationPause	Minimální čekací čas po překonání MaxIlluminationTime.	hodnota v ms	ANO	1
	SeamingAreaFactor	Koeficient hodnoty přesvícení jednotlivých segmentů.	(0,2)	NE	x
	DisplacementValueDecay	Koeficient upravující další parametry v závislosti na velikosti plochy posunutě o 1mm od aktuálně vytvářované.	(0,2)	ANO	scale

PŘÍLOHA 2

Vzorce (5b) a (6b).

$$\begin{aligned}
 & \text{WaitPeelsFactoremaScale} := p \leftarrow 0 \\
 & \text{for } x \in 40..n+39 \\
 & \quad s \leftarrow 0 \\
 & \quad \text{for } i \in 1..3 \\
 & \quad \quad s \leftarrow s + \text{WaitTimeP}_i \\
 & \quad \quad \left[\max \left[1 + \frac{\text{ValueDecay} \cdot \text{SS}(\text{plocha})}{x-40 - \text{round} \left[\frac{1}{\text{TLvrstvy}} \left(\frac{1 \text{mm}}{\text{TLvrstvy}} \right) \right] \text{segmenty}} \right] \right. \\
 & \quad \quad \quad \left. \left[1 \text{ otherwise} \right] \right] \\
 & \quad \quad \left[1 + \frac{\text{SS}(\text{plocha})}{x-40} \right] \text{segmenty} \\
 & \quad \quad \text{if } \text{ScaleWaitTimeP}_i = \text{DECAY} \\
 & \quad \quad \left. \right] \cdot (\text{PeelOffTimeFactor}) \\
 & =
 \end{aligned}
 \tag{5b}$$

Kde:

WaitPeelsFactoremaScale [ms]

WaitTimeP [ms]

n [-]

PeelOffTimeFactor [-]

ValueDecay [-]

SS [-]

plocha [px]

TLvrstvy [mm]

segmenty [-]

ScaleWaitTimeP [-]

- součet čekacích časů všech pohybů vzhůru pro celý tisk s vlivem faktoru a scale
- hodnota čekacího času po každém pohybu vzhůru
- počet vrstev
- faktor v .sfm souboru
- hodnotar v .sfm souboru
- převádí plochu udávanou v pixelech na mm² [0,0025]
- počet bílých pixelů v dané vrstvě
- tloušťka jedné vrstvy
- počet segmentů do kterých model zasahuje
- zapíná/vypíná funkci vlivu plochy na parametry při posuvu vzhůru

$$\text{WaitRepossFactoremaScale} := \left[\begin{array}{l} p \leftarrow 0 \\ \text{for } x \in 40 \dots n + 39 \\ p \leftarrow p + \left[\begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1 \dots 3 \\ s \leftarrow s + \text{WaitTimeR}_i \cdot \left[\begin{array}{l} \max \left[1 + \left[\begin{array}{l} \text{ValueDecay} \cdot SS \cdot (\text{plocha}) \\ x-40 - \text{round} \left[\frac{1}{TL\text{vrstvy}} \right] \text{ if } (x-40) > \left(\frac{1 \text{mm}}{TL\text{vrstvy}} - 40 \right) \\ 0 \end{array} \right] \\ \text{segmenty} \end{array} \right] \\ 1 \text{ otherwise} \end{array} \right] \cdot 1 + \left[\begin{array}{l} SS \cdot (\text{plocha}) \cdot x - 40 \cdot 0 \\ \text{segmenty} \end{array} \right] \\ \text{if ScaleWaitTimeR}_i = \text{DECAY} \end{array} \right] \cdot (\text{PositioningTimeFactor}) \end{array} \right] \quad (6b)$$

Kde:

WaitRepossFactoremaScale [ms]

WaitTimeR [ms]

n [-]

PositioningTimeFactor [-]

ValueDecay [-]

SS [-]

plocha [px]

TLvrstvy [mm]

segmenty [-]

ScaleWaitTimeR [-]

- součet čekacích časů všech pohybů dolů pro celý tisk s vlivem faktoru a scale

- hodnota čekacího času po každém pohybu dolů

- počet vrstev

- faktor v .sfm souboru

- hodnotar v .sfm souboru

- převádí plochu udávanou v pixelech na mm² [0,0025]

- počet bílých pixelů v dané vrstvě

- tloušťka jedné vrstvy

- počet segmentů do kterých model zasahuje

- zapíná/vypíná funkci vlivu plochy na parametry při posuvu dolů