



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VYUŽITÍ ADITIVNÍ TECHNOLOGIE PRO VÝROBU DÍLU PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL

USE OF ADDITIVE TECHNOLOGY FOR PRODUCTION OF PART FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Táborský

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2020

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Pavel Táborský</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

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

## Využití aditivní technologie pro výrobu dílu pro automobilový průmysl

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat výrobou dílu, který bude aplikován do sestavy modulů světlometu. Vybraný díl bude vyroben moderní aditivní technologií. Součástí práce bude měření charakteristik takto vyrobeného dílu a jeho porovnáním s dílem vyrobeným standardní technologií. Práce bude ukončena technicko–ekonomickým zhodnocením.

### Cíle diplomové práce:

- Teoretická část – rozbor stávající technologie výroby.
- Základní přehled aditivních technologií.
- Konverze dat z CAX aplikace pro 3D tisk.
- Experimentální část – výroba dílu pro automobilový průmysl.
- Porovnání charakteristik stávajícího dílu a dílu vyrobeného aditivní technologií.
- Technicko–ekonomické zhodnocení.

### Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, c2010. 512 pp. ISBN 978-981-277-897-0.

JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004. pp. 112. ISBN 186-058-465-9.

PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In Proceedings of the Abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH. Bratislava: STU, 2004. 160 s. ISBN 80-227-2121-2.

SEDLÁK, J., PÍŠA, Z. Rapid Prototyping master modelů pomocí CAD/CAM systémů. In Mezinárodní vědecká konference. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 2005. 30 s. ISBN 80-248-0895-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá výrobním postupem optického dílu modulu světlometu zhotoveného aditivní technologií. V uvedené práci je obsažena charakteristika světlometu, stávající výrobní technologie a popis metod aditivní výroby. Praktická část práce je zaměřena na výrobu reflektoru pomocí 3D tisku. Závěr práce je věnován měření světelného výstupu a jeho zhodnocení.

### Klíčová slova

aditivní technologie, 3D tisk, fused deposition modeling, reflektor, světlomet

## ABSTRACT

The diploma thesis deals with the production process of optical part of headlamp module produced by additive technology. The thesis contains the characteristics of headlamp, current manufacturing technology and description of additive manufacturing methods. The practical part is focused on the production of a reflector using 3D printing. The conclusion of the thesis is dedicated to the measuring of light output and its evaluation.

### Key words

additive technology, 3D printing, fused deposition modeling, reflector, headlamp

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TÁBORSKÝ, Pavel. *Využití aditivní technologie pro výrobu dílu pro automobilový průmysl* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124956>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Využití aditivní technologie pro výrobu dílu pro automobilový průmysl** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25.6.2020

-----  
Datum

-----  
Bc. Pavel Táborský

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Sedlákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

Dále děkuji zaměstnancům firmy Varroc Lighting Systems s.r.o. za ochotné a vstřícné jednání. Poděkování patří zejména Ing. Robertu Ryšavému, Mgr. Mikuláši Zápražnému a Ing. Daliboru Vlčkovi, Ph.D., kterému vděčím za pomoc při úpravě 3D modelu.

Na závěr bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za podporu v průběhu psaní i celého studia.

---

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE .....	3
PROHLÁŠENÍ .....	4
PODĚKOVÁNÍ.....	5
OBSAH.....	6
ÚVOD .....	8
1 CHARAKTERISTIKA SVĚTLOMETU.....	9
1.1 Konstrukce světlometu .....	9
1.2 Optické systémy .....	10
1.2.1 Reflektorový světlomet.....	11
1.2.2 Projektorová jednotka .....	11
1.2.3 Světlomet se světlovody .....	12
1.2.4 Adaptivní světlomety .....	12
1.3 Předpisy a měření .....	13
1.4 Vývoj modulu světlometu .....	14
1.5 Firma Varroc Lighting Systems s.r.o .....	15
2 TLAKOVÉ LITÍ.....	16
3 TECHNOLOGIE NANÁŠENÍ TENKÝCH VRSTEV.....	20
4 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE .....	22
4.1 Historie aditivní výroby .....	23
4.2 Postup výroby.....	24
4.2.1 Konverze dat.....	25
4.2.2 Chyby tiskového formátu.....	27
4.3 Metody aditivní výroby.....	29
4.3.1 Stereolitografie .....	29
4.3.2 Fused Deposition Modeling.....	30
4.3.3 Selective Laser Sintering .....	31
4.3.4 Multi Jet Fusion.....	32
4.3.5 Material Jetting.....	33
4.3.6 Carbon Digital Light Synthesis .....	34
4.3.7 Digital Light Processing.....	35
4.3.8 Laminated Object Manufacturing .....	36
5 VÝROBA SOUČÁSTI .....	38
5.1 Rozbor součásti.....	38

---

5.2 Použité 3D tiskárny .....	40
5.3 Výrobní postup reflektoru .....	42
5.4 Úprava vytisknutých vzorků.....	47
5.4.1 Proces lakování vzorků .....	47
5.4.2 Napařování tenké vrstvy hliníku .....	52
5.5 Měření světelného výstupu.....	54
5.6 Porovnání výsledků .....	56
6 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	63
ZÁVĚR .....	65
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	66
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	73
SEZNAM PŘÍLOH .....	74



## ÚVOD

V dnešní době je v automobilovém průmyslu kladen čím dál větší důraz na design nových automobilů. Cílem všech automobilek je stále přicházet s novými designovými prvky, kterými by atraktivněly svá vozidla a upoutaly tak pozornost zákazníků. K takovýmto prvkům bezesporu patří světlomety. V současnosti už není jejich jedinou funkcí osvětlení vozidla a silnice, ale mají také významnou estetickou funkci.

Většina komponentů, ze kterých se světlomety skládají, jsou z polymerního materiálu, díky jeho specifickým vlastnostem jako jsou nízká hmotnost, vysoká pevnost a tuhost a další. Nicméně se pro některé menší díly používá hliníkový materiál. Pro výrobu těchto součástí se využívá technologie tlakového lití, přičemž princip této metody spočívá v plnění dutiny formy taveninou pod vysokým tlakem, s čímž je spojena řada nevýhod. Hlavní z nich je vysoká cena forem z důvodu jejich nákladné a komplikované výroby, díky čemuž se tato technologie vyplatí pouze pro velkosériovou a hromadnou výrobu. Nevýhodou je také nutnost vlastnit několik forem pro různé varianty produktů. Tyto důvody vedou firmy zabývající se návrhem a výrobou vnějšího osvětlení automobilů k hledání alternativních procesů výroby za účelem snížení investičních nákladů.

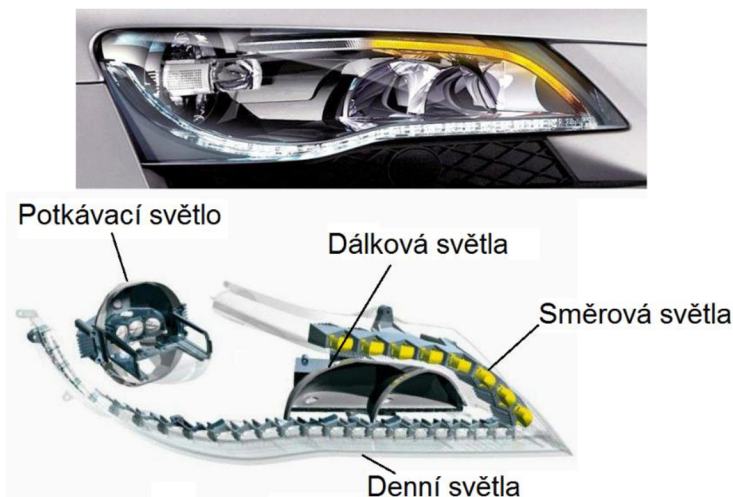
Jednou z možností je využití aditivní technologie. Aditivní výroba neboli 3D tisk je souhrnný název pro výrobní metody, díky kterým je možné vytvářet součásti jakékoliv požadované geometrie z trojrozměrného digitálního modelu postupným nanášením vrstev materiálu, což umožňuje tvorbu složitých designových prvků. Další výhodou je možnost vytvářet různé druhy produktů na jedné tiskárně bez nákladů na formy a nástroje.

Předložená diplomová práce se zabývá využitím aditivní technologie pro výrobu komponenty modulu do světlometu. Práce obsahuje rozbor stávající výrobní technologie, přehled metod aditivní výroby a popis konverze dat pro 3D tiskárnu. Praktická část práce je zaměřena na výrobu plastového dílu na 3D tiskárně a měření charakteristik takto zhotoveného dílu. Řešení praktické části probíhalo ve spolupráci s firmou Varroc Lighting Systems s.r.o.

## 1 CHARAKTERISTIKA SVĚTLOMETU

Světlomet spolu se svítilnou jsou součástí vnějšího osvětlení automobilů. Cílem světlometu je osvětlení vozovky za zhoršených viditelnostních podmínek (potkávací světlo, dálkové světlo, světlo do mlhy), zatímco účel svítilny je vyslání světelného signálu dalším účastníkům provozu (směrová svítilna, denní svítilna, obrysová svítilna). Dnešní světlometry jsou konstruované tak, aby plnily i funkci svítilny [1, 2].

První zařízení pro osvětlení automobilu bylo zkonstruováno už v roce 1885 Carlem F. Benzem. K dalšímu vývoji došlo v roce 1913, kdy Robert Bosch sestrojil světlomet skládající se z vláknové žárovky, dynama, regulátoru a akumulátoru. Do té doby se používaly svíčky, petrolejové, acetylenové a karbidové lampy. Ve třicátých letech byla vynalezena první Bilux žárovka, která umožňovala klopené a dálkové světlo. Další vývoj nastal v roce 1962, kdy byla představena první halogenová žárovka. Následně v roce 1991 automobilka BMW přišla s prvními jednoduchými xenonovými světlometry. K vylepšení došlo v roce 1999 vynalezením bi-xenonových světlometů, kde výbojka plnila funkci dálkových i klopených světél. V roce 2006 se poprvé použily ve světlometech LED diody, které ovšem ještě neměly dostatečný výkon, proto byly použity pouze pro denní svícení. O rok později automobilka Audi již představila světlomet, který byl kompletně tvořen LED diodami, viz obr. 1.1 [1, 2].

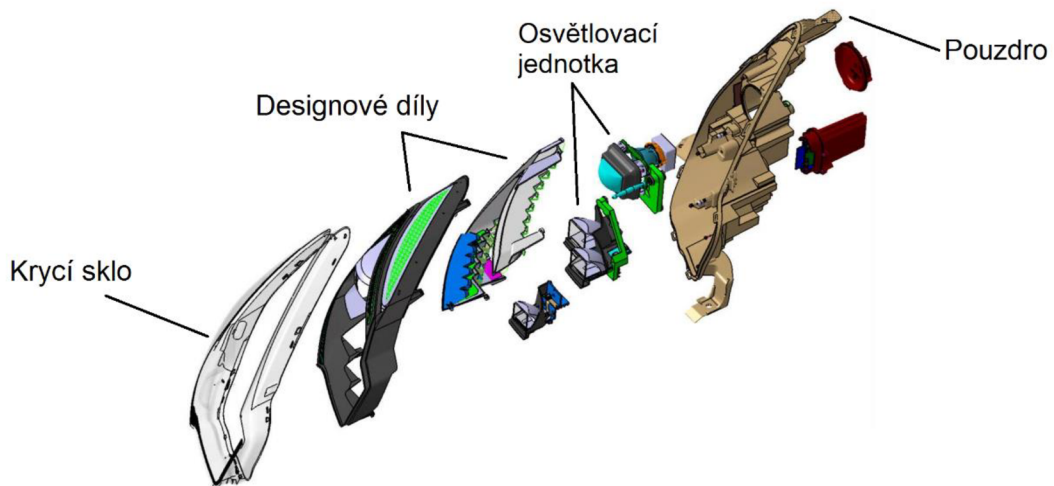


Obr. 1.1 První světlomet kompletně tvořen LED diodami [3].

### 1.1 Konstrukce světlometu

Světlomet se skládá z velkého množství komponentů. Ovšem mezi hlavní části patří pouzdro, krycí sklo, osvětlovací jednotka a designové díly, viz obr. 1.2 [4–7].

Funkce pouzdra je zajištění pevného spojení dílčích částí světlometu a také jeho upevnění na automobilu, které musí být spolehlivé, a navíc musí umožňovat úpravu polohy instalovaného světlometu, viz obr. 1.3. Materiál používaný pro výrobu pouzdra světlometu je polypropylen (PP) [4–7].



Obr. 1.2 Světlo met rozložený na části [8].

Krycí sklo slouží k ochraně vnitřních částí světlo metu před mechanickým poškozením a nečistotami, viz obr. 1.3. Pro krycí sklo je nezbytné, aby bylo bez kazů, čiré a s vysokou optickou propustností. Starší světlo mety byly konstruovány s tvarovým krycím sklem, které upravovalo světelné paprsky. V dnešní době lze při výrobě odrazné plochy dosáhnout takové úpravy povrchu, díky které je světelný tok již dostatečně upraven, a tudíž odpadá nutnost tvarového krycího skla, což má pozitivní vliv na estetiku světlo metu, jelikož krycí sklo bez optické funkce nemusí být ve svislé poloze a lze ho naklánět vzhledem ke svislé rovině o značný úhel [4–7].

Pro výrobu krycích skel se používá plastový materiál polykarbonát (PC), který má vysokou tepelnou odolnost a vhodné optické vlastnosti, ale je náchylný k poškrábání a má nízkou odolnost vůči UV záření, proto se povrch ošetřuje vhodnou úpravou [4–7].



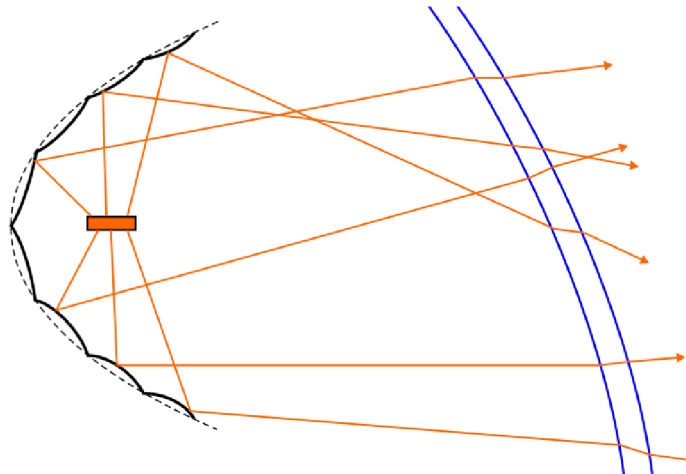
Obr. 1.3 Vnější části světlo metu [7]: a) pouzdro b) krycí sklo.

## 1.2 Optické systémy

Funkcí optických systémů je usměrňovat a distribuovat světelné paprsky ze zdroje světla. V současných světlo metech se používá několik druhů těchto systémů, které mají odlišnou konstrukci, používají jiný zdroj světla a odraznou plochu. Následující kapitoly se zabývají popisem základních typů [6, 9].

### 1.2.1 Reflektorový světlomet

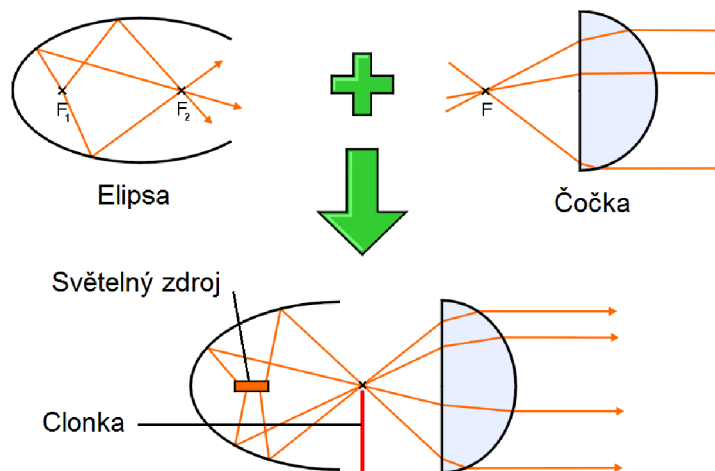
U těchto světlometů má reflektor tvar paraboloidu (tvar, který vznikne rotací paraboly kolem své osy), přičemž světelný zdroj se nachází v okolí ohniska paraboloidu. Dnešní reflektorové světlometry jsou konstruovány s krycím sklem bez optických elementů, které by usměrňovaly světelné paprsky. Pomocí počítačových výpočtů lze totiž reflektor rozložit na části, kde každý segment osvětluje různé části vozovky, viz obr. 1.4. Světelným zdrojem mohou být halogenové žárovky, xenonové výbojky a také LED diody [6, 9, 10, 11].



Obr. 1.4 Parabolický reflektor [9].

### 1.2.2 Projektorová jednotka

Tento systém se označuje jako modul světlometu, který je složen z mnoha komponentů (nosný rámeček, chladič, plošný spoj, spojovací prvky atd.), ale mezi hlavní části patří světelný zdroj, reflektor, clonka a čočka. Reflektor ve tvaru elipsoidu odráží světelné paprsky od zdroje do druhého ohniska (ohnisko čočky). Funkcí clonky je ohraničení světla a tmy, které je projektováno čočkou na vozovku, viz obr. 1.5. Výhodou tohoto uspořádání je možnost konstruovat malé světlometry s vysokým světelným výkonem. Světelné zdroje jsou stejné jako u reflektorových světlometů [4, 6, 9, 10].



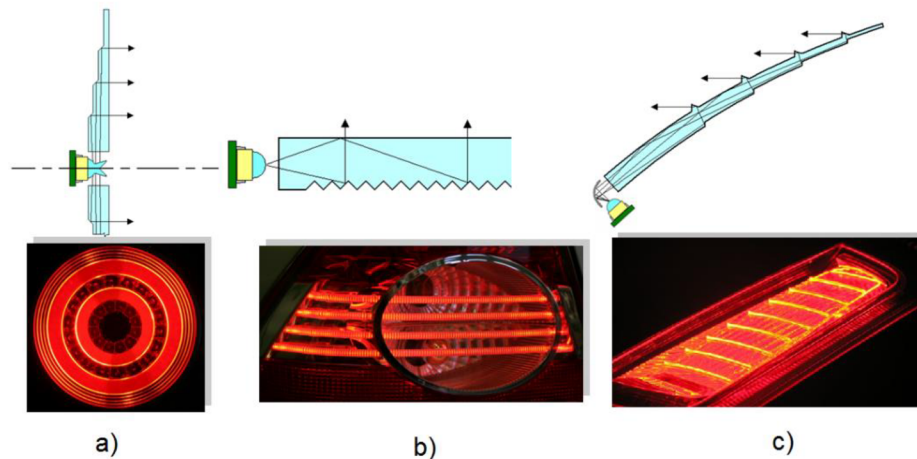
Obr. 1.5 Projektorová jednotka [9].

V případě, že je clonka fixní a nelze s ní pohybovat, jedná se o modul tlumeného nebo dálkového světla. Vyrábí se i moduly, které umožňují odklápění clonky, čímž

se dosáhne při použití jedné čočky a žárovky tlumeného i dálkového světla. Takový systém se nazývá Bi-modul [4, 6, 9, 10].

### 1.2.3 Světlomet se světlovody

Světlovody jsou součásti, které pomocí principu totálního odrazu vedou světelné paprsky a díky zubům, které se designují pod určitými úhly, postupně vyvádí paprsky ven. Běžně se jako světelné zdroje používají LED diody, přičemž lze využít i více diod najednou. Tyto součásti světloometu mají kromě osvětlovací funkce také významnou estetickou funkci a mohou se vyrábět v několika provedeních, viz obr. 1.6 [9, 11].



Obr. 1.6 Druhy světlovodů [9]: a) kruhový b) trubcový c) planární.

### 1.2.4 Adaptivní světlometry

Tento optický systém se skládá z několika světelných jednotek, přičemž jejich chod (zapnutí, vypnutí, vertikální a horizontální natočení atd.) je podmíněn různými faktory například rychlostí vozidla, úhlu natočení volantu, signálu navigačního systému atd. Kombinací světelných paprsků, které jsou proměnlivé během jízdy, z jednotlivých jednotek se docílí optimálního světelného výstupu dle okamžitých jízdních podmínek, viz obr. 1.7. Cílem tohoto systému je zdokonalit osvětlení vozovky zejména při projíždění zatáček a zatáčení [4, 6].

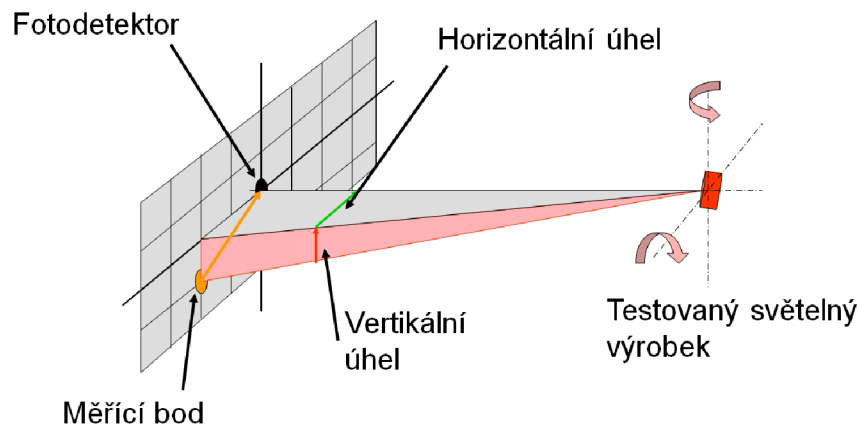


Obr. 1.7 Funkce adaptivních světlometů [4].

### 1.3 Předpisy a měření

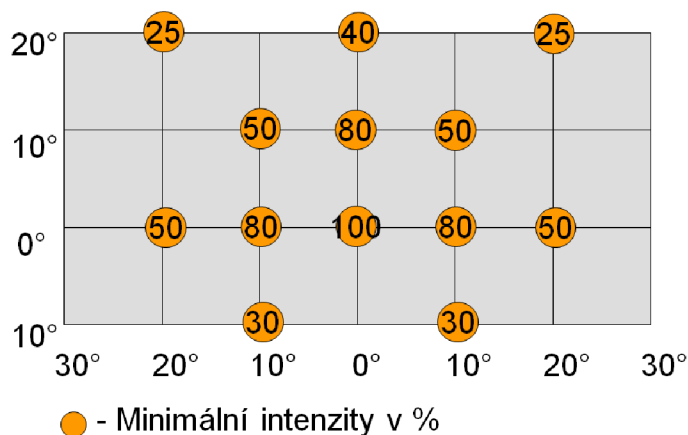
Funkce světloometu musí splňovat celou řadu zákonných požadavků, mezi které patří např. poloha na vozidle vzhledem k dalším světlům, barva a intenzita světla, možnost úpravy polohy atd. Předtím než je světlomet nainstalován do automobilu, musí být schválen pro provoz – homologace (certifikace). Nicméně nutnost zákonného schválení platí pro všechny důležité části automobilu, především prvky aktivní (světlometry atd.) a pasivní (nárazníky vozů atd.) bezpečnosti. V současnosti platí pro 50 členských států OSN předpisy Economic Commission for Europe (ECE). Jedná se o dohodu států Evropské Hospodářské Komise, která už v roce 1953 založila pracovní skupinu s cílem vytvořit tyto nařízení. Ovšem v některých státech např. Čína, Indie, Kanada a USA platí jejich vlastní právní předpisy [9, 11].

K dosažení schválení pro provoz je nutné provést tzv. homologační zkoušky, jejichž výsledky vyhodnocuje nezávislá a specializovaná firma (TUV, ETL atd.). Do homologačních zkoušek spadají fotometrická měření, jejichž výstupem je protokol intenzit v měřících bodech, isocandelová mapa a protokol o měření barvy dané funkce. Pro uskutečnění zkoušky se používá zařízení nazvané goniofotometr, díky kterému lze měřit svítivost v různých směrech, viz obr. 1.8 [9, 11].



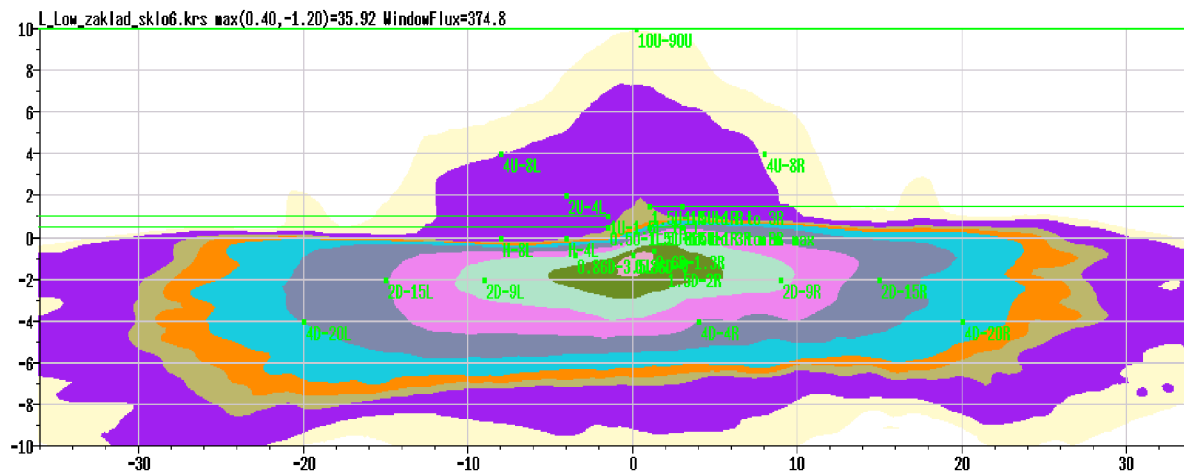
Obr. 1.8 Princip goniofotometru [9].

Měření intenzit v bodech probíhá pomocí natočení testovaného dílu o daný vertikální a horizontální úhel, přičemž rozložení těchto bodů je přesně dané, viz obr. 1.9. V každém měřícím bodě je předepsaná minimální intenzita osvětlení, která musí být dodržena [9].



Obr. 1.9 Rozložení měřících bodů [9].

Dalším výstupem fotometrického měření je isocandelová mapa. Jedná se o grafické znázornění intenzity osvětlení světelného zdroje, které vznikne spojením bodů se stejnou intenzitou, viz obr. 1.10 [9].



Obr. 1.10 Isocandelová mapa [9].

## 1.4 Vývoj modulu světlometu

V první fázi vývoje zákazník definuje několik požadovaných parametrů – optický výstup (např. maxima v určitých bodech), světelnou funkci (potkávací, dálkovou atd.) a popřípadě i zástavbový prostor. Tyto daná kritéria poté tvoří základ návrhu designu, který je v průběhu několika diskuzí mezi zákazníkem a dodavatelem postupně upravován s ohledem na určité požadavky (teploty, legislativa atd.). Následně dle výsledků těchto diskuzí je vytvořen koncept modulu, na kterém se podílí několik oddělení. Ověřuje se možnost využití již vyráběných částí (nosný rámeček, plošný spoj atd.) s cílem snížení nákladů a kapacity výroby. Inženýři optického oddělení se zabývají vývojem 3D modelu dle nároků zákazníka. První krok vývoje je vytvoření digitálního modelu, který vyplňuje zadaný zástavbový prostor ve světlometu, splňuje požadovaný design a optické vlastnosti. Jelikož je modul složen z choulostivých částí, kdy i malá nepřesnost při výrobě optické plochy snižuje svítivost, je nutné provést několik virtuálních simulací [12, 13].

Pro ověření chování modulu při teplotním a mechanickém namáhání se modul podrobuje simulaci. Během provozu vytváří světelný zdroj teplo, které je nezbytné chladit pomocí vhodného chladicího systému, který může být aktivní nebo pasivní. Aktivní systém využívá chladící účinek proudícího vzduchu za pomoci ventilátoru. Základ pasivního chladicího systému je dán efektivitou chladící plochy a materiálu chladiče, kdy pro zvětšení chladící plochy se využívá prožebrování. Technologicky a ekonomicky se ukázal hliník jako nejoptimálnější materiál pro výrobu chladiče. Při návrhu chladiče se provádí výpočet chladící plochy a celkové provedení s uvažováním aplikace vhodné teplovodivé pasty nebo lepidla, které se používají pro zefektivnění přenosu tepla z plošného spoje s LED diodami (primární zdroj tepla) na chladič. Během mechanické simulace se ověřuje odolnost proti vibracím a tuhost modulu [12, 13]. Fáze procesu vývoje lze shrnout následovně [11]:

- Proveditelnost – určení optické proveditelnosti a analýza rizik návrhů konfigurací a konstrukcí.

- Design – použití aplikací počítačem podporovaného konstruování (Computer Aided Design - CAD) a počítačem podporovaného inženýrství (Computer Aided Engineering - CAE) k ověření optického designu.
- Analýza – rozbor výkonových charakteristik optického systému za použití CAE aplikace nebo fyzického prototypu.
- Validace – testování, kontrola zákazníka, homologace (certifikace).

## 1.5 Firma Varroc Lighting Systems s.r.o

Vypracování uvedené diplomové práce probíhalo ve spolupráci s firmou Varroc Lighting Systems s.r.o. Tato firma se zabývá výrobou vnějšího osvětlení vozidel se zaměřením na inovativní vývoj a návrh vhodných designových řešení. Jedná se o globálního dodavatele pro automotive a nejdůležitější část skupiny Varroc Group, jejíž sídlo se nachází v Indii v Aurangabadu. Centrála Varroc Lighting Systems sídlí v USA ve státě Michigan. Firma nabízí produkty využívající technologie LED, Matrix, Pixel, Surface-Led a další. Mezi zákazníky patří přední výrobci automobilů běžných i prémiových značek po celém světě [14].

Výroba osvětlení probíhá ve strategických lokalitách situovaných v dosahu výrobců vozidel a dodavatelů v moderních závodech v Číně, České republice, Indii, Mexiku, Maroku, Turecku a Vietnamu. V České republice se nachází výrobní závody v Šenově u Nového Jičína, Rychvaldu a také vývojové centrum v Ostravě [14, 16].

První jmenovaný závod vznikl v roce 1879, jehož zakladatelem byl Josef Rotter a už v té době byla výroba zaměřena na automobilové osvětlení (tehdejší kočárové lampy). V dnešní době se v Novém Jičíně vyrábí světlomety, zadní svítily, projektorové jednotky a elektronika ve 4 výrobních halách s více než 90 vstřikovacími stroji. V areálu se také nachází sídlo globálního vývoje společnosti spolu s elektronickým vývojovým centrem disponující nejmodernějšími technologiemi. V porovnání s ostatními závody společnosti se v Novém Jičíně dosahuje největších objemů výroby [15, 16].

Druhý výrobní závod v Rychvaldu byl založen v roce 1969 a je zaměřen na produkci světlometů, zadních svítilen, projektorových jednotek, mlhových, denních, a pomocných světel ve výrobních halách s adaptibilními montážními linkami, automatizovanými vstřikovacími stroji a inteligentními zařízeními pro řízení logistiky [15, 16].

Vývojové centrum působí v Ostravě od roku 2012 a je vybaveno elektronickou laboratoří s antistatickým prostředím [15].

Po celém světě společnost zaměstnává 5000 pracovníků, přičemž kolem poloviny jich působí v České republice – 2100 v závodě v Novém Jičíně a 500 v Rychvaldu [16].



## 2 TLAKOVÉ LITÍ

Stávající reflektor, který je instalován do modulu světloometu, se vyrábí z hliníku technologií tlakového lití. Jedná se o metodu výroby odlitků nejen ze slitin hliníku, ale i dalších neželezných kovů např. hořčíku, zinku a ostatních nízko tavitelných slitin, přičemž principem je vstřikování taveniny do formy za pomoci vysokého tlaku (až 250 MPa). Tento postup se využívá zejména pro velkosériovou výrobu složitých tenkostěnných (tloušťka stěn přibližně od 1 mm) a hladkých odlitků menších hmotností i rozměrů. Díly zhotovené touto metodou se uplatňují především v automobilovém a leteckém průmyslu, ale i v dalších oblastech, jenž vyžadují velký počet odlitků jednoho druhu [17, 18].

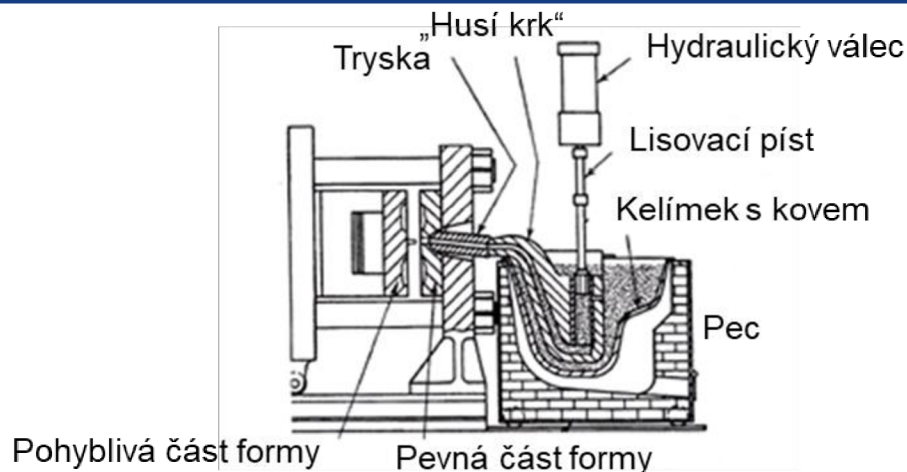
Technologie výroby odlitků s použitím klasických pískových forem je velice odlišná od metody tlakového lití, která tvoří samostatné odvětví slévárenství. Slévárna pro tlakové lití musí disponovat všemi potřebnými zařízeními – tavící pec, udržovací pec, zařízení pro dokončovací úpravy odlitků (ostřihovací lisy atd.) a zejména tlakové stroje, jenž se podle konstrukce dělí na dva základní typy (s teplou komorou a studenou komorou). Lze je také rozlišit podle směru pohybu plnicího pístu (se svislou komorou a vodorovnou komorou) [17, 18].

Tyto stroje zajišťují pohyb pohyblivé části formy a uchycení nepohyblivé části formy, přičemž je nutné zabezpečit jejich dokonalé sevření. Dále pak díky pístu umožňují plnění dutiny formy taveninou zahřátou pod teplotu likvidu dané slitiny vysokým tlakem. Plnění pak probíhá přes vtokovou soustavu s malými průřezy vysokou rychlostí. Pro výrobu kusů různých hmotností a rozměrů musí závod tlakového lití disponovat stroji s odlišnými parametry, přičemž jedním z hlavních parametrů je plocha průmětu odlitku do vertikální dělicí roviny. Dalšími charakteristikami tlakových zařízení jsou uzavírací síla a síla pístu při odlévání [17, 18].

Historie tlakového lití sahá do 19. století, kdy se tento výrobní postup využíval pro odlévání tiskařských štoček na bázi olova, antimonu a cínu. Významnou osobou, která stála u vývoje tlakových strojů, byl Ing. Josef Polák, jenž si nechal v roce 1927 patentovat své provedení licího stroje. Patent spočíval v oddělení tavící pece od stroje. Tavenina se musela ručně nalévat do tlakové komory, odkud se tlakem pístu dostávala do dutiny formy. V době první republiky založil Ing. Josef Polák firmu na výrobu tlakových strojů v Praze, která byla v té době centrem technologie tlakového lití [17, 19].

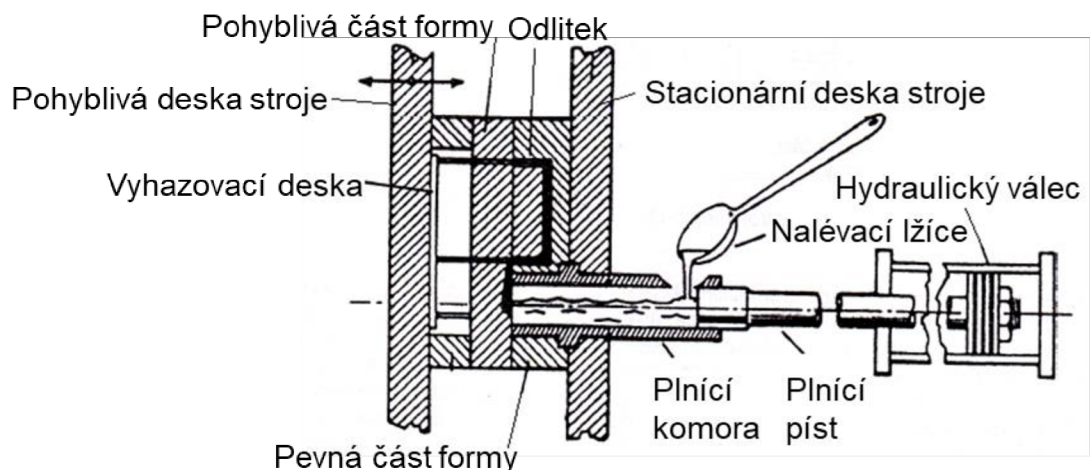
Dnešní tlakové stroje díky řídicím a elektronickým prvkům, kvalitní konstrukci a výpočetní technice dosahují vysokých kvalit, přičemž v průběhu vývoje prošla konstrukce a technické provedení několika změnami a úpravami. Jedním z významných pokroků ve vývoji bylo vynalezení horizontálního provedení tlakové komory, díky kterému tlaková zařízení mají vyšší výkon, lépe využívají odlévaný kov. Výhodou je pak také jednodušší vstřikovací systém, který zlepšuje spolehlivost provozu [17, 19].

Tlakové stroje s teplou komorou se používají pro výrobu odlitků z kovů nebo slitin, které mají nízkou teplotu tání (zinek, olovo, cín a jejich slitiny, popř. hořčík a jeho slitiny), viz obr. 2.1. Typickým znakem těchto zařízení je umístění plnicí komory pod hladinu taveniny v udržovací peci, díky čemuž se kov nepřelévá, a tudíž nedochází k jeho oxidaci. Tyto zařízení jsou vysoce produktivní a jejich chod lze plně automatizovat [17, 18].



Obr. 2.1 Tlakový stroj s teplou komorou [18].

Druhým typem je tlakový stroj se studenou komorou, který se používá pro lití hliníku, viz obr. 2.2. Provedení studené komory může být vertikální nebo horizontální. Roztavení slitin se uskutečňuje v tavicích pecích, odkud se tavenina následně přemísťuje do udržovacích pecí, které se nachází v blízkosti tlakových zařízení, aby bylo možné roztavenou slitinu dávkovat pomocí robotů nebo dávkovačů přímo do tlakové komory [17, 18].



Obr. 2.2 Tlakový stroj se studenou komorou [18].

Po ztuhnutí odlitku dochází k jeho vyjmutí z pohyblivé části formy pohybem vyhazovačů a po ochlazení ve vodní nádrži umístěné v blízkosti tlakového stroje následuje ostřížení vtoků a přetoků na ostříhovacím lisu a finální úprava součásti. Než začne další výrobní cyklus, musí se na formu aplikovat separační prostředek, díky čemuž dojde k zamezení nalepování odlitků na stěny dutiny, a navíc usnadňuje odebírání hotových dílů z formy [18].

Nezbytnou částí slévárenského závodu pro tlakové lití je nástrojárna, která zabezpečuje výrobu nových forem a také opravu stávajících, což mnohdy bývá technicky, časově a cenově náročné (výroba formy stojí statisíce až miliony korun). Kvůli vysokým nákladům na zhotovení forem se požaduje jejich vysoká životnost (u malých forem až 100 000 odlití). Díky těmto vysokým cenám forem je technologie tlakového lití vhodná pouze pro velkosériovou a hromadnou výrobu [17, 18].

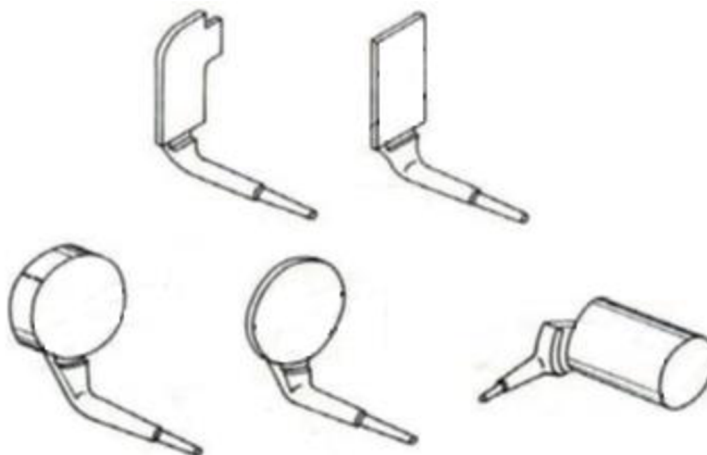
Při konstrukci forem je nutné zohlednit kromě samotné pracovní dutiny také vnější povrch, který zabezpečuje sevření obou částí formy, řešení lokálního ohřevu nebo chlazení, čištění, mazání, přepravu a skladování formy. Dále je také nezbytné

určit, jestli bude forma vyrobena pro jeden nebo více odlitků. Forma se skládá ze dvou částí, a to z pevného a pohyblivého dílu. Pevná část formy je upevněna na nosiči a vede přes ni vtok do dutiny. Pohyblivá část se horizontálně pohybuje pomocí vodících sloupků. Funkcí těchto sloupků je také zabezpečení přesného sevření obou částí a zamezení otevření formy během lití. Na formu jsou kladeny vysoké nároky z důvodu plnění dutiny pod vysokým tlakem, díky kterému se dosahuje vysokých rychlostí vstřikování. Forma musí být z materiálu, který je dostatečně odolný proti fyzikálním, chemickým, tepelným a mechanickým účinkům roztavené slitiny. Požadavky na vlastnosti materiálu formy jsou následující [17, 18]:

- chemická odolnost proti roztavené slitině,
- udržení mechanických vlastností za vysokých teplot,
- odolnost proti tepelným změnám,
- co nejnížší součinitel tepelné roztažnosti,
- dobrá obrobiteľnosť,
- nízká cena.

Tyto požadavky splňují vysokolegované, žárovečné a žáruvzdorné oceli, které se ještě tepelně zpracovávají. Na životnost forem má významný vliv typ odlévaného materiálu, přičemž ji lze zvýšit vhodnou úpravou pracovního povrchu formy a jader. Pro zamezení přímého kontaktu pracovní plochy s taveninou se využívají ochranné prostředky, jenž chrání materiál formy i jader a následně po odlití ulehčuje vyjmutí odlitků z formy. Tyto prostředky mohou být tuhé, kapalné i vazelinové konzistence. Kapalné prostředky obsahují rozpouštědla, plniva a syntetický kaučuk. Zatímco tuhé prostředky jsou složeny pouze z tuků a vosků. Prostředky vazelinové konzistence se vytvářejí z parafínu, mazutu, ceresinu a minerálních olejů s přísadou koloidního grafitu nebo hliníkového prášku. Vhodné kombinace těchto ochranných prostředků používaných ve firmách vychází ze zkušeností těchto závodů a jsou zpravidla patentově chráněna [17, 18].

Při řešení technologie tlakového lití je také důležitou částí návrh vtokové soustavy, viz obr. 2.3. Jedná se o systém, který je složen z vtokového kanálu a zářezů do dutiny formy, který navazuje na tlakovou komoru. Vtokový kanál je kruhového tvaru se zvětšujícím se průřezem směrem k odlitku (kónický). Po vyjmutí odlitku z formy zůstává tato část vtokové soustavy připojena k odlitku i po jeho vyjmutí [18].



Obr. 2.3 Ukázky provedení vtokové soustavy [17].

---

Postup výroby součástí pomocí technologie tlakového lití se skládá z následujících kroků [17]:

- nastudování výkresu dílu (rozměry, hmotnost atd) a dle získaných informací vybrat vhodný druh tlakového stroje, který určuje vnější konstrukci tlakové formy,
- určení přídavků na obrábění a dělicí rovinu,
- návržení konstrukce a materiálu jader,
- řešení vtokové soustavy,
- rozhodnutí o konstrukčních úpravách součástí vzhledem k nebezpečí vzniku tepelných, smršťovacích a fázových napětí při tuhnutí a chladnutí dílu ve formě,
- návržení systému odvodu vzduchu formy,
- vytvoření postupu uvolňování jader a odlitků z formy,
- řešení soustavy vyhazovačů.

Kvalita odlitků zhotovených technologií tlakového lití není příliš vysoká (zejména vnitřní homogenita). Během vstřikování taveniny do formy totiž dochází k oxidaci kovu a jeho interakci s mazadlem, což má za následek vznik značného množství vměstků. Může se také stát, že v některých průřezích zůstává vzduch, který vytváří bubliny. Řešení tohoto problému spočívá ve vhodném návrhu konstrukce formy, vtokové soustavy, režimu plnění a odvodu vzduchu systému. Výrazného vylepšení vnitřní homogenity dochází při použití vakuovaných forem, u kterých se před litím taveniny odsaje vzduch, což má za následek snížení oxidace a zamezení tvorby bublin [18, 19].

Výroba odlitků s optickými plochami se skládá z několika technologických procesů, které se realizují přímo ve slévárně. Po odlití a ostřížení vtoků a přetoků se provádí následující operace nutné ke zhotovení kvalitní odrazné plochy [20]:

- omílání,
- vypalování,
- chemická předúprava,
- práškové lakování s vypálením,
- napařování tenké vrstvy hliníku.

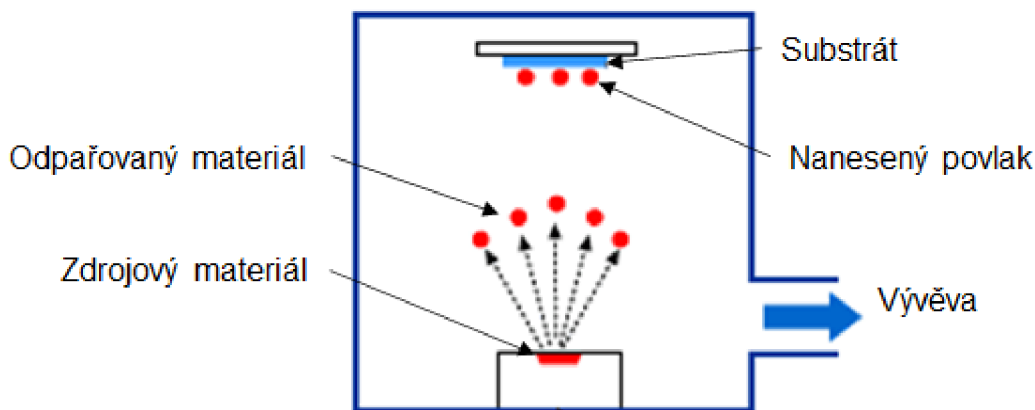
Hned po odlití optického dílu následuje omílání. Díky tomuto procesu se součásti zbavují otřepů a dalších povrchových vad vzniklých při odlévání a dochází také ke sražení hran. Následuje vypalování v peci, kde se kusy vysuší a také se sníží množství vzduchových bublin v odlitcích, přičemž vypalování probíhá 1 hodinu za teploty 250 °C. Dalším krokem je chemická předúprava, jejímž cílem je připravit povrch dílu na následné lakování. Jakmile je povrch kusů vhodně ošetřen, následuje tvorba jednolitého a lesklého povrchu pomocí práškového lakování s následným vypálením. Poslední operací je vznik tenké vrstvy, která dostatečně zvýší odrazivost. Pro tento účel se na kusy nanáší tenká vrstva hliníku metodou napařování [20].

### 3 TECHNOLOGIE NANÁŠENÍ TENKÝCH VRSTEV

Posledním krokem při výrobě reflektoru je zvýšení odrazivosti optické plochy pomocí tenké vrstvy hliníku, pro jejíž tvorbu se používají technologie spadající do fyzikálních metod přípravy tenkých vrstev (Physical Vapour Deposition – PVD). Při výrobě reflektorů se lze setkat s PVD metodami napařování a naprašování. V automobilovém průmyslu zaměřující se na výrobu osvětlení se tenké vrstvy využívají jak pro funkční, tak i pro dekorativní účely. Druhou základní skupinou technologií pro tvorbu tenkých vrstev jsou chemické metody (Chemical Vapour Deposition – CVD). Pomocí těchto metod vznikají vrstvy, pro které je typická vysoká odolnost proti opotřebení. Dále jsou pak tyto procesy vhodné pro povlakování nepřístupných dutin a drážek. Nevýhodou ovšem jsou vysoké teploty během procesu a také nutnost použití toxických látek. Princip spočívá v chemických reakcích složek, které jsou v plynném skupenství, probíhajících za různých tlaků při vysokých teplotách (800 až 1000 °C), přičemž se díky heterogenním reakcím vytváří na substrátu tenká vrstva materiálu. Díky těmto vysokým teplotám je možné povlakovat pouze materiály s vysokou tepelnou odolností. Existují různé úpravy metody CVD, kdy každá má své specifika a oblast použití [21, 22].

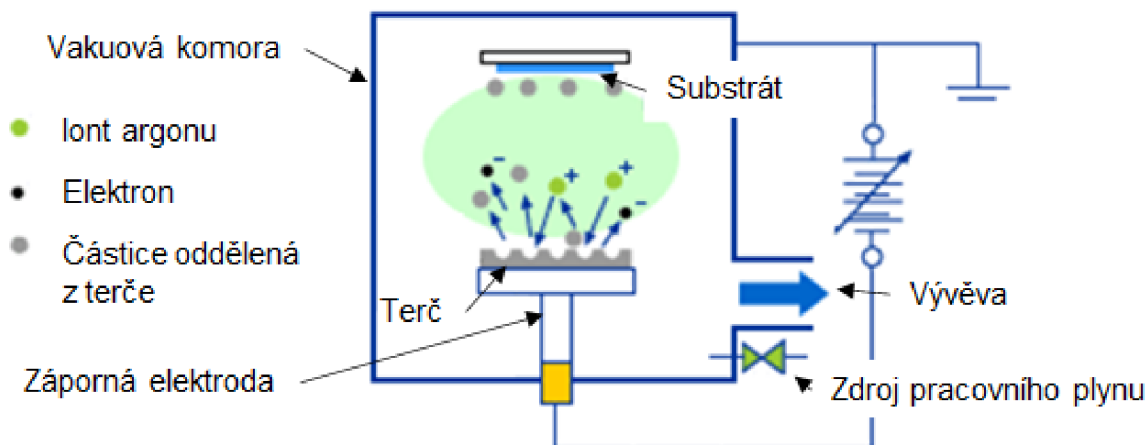
Fyzikální metody jsou ekologicky přijatelnější, jelikož jejich průběh není podmíněn použitím nebezpečných chemických látek. Teplota procesu je nižší než u CVD (150 až 500 °C), a tudíž lze tyto metody využívat pro tvorbu vrstev na méně teplotně odolné materiály. Výhodou je také možnost dobře ovládat průběh procesu, díky čemuž lze vytvářet vrstvy o přesných tloušťkách. Fyzikální metody se využívají pro tvorbu tenkých vrstev na ocel, hliník a plasty, přičemž podstata spočívá ve vypařování materiálu ve vakuu nebo rozprašování částic materiálu z terčů pomocí výbojů. Tvorba vrstvy probíhá postupně ve třech krocích – převedení deponovaného materiálu do plynného skupenství, přemístění par materiálu k povrchu substrátu, kondenzace par na substrátu (růst vrstvy). Mezi běžné metody PVD patří napařování a naprašování (často se používá modifikovaná metoda s využitím magnetických pólů – magnetronové naprašování). Tenké vrstvy zhotovené PVD metodami se využívají k prodloužení životnosti rezných nástrojů a lze díky nim obrábět houževnaté a tvrdé materiály. Dále se používají pro zvýšení otěruvzdornosti a snížení tření u strojních součástí. Díky těmto vrstvám lze také chránit vstřikovací formy proti abrazi a korozi. Další oblastí, kde mají tyto tenké vrstvy uplatnění, jsou dekorativní prvky (nábytkové kování, porcelán atd.). Ovšem s PVD povlaky se lze setkat i v medicíně (kloubní náhrady, zubní protézy atd.) [22, 23].

První z metod používaných pro úpravu odrazné plochy reflektoru je napařování. Jedná se o jednu z nejjednodušších metod tvorby tenkých vrstev, jejíž princip spočívá v nahřátí nanášeného materiálu, čímž dojde k uvolnění jeho částic a následně depozici těchto částic na substrátu, viz obr. 3.1. Jelikož má substrát nižší teplotu než výparník, dochází na něm ke kondenzaci par a růstu tenké vrstvy. Celý proces probíhá v uzavřeném systému, ve kterém se z důvodu zvětšení střední volné dráhy molekul (dojde ke snížení kolizí částic) a tím i zlepšení adheze vytváří vakuum  $10^{-4}$  až  $10^{-6}$  Pa. Lze odpařovat např. Al, Cu, Ag, přičemž se pro jejich ohřev využívá průchod elektrického proudu wolframovým drátem nebo molybdenovou lodičkou. Dále lze pro ohřev napařovaného materiálu použít elektronový svazek, obloukový výboj, vysokofrekvenční ohřev atd. [22, 24]



Obr. 3.1 Schéma napařování [25].

Druhou metodou PVD, která se používá při výrobě reflektorů je napařování. Tento způsob tvorby tenkých vrstev je založen na rozprašování terče z vodivého materiálu ionty, které vyrážejí částice deponovaného materiálu, a následným usazením těchto částic na substrátu, viz obr. 3.2. Na terč, který je umístěn ve vakuové komoře, je přiveden vysoký záporný potenciál (tisíce voltů) a do komory se vpustí pracovní plyn (nejčastěji argon), a přitom je tlak udržován v jednotkách pascalů. Následně dojde k zapálení doutnavého výboje, což má za následek bombardování záporného terče kladnými ionty a dopadání elektronů na uzemněný povrch komory. V důsledku bombardování, dochází k rozprašování částic terče, které se usazují na vnitřních površích komory. Substráty, na kterých má dojít ke vzniku vrstvy, se umísťují před terč, aby tenká vrstva vznikla zejména na nich. Vyražené částice mají vyšší energii a vytvářejí homogennější vrstvy s lepší adhezí než u napařování. Používá se také upravená metoda s využitím magnetického pole, která se nazývá magnetronové napařování [22, 26].



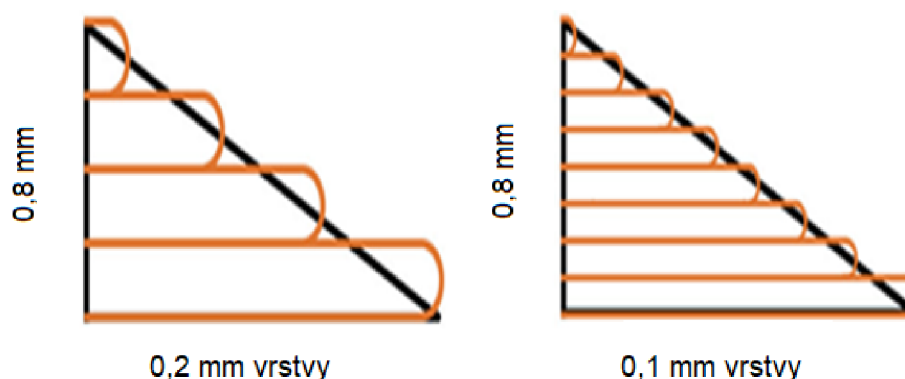
Obr. 3.2 Schéma napařování [25].

Jedná se o vylepšenou metodu napařování, kdy se před terčem vytváří magnetické pole daného tvaru pomocí elektromagnetu nebo permanentního magnetu umístěného za terčem. Pro tyto účely se používá zařízení nazvané magnetron. Díky magnetickému poli se elektrony odcházející z prostoru před terčem pohybují po šroubovici podél siločar, čímž dochází k prodloužení jejich dráhy a doby v prostoru výboje, a tudíž je zvýšená pravděpodobnost ionizace pracovního plynu. Následkem je udržení výboje za nižšího tlaku i napětí, což kladně ovlivňuje čistotu nanášených vrstev [22, 26].

## 4 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Aditivní technologie vyvážejí díly postupným nanášením tenkých vrstev materiálu, což je opakem třískových obráběcích technologií, kdy se z polotovaru odebíráním materiálu vytváří finální produkt [27–29].

Tloušťka vrstvy materiálu se liší v závislosti na metodě 3D tisku, druhu materiálu a parametrech tiskárny, přičemž se obvykle pohybuje od setin až po desetiny milimetru. U menších výšek dochází ke zlepšení přesnosti součásti, ale prodlužuje se doba tisku (potřeba více vrstev) a zvyšuje se tím i riziko chyby, viz obr. 4.1 [30].



Obr. 4.1 Závislost kvality dílu na výšce vrstvy [33].

Dalším důležitým parametrem jsou rozměry pracovního prostoru tiskárny, které ovlivňují maximální velikost tisknuté součásti, a orientace součásti v pracovní komoře. Orientace součásti má vliv na rozložení a počet potřebných podpor, jejichž účelem je spojení dílu s platformou, držení modelu v dané poloze a bránění jeho zborcení. Po dokončení celého procesu musí být podpory odstraněny [29, 31, 32].

Tradiční výrobní postupy mají své určité omezení a nevýhody. Například není možné vyrobit součást libovolného tvaru, zato při použití aditivních metod toho lze dosáhnout. K dalším nevýhodám konvenčních metod patří náklady na výrobu nezbytných nástrojů, forem a dalšího příslušenství, které nejsou u aditivní výroby potřeba. Výhodou 3D tiskáren je také šetrnost k životnímu prostředí. Pracují totiž s menším množstvím materiálu a vytváří méně odpadu, který je obvykle recyklovatelný. Dále umožňují vyrábět součásti z různých materiálů (plast, kov, keramika, kompozity, papír) a lze také vytvářet součásti z více než jednoho materiálu [27, 29, 31, 32].

Ovšem aditivní technologie pořád nejsou schopny plně nahradit konvenční výrobní postupy. Pro některé aplikace je stále výhodnější použít tradiční technologie (obrábění, tváření, odlévání). Jedná se o tvorbu velkých součástí, kde při použití 3D tisku je potřeba většího času pro nanášení vrstvy, čímž se celý proces výroby prodlouží. Dále je to pak velkosériová výroba, kde 3D tisk nedosahuje potřebné rychlosti výrobního cyklu a nakonec při použití konvenčních metod lze dosáhnout vyšší přesnosti dílů a kvalitnějších povrchů, proto jsou aditivní technologie vhodné spíše pro kusovou, malosériovou výrobu a pro tvorbu prototypů, kdy lze na jedné tiskárně vyrobit několik variant produktu bez velkých nákladů na formy a nástroje [27, 32].

## 4.1 Historie aditivní výroby

Počátky aditivních technologií se datují do osmdesátých let. Za zakladatele se považuje Charles Hull, který si nechal v roce 1986 patentovat technologii Stereolitografie (SLA) a později založil firmu 3D Systems Corporation, Inc., která je dodnes jedna z největších společností v oblasti aditivní výroby. V té době byla nazývána technologií Rapid Prototyping, jelikož byla původně vyvinuta jako rychlá a efektivnější metoda tvorby prototypů. Ovšem prvním, kdo podal patentovou přihlášku pro technologii Rapid Prototyping, byl dr. Kodama v roce 1980 v Japonsku. Bohužel díky problémům s patentovou specifikací mu nebyl udělen patent [34, 35].

První vytvořenou 3D tiskárnou byla v roce 1987 SLA-1 od firmy 3D Systems, Inc, viz obr. 4.2. V té době byly již ve vývoji další aditivní metody. V roce 1987 Carl Deckard podal patent na proces Selektivního Laserového Slinování (SLS) a o dva roky později patent získal. Dále v roce 1989 spoluzakladatel společnosti Stratasys Ltd. Scott Crump si nechal patentovat technologii Fused Deposition Modeling (FDM). Ve stejném roce založil Hans Langer společnost EOS GmbH v Německu, která se zabývala metodou laserového slinování (SL) [34, 35].



Obr. 4.2 První 3D tiskárna SLA-1 [36].

Během osmdesátých let byly vynalezeny ještě další technologie 3D tisku. Například Ballistic Particle Manufacturing (BPM) Williamem Mastersem a technologie Laminated Object Manufacturing (LOM) patentována Michaelem Feyginem [34, 35].

V devadesátých letech a na počátku roku 2000 bylo představeno mnoho nových technologií stále se zaměřujících na průmyslové aplikace. Většina metod se sice zabývala vytvářením prototypů, ale některé se již začaly orientovat na tvorbu nástrojů a na přímé výrobní aplikace, což dalo vzniknout nové terminologii Rapid Tooling a Rapid Manufacturing. Zastřešujícím termínem pro veškeré tyto výrobní procesy se stal Additive Manufacturing (aditivní výroba). V tomto období se na trhu stále objevovalo mnoho nových firem např. Sanders Prototype, Inc., ZCorporation, Object Geometries Ltd. a MCP Technologies. Některé z nich ovšem byly odkoupeny většími společnostmi jako Stratasys Ltd. a 3D Systems, Inc. [34, 35]

V následujících letech se vývoj v oblasti aditivní výroby rozdělil na 2 směry. Jedním byl velice drahý high end 3D tisk, orientovaný na tvorbu velice složitých součástí především v oblastech letectví, automobilového průmyslu a lékařství, který pokračuje

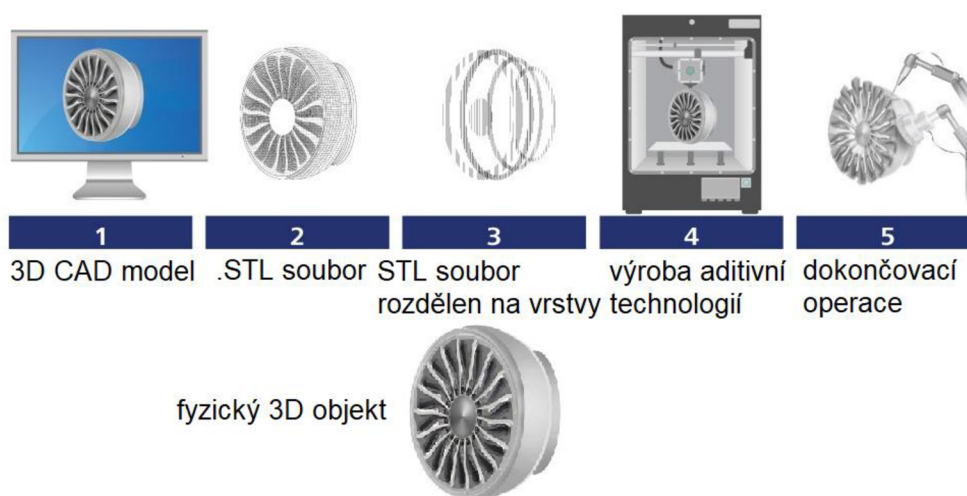


až do dnešní doby a druhým směrem byla snaha vytvořit nízkonákladové a uživatelsky dostupné zařízení pro malé výrobce [34, 35].

Zlomovým se stal rok 2007, kdy byl představen koncept open source RepRap. Jednalo se o samoreprodukční 3D tiskárnu, jejíž koncept a první prototypy vyvinuli Vik Oliver a Rhys Jones, což byli členové týmu doktora Bowyera, který přišel s původní myšlenkou už v roce 2004. Díky tomuto konceptu se 3D tisk stal mnohem dostupnějším. První takto sestrojenou tiskárnou byla v roce 2009 BfB RapMan 3D a od stejného roku bylo uvedeno na trh mnoho podobných tiskáren [34, 35].

## 4.2 Postup výroby

Aditivní technologie se liší ve způsobu tvorby vrstvy materiálu, ale výrobní postup je pro všechny stejný a skládá se z následujících kroků, viz obr. 4.3 [34, 37, 38].



Obr. 4.3 Výrobní proces [39].

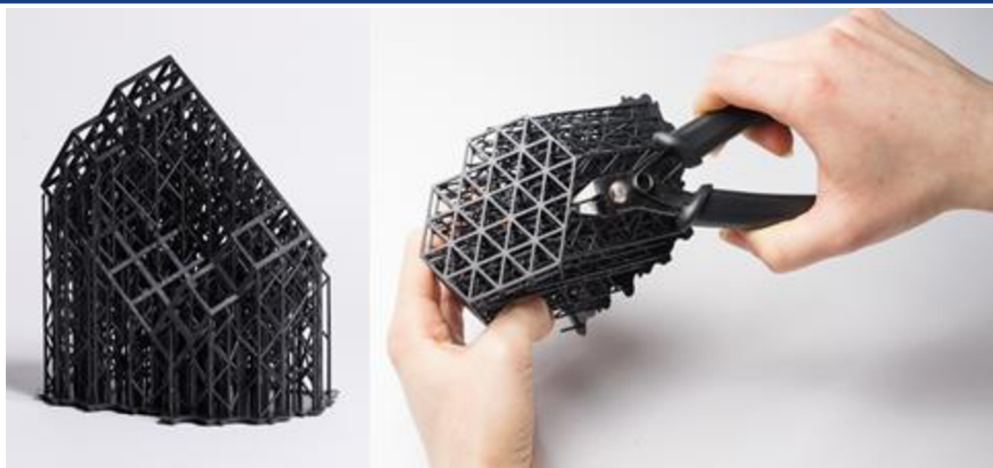
Na začátku výrobního procesu je potřeba vytvořit 3D digitální model, který může být vytvořen v různých počítačových systémech (CAD) nebo ho lze získat pomocí reversního inženýrství. Zkratkou CAD jsou označovány systémy, kterými lze virtuálně ztvárnit zatím neexistující produkt. Umožňují také provádět simulace a tím předpovídat případné závady výrobku [38, 40].

Druhým způsobem jak získat 3D model je reverzní inženýrství. Jedná se o postup, který je opačný proti běžným inženýrským metodám, jehož účelem je tvorba digitálního modelu z fyzického objektu pomocí 3D skenerů. Tento model pak lze použít v různých CAD systémech, kde může být dále upravován a zdokonalován [37, 38].

V dalším kroku následuje konverze CAD modelu do STL formátu, který se stal běžným pro aditivní procesy. Různé CAD systémy totiž uchovávají data různými způsoby, proto je nutné převést tyto data do jednotného formátu [38, 40].

Dále je potřeba importovat STL soubor do specializovaného programu (slicer program), který rozdělí model na vrstvy podél roviny X-Y a vytvoří G-kód pro řízení 3D tiskárny. V dalším kroku se zhotovuje součást ze STL modelu [38, 40].

Poslední částí jsou dokončovací operace (post-processing), které se liší v závislosti na použité technologii (odstranění podpor, čištění atd.), viz obr. 4.4 [34, 38, 40].

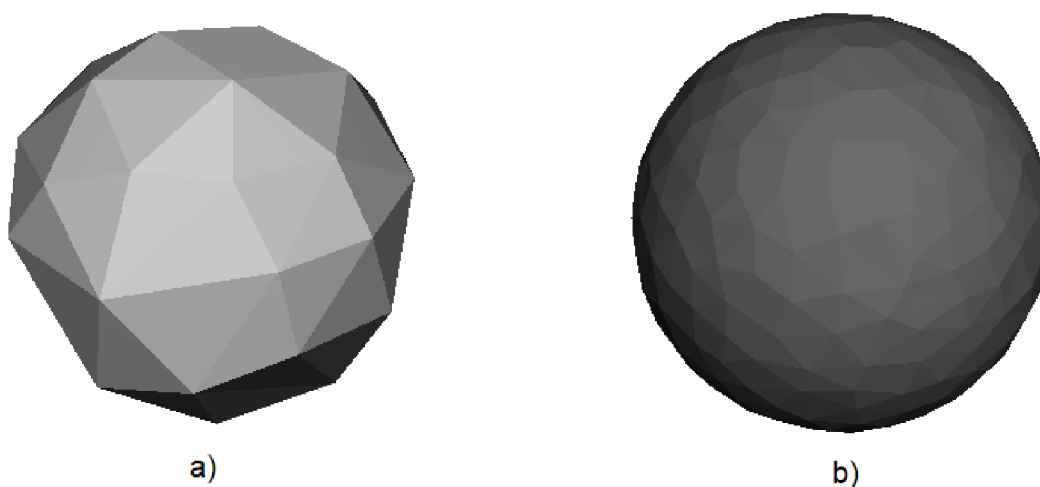


Obr. 4.4 Odstraňování podpor ze součásti zhotovené technologií FDM [40].

#### 4.2.1 Konverze dat

Jedním z kroků výrobního postupu je konverze CAD modelu do STL formátu, respektive jakéhokoliv formátu pro 3D tisk (OBJ, AMF, 3MF atd.). Tiskový soubor přenáší informace z CAD softwaru do tiskárny, přičemž rozdíl mezi jednotlivými druhy formátů je v množství přenesených informací (barva, materiál, textury atd.), proto je nutné pro danou aplikaci zvolit vhodný tiskový formát např. pro vícebarevný tisk je nezbytné použít formát, který je schopen přenést informaci o barvě modelu. V současnosti je nejpoužívanějším formátem STL, jehož historie sahá až k vynálezu první 3D tiskárny v roce 1987. Navzdory svým omezením (přenáší pouze geometrii modelu) zůstává nejvyužívanějším tiskovým formátem dodnes, a to zejména díky velké podpoře, která se mu dostává jak ze strany hardwaru, tak i softwaru [41, 42].

Soubor STL využívá pro popis povrchu tělesa trojúhelníkovou síť. Při exportování modelu z CAD aplikace lze upravit rozlišení této sítě, přičemž změnou rozlišení dojde ke změně počtu trojúhelníků popisujících model. Zvýšením množství trojúhelníků se docílí lepšího popisu povrchu, ale také se zvýší i velikost souboru, viz obr. 4.5 [41–44].

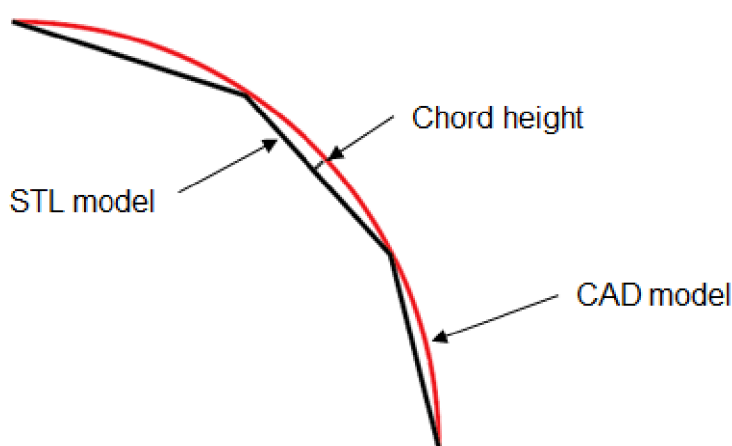


Obr. 4.5 Rozlišení trojúhelníkové sítě [44]: a) malé b) vysoké.

V případě, že se model exportuje v malém rozlišení, bude po tisku na něm jasně rozeznatelná síť trojúhelníků, což je ve většině případů nežádoucí. Nicméně se nízké rozlišení využívá při tvorbě tzv. low-poly modelů, u kterých se záměrně

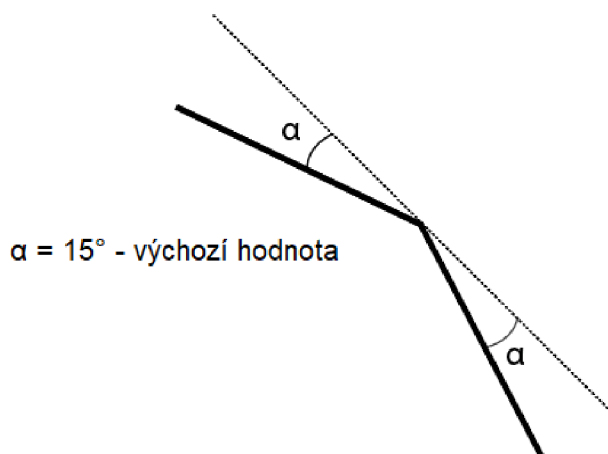
pomocí viditelné sítě vytváří digitální vzhled. Na druhou stranu není vhodné zvyšovat rozlišení nad určitou mez, protože další zvýšení nad toto omezení nepřinese vylepšení povrchu modelu (nelze tisknout velmi jemné detaily). Dojde pouze ke zvětšení STL souboru, což má za následek zhoršení manipulace a následné zpracování [41, 42, 45].

Různé CAD aplikace používají různé způsoby definování rozlišení, ale mezi dva hlavní parametry patří tzv. chord height a úhlová tolerance. První z nich udává maximální vzdálenost mezi povrchem původního modelu a povrchem STL modelu, přičemž menší vzdálenost lépe popisuje zakřivení povrchu, viz obr. 4.6. Pro volbu optimální hodnoty vzdálenosti se doporučuje rozmezí od 0,001 mm do 1/20 tloušťky tisknuté vrstvy. V tomto rozmezí je zajištěna optimální kvalita pro většinu aplikací v oblasti 3D tisku. Zvolení menší vzdálenosti než 0,001 mm nemá na kvalitu tisku žádný vliv, jelikož 3D tiskárny nejsou schopny tak malé detaily vytisknout [41, 42, 45].



Obr. 4.6 Chord height [44].

Druhým z hlavních parametrů je úhlová tolerance, která omezuje úhel mezi normály sousedících trojúhelníků, viz obr. 4.7. Obvykle se udává ve stupních, přičemž výchozí hodnota bývá 15 stupňů, ale některé CAD systémy označují tento parametr hodnotou od 0 do 1. Ve většině případů, kdy není potřeba dosažení kvalitnějších povrchů, se doporučuje volit výchozí hodnotu 15 stupňů [41, 42].

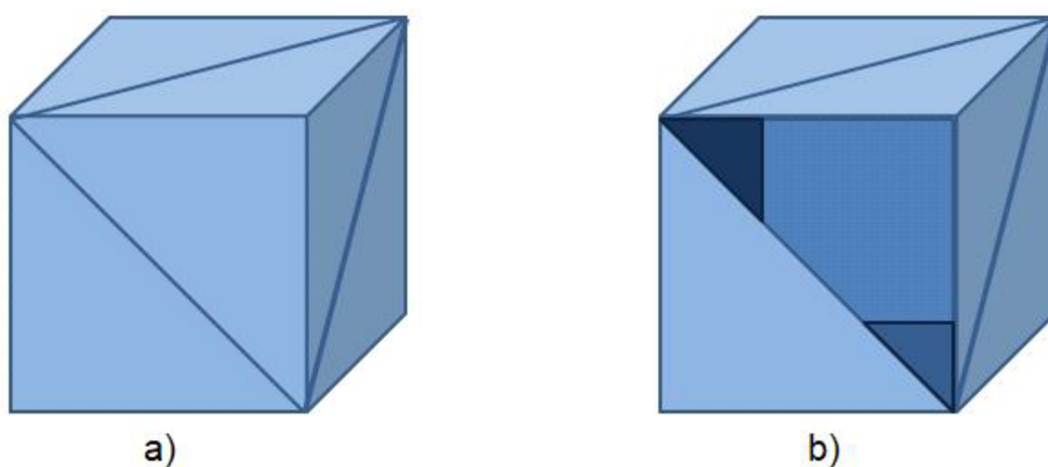


Obr. 4.7 Úhlová tolerance [44].

## 4.2.2 Chyby tiskového formátu

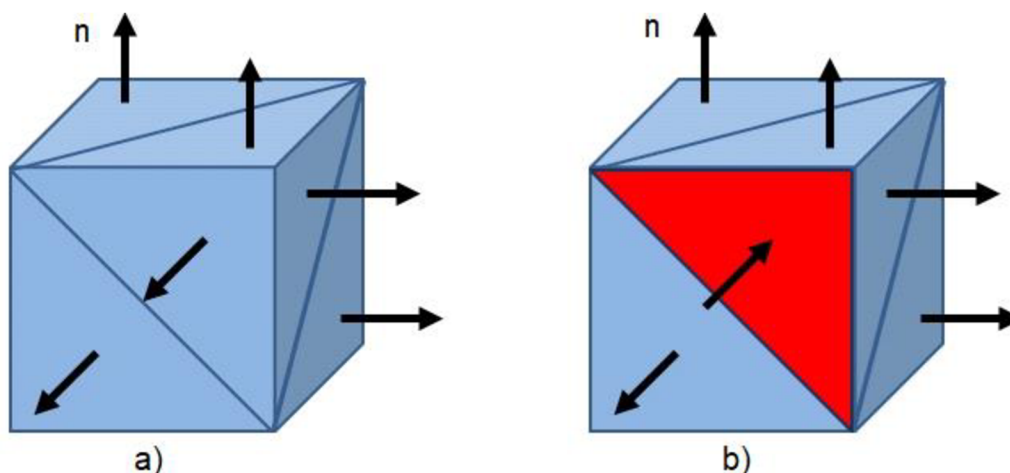
V průběhu konverze CAD modelu do STL formátu se mohou vyskytnout chyby, které negativně ovlivňují tisk součásti (geometrické nepřesnosti, špatné rozlišení, chybějící stěny atd.). Trojúhelníky, kterými je tvořena síť popisující povrch tělesa, se skládají ze 3 prvků – vrcholy (body), hrany (úsečky mezi body), stěny (plochy mezi úsečkami). Každý trojúhelník má také normálový vektor pro definování jeho vnější a vnitřní strany. Správně převedený model je složen z uzavřených, spojených a nepřekrývajících se trojúhelníků, kde každá hrana je součástí dvou trojúhelníků. Nicméně během převodu dat mohou často vznikat vady a nepřesnosti – díry v síti (chybějící trojúhelníky), nesouhlasná orientace normálových vektorů, protínající se (překrývající se) trojúhelníky, mezery mezi trojúhelníky, non-manifold hrany [46, 47].

Díry v síti jsou jeden z nejběžnějších problémů, se kterými se lze setkat, viz obr. 4.8. K této chybě dochází v případě, že sousedící trojúhelníky nesdílí dva společné vrcholy, což vede ke vzniku děr [46–48].



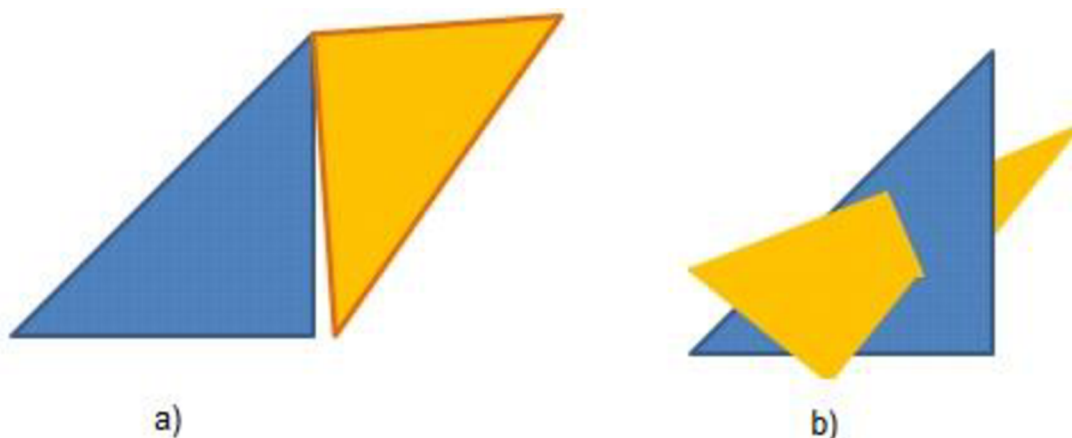
Obr. 4.8 STL model [48]: a) bez děr b) s dírou.

Nesouhlasná orientace normály trojúhelníku je další chybou, na kterou je možné narazit. Normálový vektor určuje, na jakou stranu se bude přidávat materiál, přičemž někdy může dojít k tomu, že normálový vektor změní svou orientaci, viz obr. 4.9. Následkem jsou chyby při tisku, jelikož tiskárna má problém s identifikováním vnitřní a vnější strany modelu [46–48].



Obr. 4.9 Normálové vektory trojúhelníků [48]: a) shodná orientace b) neshodná orientace.

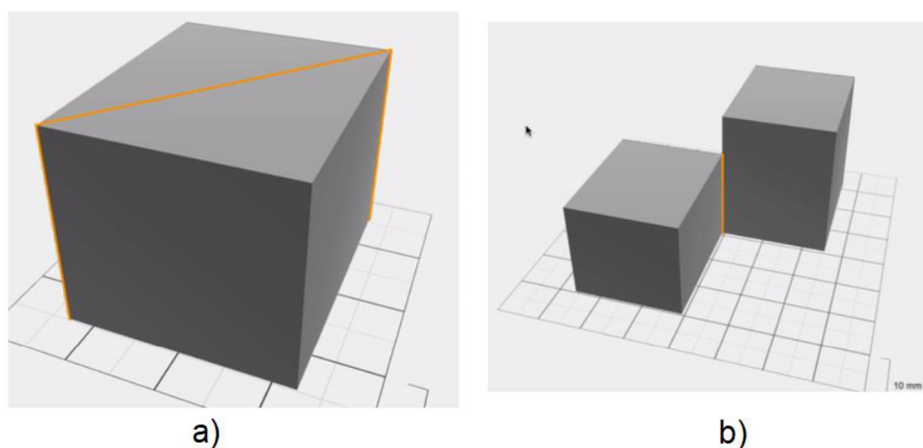
V případě, že nejsou všechny hrany trojúhelníků řádně spojeny, dochází ke vzniku mezer a protínajících se (překrývajících se) povrchů, viz obr. 4.10. Takové vadné hrany jsou nazývány „bad-edges“ a mohou vést ke vzniku tzv. non-manifold designu (nevytisknutelný model) [46, 47].



Obr. 4.10 Chyby trojúhelníkové sítě [48]: a) mezera b) protínající se trojúhelníky.

Problém s protínajícími se (překrývajícími se) trojúhelníky se objevuje, když se dvě stěny překrývají nebo křížují jedna druhou, k čemuž dochází z důvodu složité vnitřní geometrie modelu. Důsledkem je vznik chyb v průběhu rozvrstvení modelu v slicer programu. Obvykle je tato chyba lehce opravitelná sjednocením nebo odstraněním vadných trojúhelníků pomocí specializovaného softwaru. Nedojde-li k opravě chyby, prodlouží se doba tisku a zvýší se jeho náklady kvůli vyšší spotřebě materiálu [46, 47].

Další problém je vznik tzv. non-manifold hran. Jedná se o hrany, které spojují více než dvě stěny modelu, přičemž existují dva typy této chyby, viz obr. 4.11. První je přidáním povrchu uvnitř modelu, čímž ho rozdělí na dvě části a druhým typem je sdílení jedné hrany dvěma tělesy. Takto chybný design nezpůsobuje problémy během rozvrstvení modelu, avšak je nutné mu předejít, jelikož není zřejmý záměr designera (v případě sdílené hrany dvěma tělesy není jasné, zda mají být tyto tělesa spojeny nebo tisknuty každé zvlášť) [46, 49].



Obr. 4.11 Chyby modelu [49]: a) přidání povrchu uvnitř modelu b) sdílení jedné hrany dvěma tělesy.

## 4.3 Metody aditivní výroby

V dnešní době existuje několik druhů aditivních procesů, které používají rozdílné metody nanášení vrstev materiálu a liší se také v druhu použitého materiálu. Nové technologie se stále vyvíjejí, aby splnily zvyšující se nároky na dobu zhotovení výrobku a na použití nových materiálů. Normy ISO/ASTM 52900:2015 rozdělují aditivní procesy do 7 skupin, dle principu zhotovení jednotlivých vrstev, viz tab. 4.1. V této tabulce jsou uvedeny i základní metody výroby. V současné době existuje i mnoho dalších aditivních metod, ovšem jejich princip výroby součástí je podobný jako u základních. Některé aditivní technologie jsou blíže popsány v následujících kapitolách [32, 34].

Tab. 4.1 Skupiny technologií aditivní výroby.

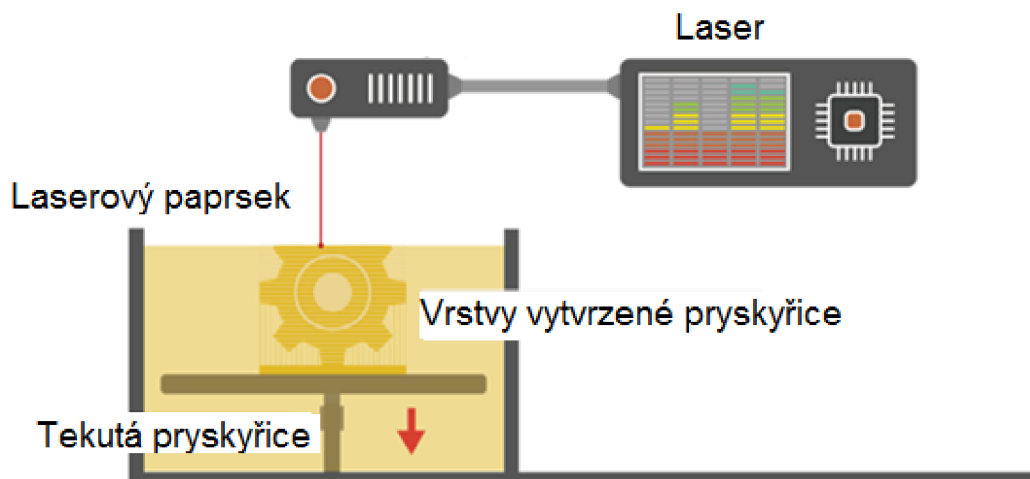
Kategorie	Metody	Materiál	Princip
<b>Binder Jetting</b> (Tryskání pojiva)	Binder Jetting	Kovy Písek	selektivní tryskání tekutého pojiva na práškový materiál
<b>Directed Energy Deposition</b> (Přímé energetické nanášení)	LENS, EBAM	Kovy	natavení a spojení materiálu termální energií
<b>Material Extrusion</b> (Vytlačování materiálu)	FDM	Plasty	vytlačování materiálu pomocí nahřáté trysky
<b>Material Jetting</b> (Nanášení tryskáním)	Material Jetting	Plasty	selektivní tryskání kapek materiálu, které se vytvrdí pomocí UV záření
	DOD	Vosk	
<b>Powder Bed Fusion</b> (Spékání práškové vrstvy)	SLS, MJF	Plasty	selektivní natavení práškového materiálu termální energií
	DMLS/SLM, EBM	Kovy	
<b>Sheet Lamination</b> (Laminace vrstev)	LOM	Papír Plasty	spojení jednotlivých tenkých "listů" materiálu
<b>Vat Photopolymerization</b> (Fotopolymerizace)	SLA, DLP, CLIP	Plasty	selektivní vytvrzení tekutého fotopolymeru

### 4.3.1 Stereolitografie

Princip technologie Stereolitografie (SLA) spočívá v reakci laserového paprsku s tekutou pryskyřicí, čímž dochází k vytvrzování pryskyřice v místě dotyku laseru ve vrstvách dle tvaru řezu STL modelu. Laser lze zaostřit velice jemně, což umožňuje vytvářet velice přesné a detailní výrobky. Ostatní plochy, kde nedošlo k vytvrzení, zůstávají tekuté. Jakmile se dokončí jedna vrstva, platforma se sníží o výšku následující vrstvy a postup se opakuje, viz obr. 4.12. Po dokončení celého dílu, se součást vytáhne z nádoby a umyje se od nevytvrzené pryskyřice [27, 34, 50–53].

Díly vytvořené stereolitografií mají izotropní mechanické vlastnosti. Je to z toho důvodu, že při prvním dotyku pryskyřice s laserem nenastane úplné vytvrzení a následujícím průchodem laseru dojde k tomu, že se již částečně ztuhlé vrstvy dodatečně sjednotí s nově nanesenou vrstvou. Proces vytvrzování pokračuje i po dokončení tisku a k dosažení lepších mechanických vlastností se pak ještě nechávají výrobky vytvrdit v UV pecích, čímž se značně zlepší pevnost a teplotní odolnost, ale dojde také k jejich zkřehnutí. Ovšem dlouhodobé vystavení UV záření

znehodnocuje výrobky. Postupem času ztrácejí své fyzikální vlastnosti a mění se také jejich vzhled. Ochranou je vhodná povrchová úprava dílu [27, 34, 50–53].



Obr. 4.12 Schéma metody Stereolitografie [34].

Díky materiálům, které tato metoda využívá, jsou výrobky křehčí, než součásti zhotovené např. technologií Fused Deposition Modeling, a proto se nepoužívají pro výrobu funkčních prototypů. Vlastnosti dílů zhotovených SLA technologií je dělájí ideálními pro vizuální prototypy, ukázkové díly a prototypy pro omezené funkční testování. Souhrn vlastností je uveden v tab. 4.2 [27, 34, 50–53].

Tab. 4.2 Vlastnosti technologie Stereolitografie [27, 51, 50].

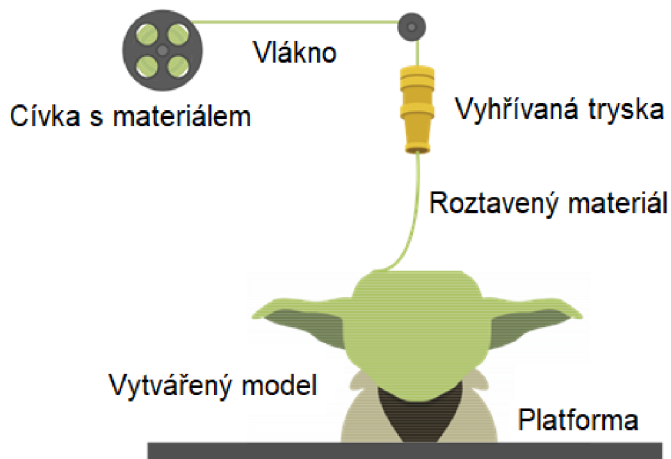
<b>Vlastnost</b>	
<b>Typ materiálu</b>	tekutý
<b>Používané materiály</b>	Accura 25, Accura 60, Somos NeXt, ...
<b>Maximální velikost výrobku</b>	150 x 75 x 50 cm
<b>Minimální tloušťka vrstvy</b>	0,025 mm
<b>Výrobní tolerance</b>	0,12 mm
<b>Rychlost výroby</b>	průměrná
<b>Podpory</b>	vyžadovány
<b>Kvalita povrchu</b>	vysoká
<b>Funkční testování</b>	omezené
<b>Pevnost</b>	nízká

### 4.3.2 Fused Deposition Modeling

Výroba součástí technologií Fused Deposition Modeling (FDM) je založena na roztavení plastového vlákna, které je pak vytlačováno tryskou vrstvu po vrstvě na platformu podle tvaru řezu digitálního modelu. Vlákno materiálu je navinuto na cívce, ze které se postupně dostává do trysky, kde se pomocí odporových ohřivačů dosáhne bodu tání. Díky tomu materiál snadno proteče tryskou, spojí se s předešlou vrstvou, začne chladnout a tvrdnout. Chlazení materiálu lze urychlit pomocí větráků připevněných na trysce. Pro dokončení celé vrstvy musí tryska provést několik průchodů, poté se platforma sníží a začne se vytvářet další vrstva, viz obr. 4.13 [27, 34, 54, 55].

Některé komplikovanější výrobky, především díly s převisy, vyžadují stavbu podpor. Při návrhu designu součástí je nutné se snažit o jejich minimalizaci, jelikož povrchy zhotovené na podporách mají obecně nižší kvalitu, než zbytek součásti.

V případě, že jsou podpory ze stejného materiálu jako součást, jsou po dokončení tisku odlomeny. Ovšem technologie FDM dovoluje použití druhého v kapalině rozpustného materiálu na stavbu podpor. Tento materiál umožňuje jejich snadné odstranění, čímž zlepšuje kvalitu povrchu, ale jelikož je potřeba komplikovanějšího zařízení (dvojitě vytlačování) a speciálního materiálu, zvyšují se tím celkové náklady na tisk [27, 34, 54, 55].



Obr. 4.13 Schéma metody FDM [34].

Mezi hlavní přednosti této aditivní metody patří možnost použití široké škály termoplastických materiálů (ABS, PC, PVC, PP atd.). Výběr materiálu ovlivňuje mechanické vlastnosti a rozměrovou přesnost součásti, ale také i cenu tisku. U dílů zhotovených tímto procesem jsou většinou vidět jednotlivé vrstvy naneseného materiálu, proto je nutná povrchová úprava (broušení, leštění, lakování, pokovování) k dosažení požadované kvality a vzhledu. Nevýhodou této výrobní metody je malá rozměrová přesnost vyrobených součástí oproti jiným aditivním procesům. Další vlastnosti jsou uvedeny tab. 4.3 [27, 34, 54, 55].

Tab. 4.3 Vlastnosti technologie FDM [27, 54, 55].

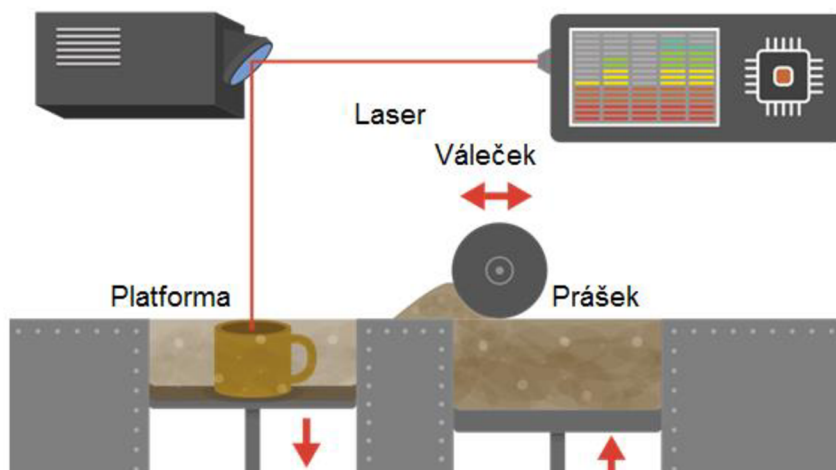
Vlastnost	
Typ materiálu	pevný
Používané materiály	PC-ABS, ULTEM 1010, PC, ABSi, PC-ISO, ...
Maximální velikost výrobku	100 x 100 x 100 cm
Minimální tloušťka vrstvy	0,050 mm
Výrobní tolerance	0,2 mm
Rychlost výroby	pomalá
Podpory	nejsou vždy vyžadovány
Kvalita povrchu	nízká (hrubý povrch)
Funkční testování	omezené
Pevnost	nízká

#### 4.3.3 Selective Laser Sintering

Tento výrobní proces je podobný jako u metody Stereolitografie. Metoda Selective Laser Sintering (SLS) využívá pohyblivý laserový paprsek k selektivnímu spečení materiálu ve formě prášku, který může být z plastu nebo také kovu. Díly jsou vytvářeny na pohyblivé platformě, která se po dokončení vrstvy posune dolů o vzdálenost odpovídající výšce vrstvy. Další prášek je nahnut na již zpevněnou



vrstvu a znovu je spečen. Tento proces je opakován až do zhotovení celé součásti, viz obr. 4.14 [27, 34, 56, 57].



Obr. 4.14 Schéma metody SLS [34].

U tohoto výrobního postupu je nezbytné, aby byla zachována potřebná teplota, jak stavebního prostoru, tak i práškového zásobníku, a to těsně pod teplotou tavení práškového materiálu. Po dokončení tisku je zhotovený díl celý obklopen v nespečeném prášku a před jeho vyjmutím je nutné počkat, než vychladne práškový zásobník. Po odebrání z platformy jsou součásti umyty od zbytků usazených částic prášku a jsou připraveny na dokončovací operace. Zbytky práškového materiálu, u kterého nedošlo ke zpevnění, lze opět použít [27, 34, 56, 57].

Jednou z výhod této technologie je, že není nutné stavět podpory, jelikož nezpevněný prášek dostatečně podpírá převisy a je tak možné touto metodou zhotovit velmi složité tvary. Díly vyrobené tímto výrobním postupem jsou pevnější, než u metod Stereolitografie a Digital Light Processing, ovšem nejsou tak přesné a mají méně kvalitní povrch. Souhrn vlastností je uveden v tab. 4.4 [27, 34, 56, 57].

Tab. 4.4 Vlastnosti technologie SLS [27, 56, 57].

Vlastnost	
Typ materiálu	prášek
Používané materiály	Nylon 12 PA, Nylon 12 GF, ...
Maximální velikost výrobku	75 x 55 x 55 cm
Minimální tloušťka vrstvy	0,100 mm
Výrobní tolerance	0,3 mm
Rychlost výroby	pomalá
Podpory	nejsou vyžadovány
Kvalita povrchu	dobrá
Funkční testování	omezené
Pevnost	střední

#### 4.3.4 Multi Jet Fusion

Aditivní technologie Multi Jet Fusion (MJF) je v mnohém podobná s metodou Selective Laser Sintering. U obou ze začátku procesu dochází k nahrnutí práškového materiálu, který je nahřátý na teplotu těsně pod bodem tavení, na pohyblivou platformu. Následně jsou na vrstvu prášku pomocí tiskové hlavy nanесeny dvě činidla. Na tiskové hlavě se nachází tryska, která pokrývá celou šířku pracovní plochy, což

znamená, že stačí pouze jeden průchod tiskové hlavy k nanesení činidel na celou plochu. Tím je dosaženo toho, že počet součástí, který se tiskne najednou, neovlivňuje čas tisku [58–60].

Jedno z nanesených činidel (Fusing Agent) se aplikuje na místa pracovní plochy, kde má dojít ke spojení částic materiálu, zatímco druhé činidlo (Detailing Agent) zlepšuje kvalitu povrchu součástí. Následně je celá pracovní plocha vystavena infračervenému záření, což způsobí spečení prášku. Tento proces se opakuje až do zhotovení celého dílu. Po konci tisku se nechá pracovní prostor vychladnout a následně se součásti, které jsou ponořeny v prášku, vyjmou a očistí od zbytků práškového materiálu [58–60].

Jednou z největších předností této metody je, že platforma společně se zásobníkem prášku tvoří oddělenou jednotku. Po dokončení tisku lze tuto jednotku vyměnit za novou a ihned začít s novým tiskem, zatímco vyjmutá jednotka chladne. Díky tomu je tato technologie jednou z nejproduktivnějších na trhu [58–60].

Společnost HP nabízí dokončovací stanici, která zrychluje ochlazování vyjmuté jednotky a umožňuje efektivnější očištění součástí od zbytku prášku. U metody MJF lze recyklovat kolem 85 % materiálu, kdežto u technologie Selective Laser Sintering je možno recyklovat jenom 50 % [58–60].

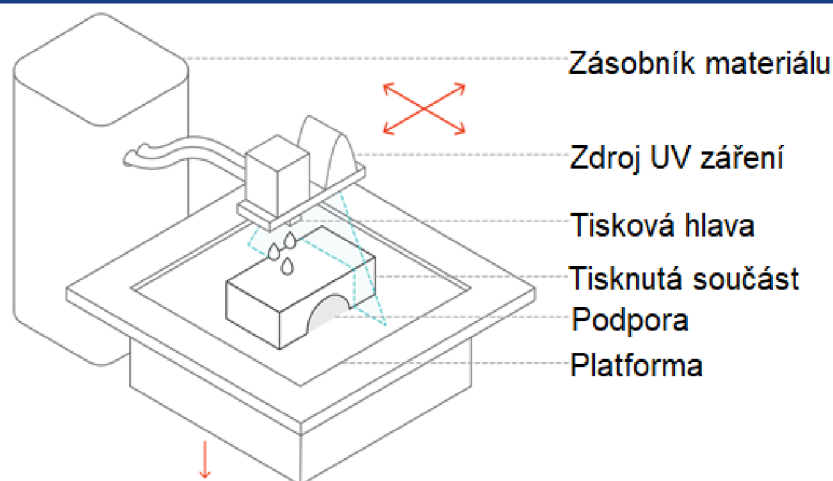
V současné době je jediným dostupným materiálem pro tento výrobní proces polyamid 12 (PA 12), díky kterému mají díly vysokou mechanickou a teplotní odolnost, což je dělá vhodnými pro funkční prototypy a finální součásti. Ovšem lze očekávat vývoj nových materiálů pro tento proces, stejně tak jako možnost tisku z více materiálů. Souhrn vlastností je uveden v tab. 4.5 [58–60].

Tab. 4.5 Vlastnosti technologie MJF [27, 59].

Vlastnost	
Typ materiálu	prášek
Používané materiály	PA 12
Maximální velikost výrobku	38 x 28,5 x 38 cm
Minimální tloušťka vrstvy	0,070 mm
Výrobní tolerance	0,2 mm
Rychlost výroby	vyšoká
Podpory	nejsou vyžadovány
Kvalita povrchu	středně vysoká
Funkční testování	vhodné pro výrobu
Pevnost	středně vysoká

### 4.3.5 Material Jetting

Podstata procesu Material Jetting (někdy nazývaný také Polyjet) spočívá v postupném tryskání malých kapiček tekuté pryskyřice, které se následně v reakci s UV zářením vytvrdí. Nejprve je ovšem potřeba, aby fotopolymer dosáhl optimální viskozity, čehož se dosáhne zahřátím na teplotu mezi od 30 do 60 °C. Následně se tisková hlava začne pohybovat a z trysky začnou tryskat stovky kapiček na platformu. Zdroj UV záření je připevněn na tiskové hlavě a spolu s ní se pohybuje nad platformou. Jakmile je vrstva dokončena, platforma se sníží a proces se opakuje, viz obr. 4.15 [27, 61, 62].



Obr. 4.15 Schéma metody Material Jetting [61].

Při tomto procesu lze použít více tiskových hlav upevněných vedle sebe, což umožňuje vytvořit celou vrstvu jedním průchodem a také tvorbu součástí z více materiálů najednou. Lze tedy zhotovit díl, který má ve svých různých částech jiné mechanické vlastnosti a jinou barvu [27, 61, 62].

Stejně jako u metody Stereolitografie je zde využit mechanismus fotopolymerizace, což způsobuje u součástí dlouhodobě vystavených UV záření degradaci. Tato technologie umožňuje tvorbu velice nízkých vrstev. Díky tomu lze vytvářet díly s velice kvalitním povrchem, ale s horšími mechanickými vlastnostmi než u jiných aditivních metod, což je dělá vhodnými pro vizuální prototypy. Další vlastnosti jsou uvedeny v tab. 4.6 [27, 61, 62].

Tab. 4.6 Vlastnosti technologie Material Jetting [27, 61, 62].

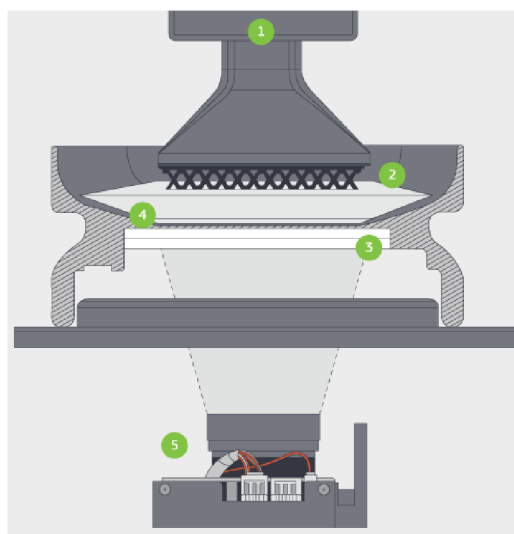
Vlastnost	
Typ materiálu	tekutý
Používané materiály	VeroWhitePlus, Digital ABS RGD5160-DM,...
Maximální velikost výrobku	100 x 80 x 50 cm
Minimální tloušťka vrstvy	0,016 mm
Výrobní tolerance	0,05 mm
Rychlost výroby	vysoká
Podpory	vyžadovány
Kvalita povrchu	vysoká
Funkční testování	omezené
Pevnost	nízká

#### 4.3.6 Carbon Digital Light Synthesis

Tato metoda využívá technologii Continuous Liquid Interface Production (CLIP) vlastněnou společností Carbon, jejíž podstatou je fotochemický proces. Skrz kyslík propustné a průhledné okno jsou pomocí zdroje UV záření promítány obrazy modelu do nádrže s tekutou pryskyřicí, která se v reakci s UV zářením zpevňuje, viz obr. 4.16 [63–67].

Plynule jsou promítány obrazy vrstev celého modelu a platforma, na kterou se součást zhotovuje, se zvedá, dokud se tisk nedokončí. Na rozhraní mezi oknem a již zpevněnou součástí se nachází tzv. mrtvá zóna. Jedná se o velmi tenkou vrstvu tekuté pryskyřice bohatou na kyslík, ve které nedochází ke zpevnění materiálu, čímž

zabraňuje ztuhnutí materiálu přímo na okně a vytváří místo pro natečení nového materiálu pod zpevněný model [63–67].



Obr. 4.16 Schéma metody Digital Light Synthesis (1 – platforma, 2 – tekutá pryskyřice, 3 – kyslík propustné okno, 4 – mrtvá zóna, 5 – zdroj záření) [63].

Tato aditivní technologie patří mezi nejrychlejší na trhu. Na rozdíl od ostatních aditivních technologií, kde jsou součásti tvořené po vrstvách, u této metody díly plynule „rostou“ bez viditelných vrstev, díky čemuž mají vysokou kvalitu povrchu a díky následnému tepelnému zpracování lze dosáhnout pevnosti srovnatelné s díly vyrobenými technologií vstřikování [63–67].

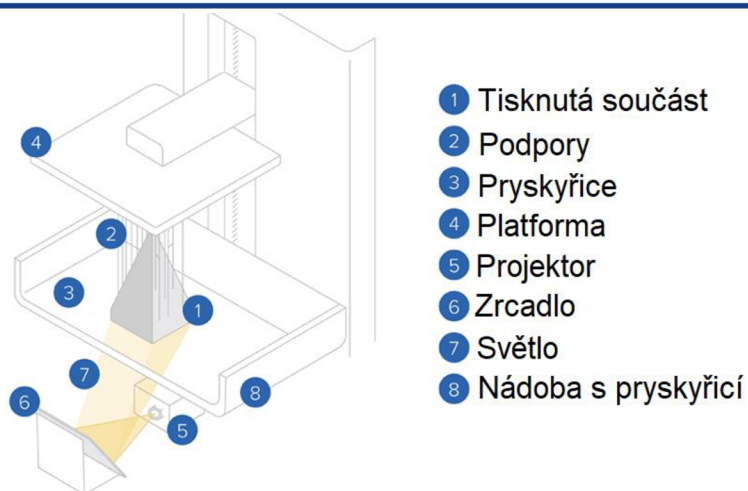
Dále pak součásti vykazují izotropní mechanické vlastnosti, což není u aditivních procesů běžné. Mezi výhody patří i široká škála použitelných materiálů (RPU, EPU atd.), které jsou srovnatelné s materiály používanými u vstřikování (ABS, PC). Další vlastnosti jsou uvedeny v tab. 4.7 [63–67].

Tab. 4.7 Vlastnosti metody Digital Light Synthesis [27, 68, 69].

<b>Vlastnost</b>	
<b>Typ materiálu</b>	tekutý
<b>Používané materiály</b>	RPU, FPU, EPX, ...
<b>Maximální velikost výrobku</b>	18,9 x 11,8 x 32,6 cm
<b>Minimální tloušťka vrstvy</b>	0,1 mm
<b>Podpory</b>	nejsou vždy vyžadovány
<b>Kvalita povrchu</b>	výborná
<b>Funkční testování</b>	vhodné pro výrobu
<b>Pevnost</b>	vysoká

#### 4.3.7 Digital Light Processing

Tato technologie k tvorbě součástí využívá proces fotopolymerizace jako například metoda Stereolitografie. Na rozdíl od Stereolitografie však používá technologie Digital Light Processing (DLP) zdroj záření, který je schopný pokrýt celou plochu nádoby najednou, viz obr. 4.17. Princip spočívá v projekci obrazu vrstvy do mělké nádoby s průhledným dnem, která je naplněna tekutou pryskyřicí. V první fázi tisku je pohyblivá platforma umístěna co nejbližší u dna nádoby. Následně je promítnut tvar vrstvy modelu přes průhledné dno nádoby, což má za následek zpevnění vrstvy materiálu [34, 67, 70, 71].



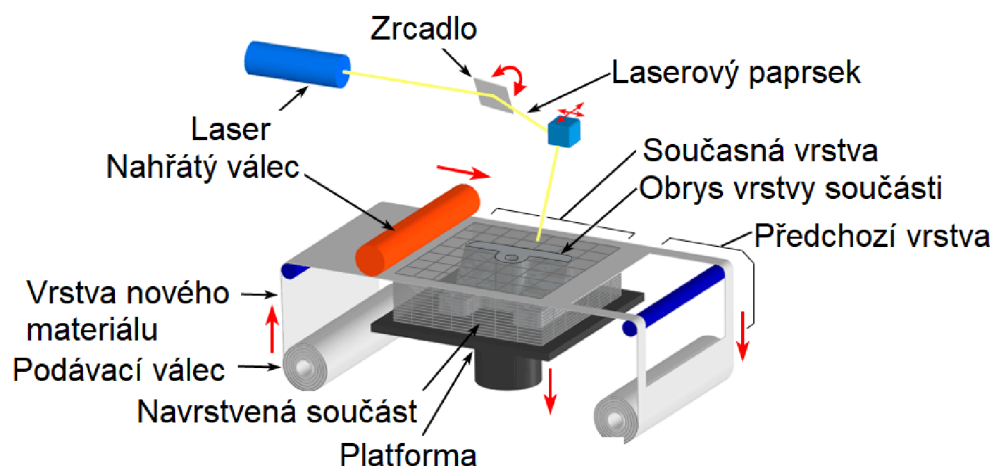
Obr. 4.17 Schéma metody DLP [71].

Po ztuhnutí vrstvy se platforma zvedne a začne tvorba nové vrstvy. Celý proces se opakuje, dokud není zhotovena celá součást. Nezpevněná pryskyřice může být použita na výrobu dalších dílů [34, 67, 70, 71].

Stejně jako metoda SLA, vytváří technologie DLP velice přesné součásti s kvalitním povrchem a používá také stejné materiály, a proto se díly zhotovené touto metodou používají pro stejné aplikace (vizuální prototypy, ukázkové díly). Ovšem oproti technologii SLA je doba tisku kratší, jelikož lze vytvrdit celou vrstvu najednou. Ostatní vlastnosti této metody jsou shodné s metodou SLA [34, 67, 70, 71].

#### 4.3.8 Laminated Object Manufacturing

Princip metody Laminated Object Manufacturing (LOM) spočívá ve vyřezávání obrysu do tenkého materiálu (fólie) laserem. Součást je tvořena na platformě, na kterou se dostává fólie z podávacího válce. Fólie je potažená lepidlem, které následně zahřátý válec roztaví a slepí s předešlou vrstvou. Laser vyřeže potřebný tvar vrstvy modelu a do zbytku fólie vytvoří mřížku, viz obr. 4.18 [34, 72, 73].



Obr. 4.18 Schéma metody LOM [74].

Tato metoda nevyžaduje stavbu podpor, jelikož místa fólie, kde nevzniká součást, dostatečně podpírají vytvářený model. Jakmile je vrstva hotova, platforma se sníží o tloušťku fólie a proces se opakuje. Po dokončení procesu se na platformě nachází

vytisknutá součást a bloky přebytečného materiálu, které se musí odstranit, aby se dala finální součást vyjmout [34, 72, 73].

U této technologie lze použít mnoho druhů materiálů. Obvykle se používá papír, ale lze vytvářet součásti také z plastů nebo kovů. Ovšem použití kovových materiálů není moc běžné, protože jejich řezání je komplikované. LOM se hlavně používá na výrobu prototypů, z důvodu své nízké ceně a vysoké rychlosti. Vlastnosti této metody jsou uvedeny v tab. 4.8 [34, 72, 73].

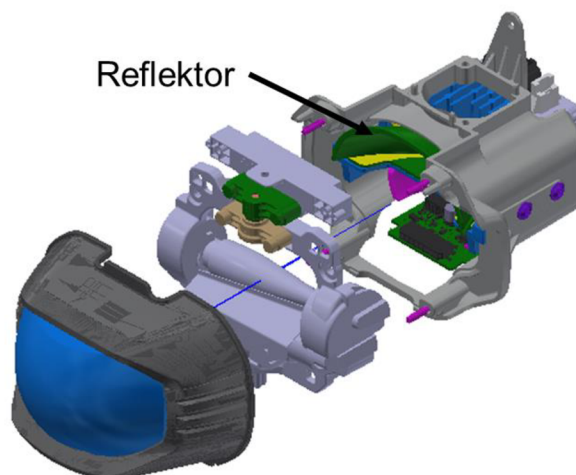
Tab. 4.8 Vlastnosti metody LOM [74].

<b>Vlastnost</b>	
<b>Typ materiálu</b>	pevný (tenké vrstvy)
<b>Používané materiály</b>	PVC, papír, železné kovy, neželezné kovy, keramika
<b>Maximální velikost výrobku</b>	82 x 55 x 50 cm
<b>Minimální tloušťka vrstvy</b>	0,05 mm
<b>Výrobní tolerance</b>	0,1 mm
<b>Rychlost výroby</b>	vysoká
<b>Podpory</b>	nejsou vyžadovány
<b>Kvalita povrchu</b>	nízká (hrubý povrch)
<b>Funkční testování</b>	omezené

Jedná se o jednoduchý proces, který je levný a rychlý. Přesnost součástí závisí na druhu použitého materiálu. V porovnání s ostatními aditivními metodami se nejedná o velmi přesnou technologii. Navíc odstraňování bloků nepoužitého materiálu je poměrně náročný proces, který může poškodit hotovou součást [34, 72, 73].

## 5 VÝROBA SOUČÁSTI

Součástí práce je výroba reflektoru, ze kterého se skládá modul světlometu, viz obr. 5.1, pomocí aditivní technologie s cílem ověřit vhodnost výrobní metody pro tuto aplikaci.



Obr. 5.1 Digitální model modulu světlometu.

Bylo zhotoveno několik vzorků reflektoru z různých materiálů s využitím FDM technologie na dvou rozdílných typech 3D tiskárny – stolní a průmyslová. Přímo ve firmě Varroc Lighting Systems s.r.o. byla k dispozici stolní 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3, která je využívána v oddělení výzkumu a vývoje. Průběh tisku spolu s úpravou modelu pro výrobu vzorků na této tiskárně je popsán dále v práci. Kusy z průmyslové tiskárny byl poskytnuty polským dodavatelem Vshaper Sp. z.o.o.

### 5.1 Rozbor součásti

Reflektor je díl, jehož funkcí je patřičné usměrnění paprsků od světelného zdroje. Mezi jeho části patří odrazná plocha, otvory pro šrouby a pro vymezení polohy v modulu, viz obr. 5.2. Kvůli složité geometrii reflektoru jsou uvedeny rozměry ve třech osách (délka x šířka x výška) – 39,2 x 83,2 x 30,8 mm.

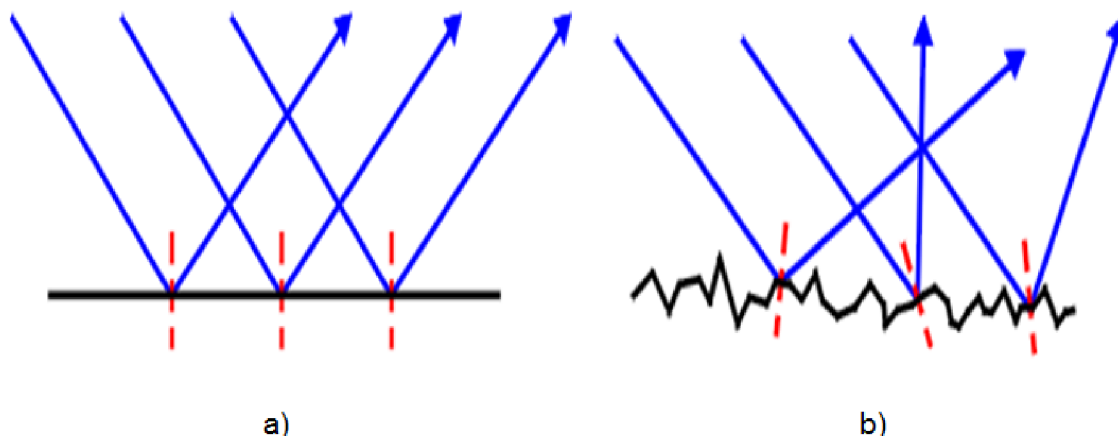


Obr. 5.2 Stávající reflektor.

V minulosti se pro výrobu reflektorů používal ocelový plech, ale v dnešní době se již vyrábí z polymeru nebo hliníku. Pro jeho správné fungování je nezbytné, aby měl následující vlastnosti [75]:

- vysoká odrazivost,
- rozměrová přesnost,
- tepelná odolnost.

První ze zmíněných vlastností je závislá zejména na kvalitě a materiálu optické plochy. Jedná se o vlastnost, která popisuje poměr množství energie odraženého světla od povrchu k množství energie dopadajícího světla. Pro odrazení co největšího počtu světelných paprsků je důležité, aby byla odrazná plocha reflektoru velice hladká (minimální drsnost povrchu). Při dopadu paprsků na rozhraní dvou prostředí, dochází k jejich odrazu, který je závislý na mikrostruktuře povrchu. K dosažení odrazu všech paprsků do jednoho směru je nutné, aby povrch reflektoru byl co nejvíce hladký. Ideální případ maximálně hladkého povrchu se označuje jako spekulární (zrcadlový). V případě drsného (zrnitého) povrchu, dochází k odrazu paprsků různými směry a světlo se rozptyluje. Takový povrch se nazývá difúzní, viz obr. 5.3. Při výrobě reflektorů je tedy nutné dbát na vytvoření co nejkvalitnější optické plochy [9, 11, 75].



Obr. 5.3 Optický povrch [9]: a) spekulární b) zrnitý.

Dále má na odrazivost reflektoru značný vliv materiál optické plochy. Pro tento účel se na optickou plochu reflektoru nanáší tenká vrstva hliníku, který má odrazivost kolem 85 %. Další hodnoty odrazivosti pro různé materiály jsou uvedeny v tab. 5.1. Ovšem tato hliníková vrstva snadno podléhá oxidaci, proto se jako ochrana používá vrstva polymeru tzv. plasilu (hexametyldisiloxan), pro jejíž nanášení se využívá vakuový proces [9, 11, 75].

Tab. 5.1 Odrazivost různých materiálů [9].

Materiál	Odráživost [%]
Oxid hořečnatý	95
Hliníkem pokovený reflektor	85
Stříbrná barva	40
Povrch vozovky (světly)	20-30

Další důležitou vlastností je rozměrová přesnost optické plochy. Jelikož je vyráběný reflektor součástí LED modulu světloometu, je nutné, aby odrážel co největší množství světelných paprsků do ohniska čočky. Malá výrobní přesnost

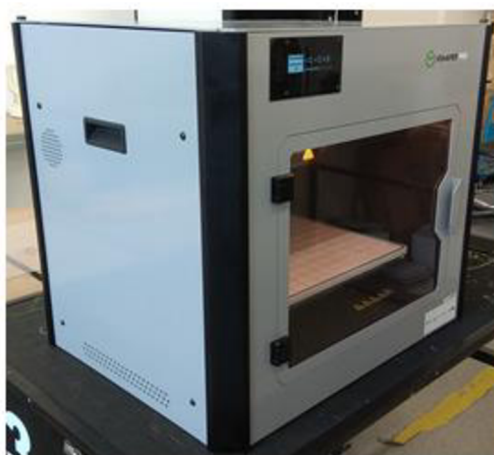


odrazné plochy má za následek vychýlení paprsků, čímž dojde ke snížení celkového světelného výstupu modulu. Proto je nezbytné při výrobě dbát na správnou geometrickou přesnost [75].

Při provozu světelný zdroj produkuje značné množství tepla. Moderní LED diody vytváří méně tepla ve směru svícení, než směrem dozadu k chladiči. V okolí LED diody lze naměřit až 125 °C, avšak v prostoru světloometu se pohybuje teplota kolem 85 °C. Mezi další zdroje tepla patří řídicí jednotky světloometu a sluneční energie, která přes čiré sklo ohřívá díly světloometu. Je proto nutné, aby nejenom reflektor, ale všechny části světloometu byly odolné proti tepelné deformaci [75].

## 5.2 Použité 3D tiskárny

Výroba vzorků ve firmě Vshaper Sp. z.o.o probíhala na průmyslové 3D tiskárně Vshaper PRO, která je často využívána v lékařství, automobilovém a leteckém průmyslu, kde našla uplatnění jako alternativa výroby kovových součástí, viz obr. 5.4 [76].



Obr. 5.4 Vshaper PRO.

Celistvá konstrukce, vyhřívaná platforma a uzavřená komora jsou prvky zaručující plnou kontrolu tisku. Tiskárna také disponuje přídatným nouzovým napájením, které zajišťuje nepřetržitý provoz. Pro díly zhotovené na tomto zařízení je typická vysoká odolnost při nárazu, natahování nebo ohýbání. Vybrané parametry této tiskárny jsou uvedeny v tab. 5.2. Kompletní technická specifikace se nachází v příloze 1 [76].

Tab. 5.2 Parametry 3D tiskárny Vshaper PRO [76].

<b>Technické specifikace</b>	
<b>Tisková technologie</b>	FDM
<b>Pracovní prostor</b>	270 x 270 x 200 mm
<b>Extruder</b>	dva výměnné extrudery VPREC-PRO a VPREC-SINGLE
<b>Průměr trysky</b>	standard: 0.4 mm tryska (volitelné: 0.2, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2)
<b>Konstrukce</b>	uzavřená (izolovaná, s konstantní teplotou uvnitř)
<b>Vyhřívání platformy</b>	ano (teplota platforma až do 150°C)
<b>Vyhřívání pracovní komory</b>	ano (aktivní vyhřívání až do 70°C)
<b>Doporučene materiály pro VPREC-PRO</b>	PEEK, PEI, PPSU
<b>Doporučene materiály pro VPREC-SINGLE</b>	PLA, ABS, PMMA, PA, PC, PET-G, HIPS, PVA

Polská firma Vshaper Sp. z.o.o. nabízí služby v oblasti 3D tisku s dvacetiletou zkušeností v oboru. Ve spolupráci s výrobními společnostmi vytvářejí průmyslové tiskárny dle potřeb a očekávání zákazníků. Zařízení firmy Vshaper nacházejí uplatnění v automobilovém a slévárenském průmyslu, v kosmickém výzkumu, medicíně, výzkumných ústavech a vysokých školách [77].

Druhým z použitých zařízení pro výrobu reflektoru byla stolní 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3, která byla uvedena na trh v roce 2017, viz obr. 5.5 (v dnešní době se již prodává novější model Original Prusa i3 MK3S). Jedná se o stolní 3D tiskárnu a přímého nástupce modelů MK2 a MK2s [78].



Obr. 5.5 Original Prusa i3 MK3 [80].

V té době to bylo velice pokrokové zařízení nabízející mnoho inteligentních funkcí ke zjednodušení 3D tisku, jak pro naprosté začátečníky, tak i amatérské a profesionální uživatele. Model Original Prusa i3 MK3 je kompatibilní s různými slicer programy (Cura, Simplify 3D, PrusaSlicer atd.) a obsahuje množství senzorů k zachování bezproblémového průběhu tisku, což z něj dělá „chytrou tiskárnu“. Jedním z nich je např. senzor, který monitoruje přítomnost a pohyb vlákna. V případě, že se blíží konec vlákna, zastaví tisk, aby se mohla provést výměna cívky. Dále tento model disponuje senzorem pro detekci ucpané trysky a mnohými dalšími prvky. Parametry této tiskárny jsou uvedeny v tab. 5.3 [78].

Tab. 5.3 Parametry 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3 [81].

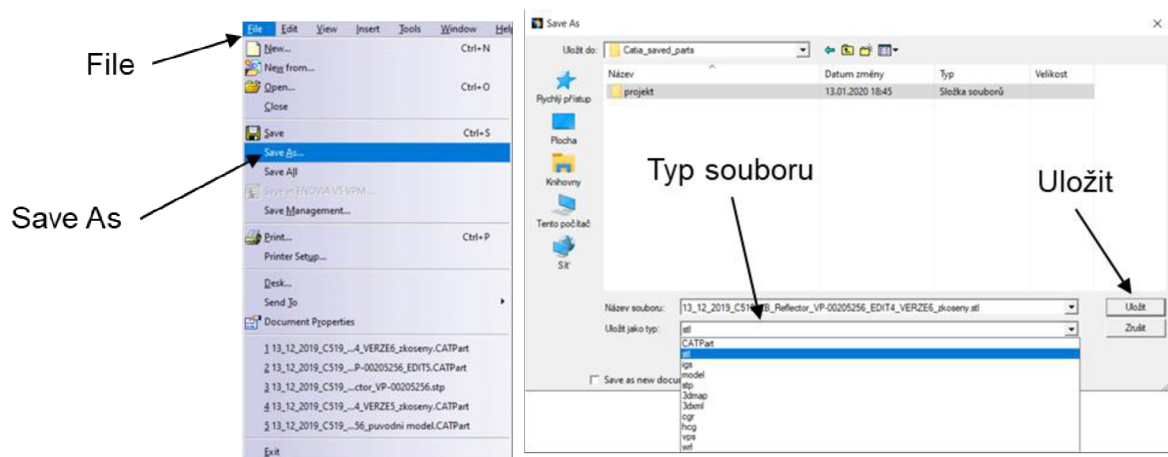
<b>Technické specifikace</b>	
<b>Tisková technologie</b>	FDM
<b>Pracovní prostor</b>	250 x 210 x 210 mm
<b>Výška vrstvy</b>	0,05 - 0,32 mm
<b>Průměr trysky</b>	Standard: 0.4 mm tryska (lehce vyměnitelná)
<b>Konstrukce</b>	otevřená
<b>Vyhřívání platformy</b>	ano
<b>Podporované materiály</b>	PLA, ABS, PET, HIPS, Flex PP, Ninjaflex,...
<b>Maximální rychlost tisku</b>	200+ mm/s
<b>Příkon</b>	200 W max

Tiskárna Original Prusa i3 MK3 je zařízení od firmy Prusa Research a.s. Jedná se o českou firmu založenou v roce 2012 Josefem Průšou. Mezi jejich nejznámější produkty patří design Prusa i3, který se stal jedním z nejpopulárnějších konstrukcí pro FDM tiskárny, jenž lze nalézt v mnoha provedeních po celém světě. V dnešní době pracuje v této firmě přes 400 zaměstnanců a měsíčně rozesílá kolem 6 000 tiskáren

do celého světa. V roce 2018 se Prusa Research a.s. stal nejrychleji rostoucí technologickou firmou ve střední Evropě. Produkty této firmy sbírají ocenění všude ve světě, přesto jsou stále open-source – všechny zdrojové kódy, návrhy, tisknuté spoje, tisknuté součásti atd. jsou volně dostupné na internetu. Díky tomu a také velké komunitě uživatelů, kteří si navzájem sdílí své zkušenosti, jsou 3D tiskárny Original Prusa i3 velice populární [79].

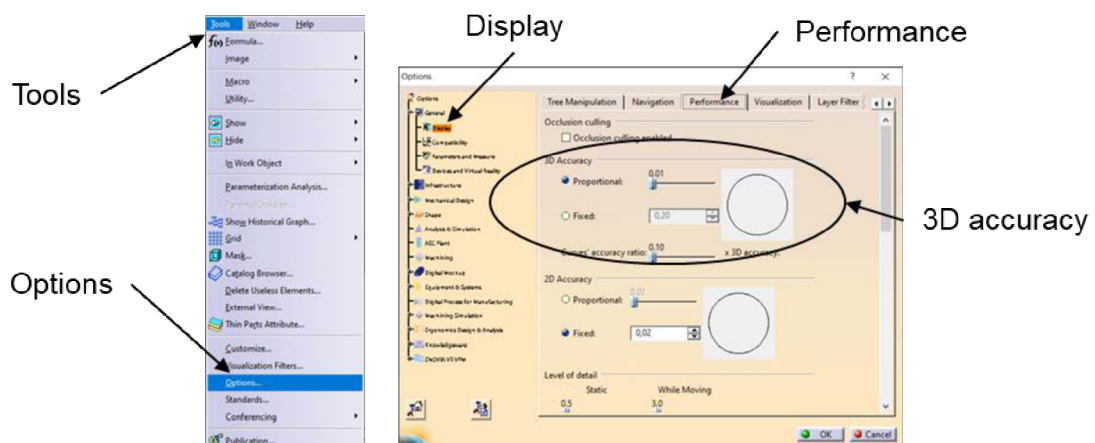
### 5.3 Výrobní postup reflektoru

Uvedený postup popisuje jednotlivé kroky vedoucí ke zhotovení vzorků na stolní tiskárně Original Prusa i3 MK3. Nejprve bylo nutné exportovat digitální model reflektoru z CAD aplikace (Catia V5) do STL souboru a následně upravit parametry tisku v slicer programu (PrusaSlicer). Postup převodu 3D modelu do STL formátu v aplikaci Catia V5 je následující. V nabídce „File“ vybrat „Save As“. V nově otevřeném okně navolit formát STL, vybrat umístění pro uložení souboru a soubor uložit, viz obr. 5.6.



Obr. 5.6 Export STL souboru.

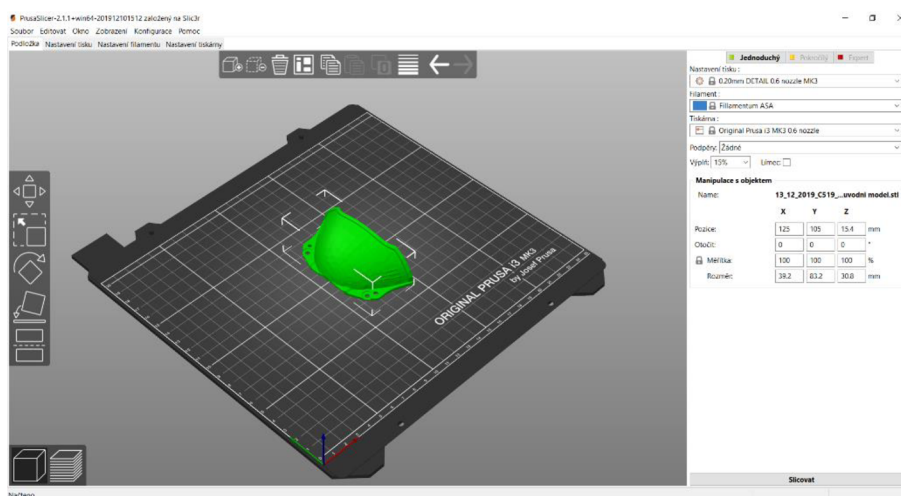
Změna parametrů exportu se provádí zvolením nabídky „Tools“ a kliknutím na „Options“. Následně vybrat v levém sloupci „Display“ a kartu „Performance“. V oddílu „3D accuracy“ lze provést úpravy, které ovlivní kvalitu modelu a velikost souboru obr. 5.7. Při exportu modelu reflektoru byly parametry nastavené na nejnižší hodnoty, čímž došlo ke zvýšení kvality povrchu STL modelu.



Obr. 5.7 Úprava parametrů exportu.

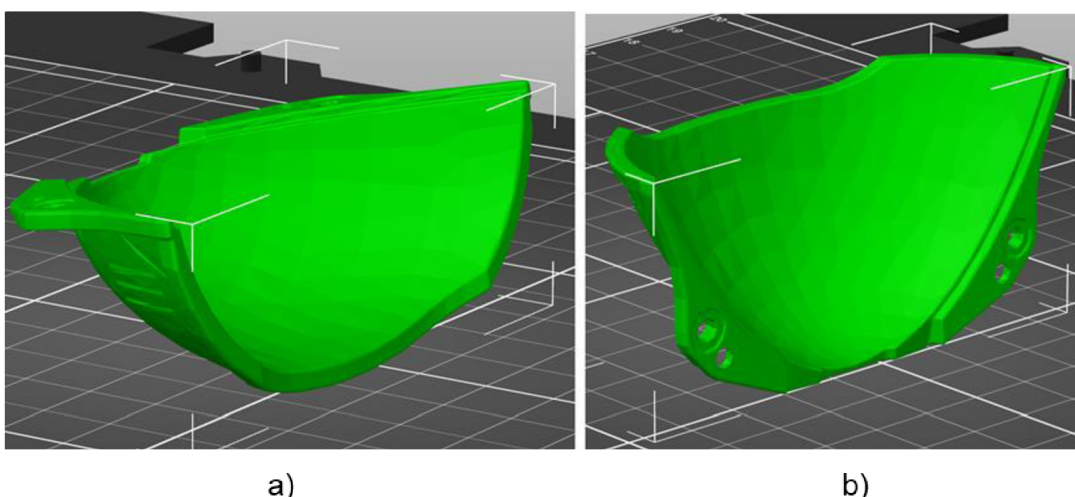
Po úspěšném vytvoření STL souboru následovala úprava parametrů tisku v slicer softwaru – PrusaSlicer. V programu lze upravit vrstvy a perimetry, výplň, obrys a límeček, podpory atd.

PrusaSlicer (dříve Slic3r Prusa Edition nebo Slic3r PE) vychází z open–source projektu Slic3r. Jedná se o aplikaci s mnoha potřebnými vlastnostmi pro export bezchybných tiskových souborů, pro kterou tým vývojářů neustále vytváří aktualizace přidávající nové funkce. Program podporuje 14 světových jazyků, obsahuje 3 módy nastavení (začátečník, pokročilý, expert) a nabízí mnoho dalších prvků. Jedním z nich je např. jednoduché, moderní a přehledné uživatelské rozhraní, díky kterému lze snadno nalézt všechny potřebné funkce, viz obr. 5.8. Dále pak umožňuje manipulovat s podporami (lze je blokovat a vynucovat), což je užitečné v případech, kdy je uživatel přesvědčen, že v místech, kde jsou podpory generovány automaticky programem, nejsou potřeba a manuálně si je umístí na jinou pozici [82].



Obr. 5.8 Uživatelské rozhraní PrusaSlicer.

V prvním kroku po otevření STL souboru je nutné zvážit orientaci součásti tzn. vybrat plochu, která se bude tisknout jako první. Vzhledem k požadavkům na kvalitu odrazné plochy byly vybrány dvě varianty orientace dílu, viz obr. 5.9.



Obr. 5.9 Orientace součásti na tiskové podložce: a) 1. varianta b) 2. varianta.

Pro první zkušební tisk reflektoru se digitální model neupravoval a parametry tisku zůstaly dle výchozího nastavení. Došlo pouze k úpravě výšky vrstvy na 0,2 mm a byla použita tryska o průměru 0,6 mm. Vzhledem k dostupnosti materiálu se pro prvotní

výtisky použil materiál polyethyltereftalát–glykol (PET–G). Nejprve se tiskla součást orientovaná dle první varianty, viz obr. 5.10.



Obr. 5.10 První vzorek.

Na vzorku lze jasně pozorovat stopy po podporách na vnější straně odrazné plochy, což není překážkou pro správnou funkci reflektoru. Ovšem kvalita této plochy není tak vysoká v porovnání s dílem, který byl orientován dle druhé varianty, viz obr. 5.11.



Obr. 5.11 Druhý vzorek.

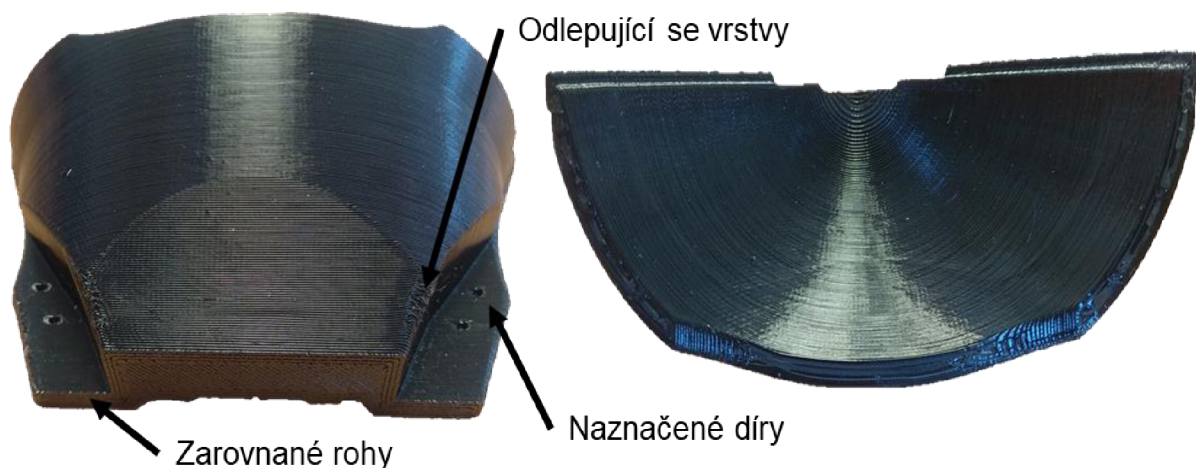
Nicméně na druhém vzorku byly jasné defekty okolo děr, kde podpůrný materiál nedostatečně podpíral vrstvy a také byla jasně viditelná propadlina ve stěně. Přes tyto vady se pro další tisky zvolila druhá varianta orientace součásti, jelikož odrazná plocha byla výrazně kvalitnější, avšak bylo nutné provést náležitě úpravy modelu (zesílit stěny, zarovnat a zvětšit plochu pro první vrstvu materiálu) s ohledem na velikost zástavbového prostoru v modulu. Následně se provedl další zkušební tisk, viz obr. 5.12.



Obr. 5.12 Třetí vzorek.

Na třetím vzorku už nedošlo ke vzniku propadlé stěny, ale stále byly zřetelně vadné otvory. Dalším problémem byly vrstvy materiálu, které se v určitém místě od sebe oddělovaly. Z těchto důvodů bylo nutné model znovu upravit.

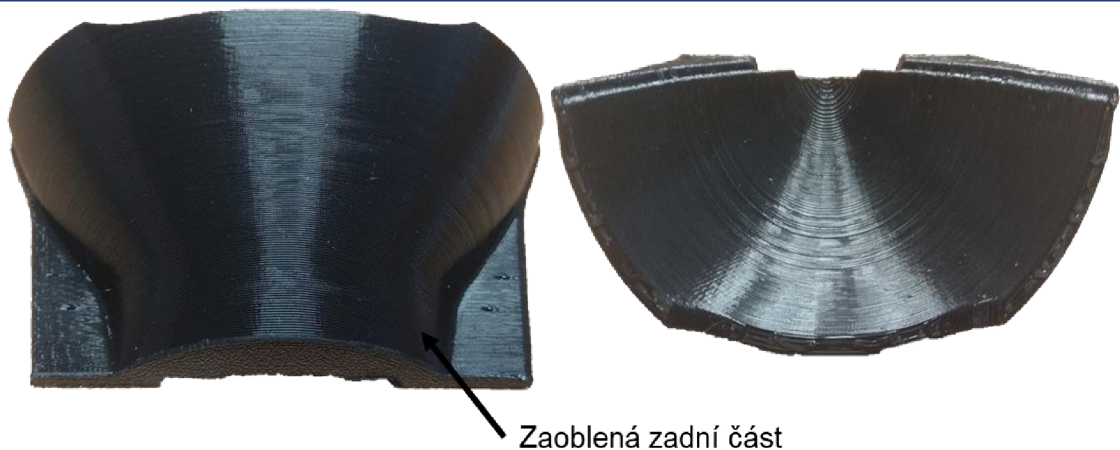
Otvory byly v 3D modelu pouze naznačeny a po tisku se následně provrtaly v rámci dokončovacích operací. Další provedenou úpravou bylo srovnání plochy pro první vrstvu materiálu, tak aby nebyla potřeba žádných podpor. Po těchto úpravách byl reflektor znovu vytisknut, viz obr. 5.13.



Obr. 5.13 Čtvrtý vzorek.

Tento vzorek obsahuje neprůchozí otvory a rohy jsou zarovnané do jedné roviny, aby se zvětšila plocha pro tisk první vrstvy materiálu. Díky tomuto rozšíření první vrstvy došlo k dostatečnému podpírání celého modelu během tisku, a tudíž nebyla potřeba stavět podpory, což má za následek zvýšení kvality povrchu.

Ovšem na vzorku lze stále pozorovat odlepující se vrstvy, proto byla nutná další úprava modelu, která spočívala ve vytvoření zaoblení v zadní části reflektoru, viz obr. 5.14. Cílem bylo předejít špatnému přilnutí materiálu v ostrých hranách.



Obr. 5.14 Pátý vzorek.

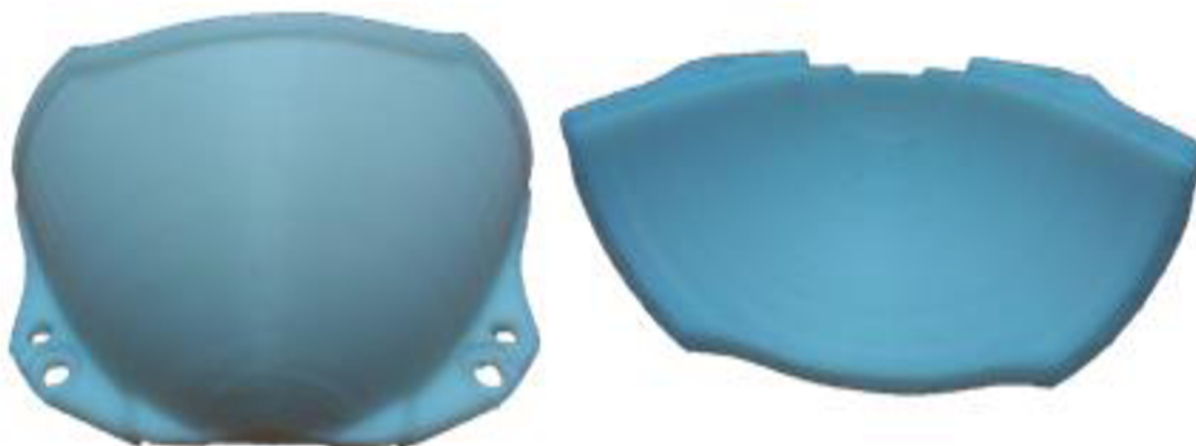
Na tomto vzorku lze jasně pozorovat, že se díky zaoblení dosáhlo lepšího spojení vrstev materiálu. Dále pak nejsou patrné žádné další vady, které by znehodnocovaly hotový výtisk. Doba tisku takto upraveného reflektoru z materiálu PET-G byla 1 hodina a 9 minut a spotřebováno bylo 9 198 mm<sup>3</sup> tiskového materiálu. Po konečné úpravě 3D modelu reflektoru se na stolní tiskárně vytiskly vzorky z požadovaného materiálu – akrylonitril–styren–akryl (ASA), který byl vybrán z dostupných materiálů díky své teplotní odolnosti. Čas tisku vzorků vytvořených z tohoto materiálu byl 55 minut.

Avšak pro správné nainstalování tohoto reflektoru do modulu bylo potřeba provést patřičné úpravy. Otvory, které jsou na výtisku pouze naznačeny, je nutné pro správnou instalaci reflektoru do modulu provrtat. Dále je pak třeba ubrat materiál v rozích, aby bylo vůbec možné vložit tento vytisknutý díl do patřičné pozice v modulu, obr. 5.15. Takto upravený reflektor lze bez problémů namontovat a upevnit do modulu, aniž by docházelo k jakékoliv kolizi s ostatními komponenty.



Obr. 5.15 Upravený finální výtisk z materiálu PET-G.

Pro tisk na průmyslové tiskárně firmy Vshaper se 3D model neupravoval, jelikož tiskárna Vshaper PRO umožnila tisk původního neupraveného modelu, navíc bez stavby podpor. U takto zhotovených vzorků se tudíž nemusely vyvrtávat otvory a ani odebírat materiál na rozích, viz obr. 5.16. Kusy zhotovené na tomto zařízení byly z materiálu akrylonitrilbutadienstyren (ABS), který byl dodavatelem vybrán díky své teplotní odolnosti.



Obr. 5.16 Vzorek z materiálu ABS od Vshaper.

V tab. 5.4 jsou uvedeny všechny zhotovené vzorky spolu se základními parametry tisku (průměr trysky a výška vrstvy). Následně se vytisknuté kusy podrobily dalším operacím úpravy povrchu a pomocí PVD metody napařování se vytvořila vhodná odrazná plocha pro fotometrické měření.

Tab. 5.4 Vyrobené vzorky.

Vzorek	Tiskárna	Materiál	Tryska [mm]	Výška vrstvy [mm]
Vzorek 1	Vshaper PRO	ABS	0,4	0,2
Vzorek 2	Vshaper PRO	ABS	0,25	0,12
Vzorek 3	Original Prusa i3 MK3	ASA	0,6	0,2
Vzorek 4	Original Prusa i3 MK3	ASA	0,6	0,2
Vzorek 5	Original Prusa i3 MK3	PET-G	0,6	0,2
Vzorek 6	Original Prusa i3 MK3	PET-G	0,6	0,2

## 5.4 Úprava vytisknutých vzorků

Odrasnou plochu tisknutých kusů je potřeba náležitě upravit, aby se dosáhlo co nejkvalitnějšího povrchu pro následnou úpravu optické plochy metodou napařování. Toto platí jak pro kusy vyrobené na tiskárně Original Prusa i3 MK3, tak i pro kusy zhotovené na průmyslové tiskárně Vshaper PRO.

### 5.4.1 Proces lakování vzorků

Tenká vrstva vytvořená technologií napařování zvýrazňuje sebemenší nerovnosti povrchu, které mají za následek snížení odrazivosti reflektoru. Proto je nutné před touto operací vytvořit jednolitý a hladký povrch. Na zhotovených vzorcích lze pozorovat značné nerovnosti vzniklé v průběhu tisku – tzv. schody, které jsou pro technologii FDM typické. K zarovnání těchto schodů a celkové přípravě povrchu pro napařování je nutné provést následující operace úpravy povrchu:

- odmaštění,
- nanesení základové barvy,
- aplikace plniče plastu,
- broušení odrazné plochy,
- lakování.



Před aplikací základové vrstvy je potřeba povrch řádně odmastit, čímž se zbaví prachu a také dalších nečistot. Pro tento účel se použil Würth ČISTIČ BRZD PLUS, viz obr. 5.17, který se aplikuje ve formě spreje při teplotě kolem 20 °C.



Obr. 5.17 Würth ČISTIČ BRZD PLUS.

Následuje nanesení základové vrstvy, jejímž účelem je zvýšení přilnavosti s vrchními vrstvami. Jako prostředek pro nanesení základové vrstvy byl použit aerosol ve spreji s názvem BODY 340 PLASTOFIX, viz obr. 5.18. Jedná se o bezbarvou a rychleschnoucí základní barvu, která je určena pro plastové díly automobilů, motocyklů a pro předměty z přelakovaného tvrdého plastu. BODY 340 PLASTOFIX se aplikuje dvakrát až třikrát ze vzdálenosti 25 až 30 cm, přičemž doba mezi aplikací jednotlivých vrstev je od 2 do 3 minut. Následné překrytí vrchní vrstvou plniče bylo provedeno po 30 minutách, kdy tento prostředek dostatečně zaschnul na podkladu. Dále je nezbytné, aby měl sprej před použitím teplotu 20 až 25 °C a nanášení probíhalo za teploty od 10 do 25 °C [83].

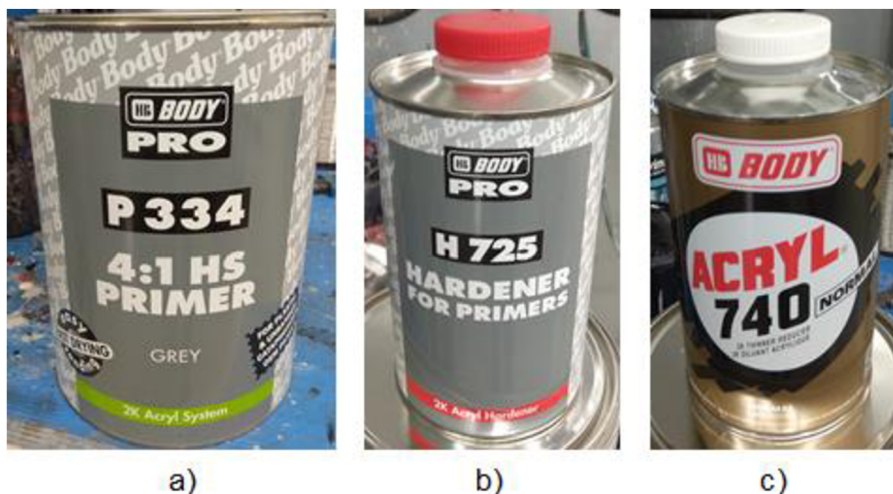


Obr. 5.18 BODY 340 PLASTOFIX.

Dalším krokem je aplikace plniče, který má několik funkcí. Sjednocuje nasákavost podkladu, čímž je dosaženo stejného barevného odstínu a zlepšení životnosti laku. Dále zajišťuje jedlnotnost povrchu a také povrch zbavuje od mírných nerovností a nedokonalostí. Navíc funguje i jako tlumič nárazů, čímž přispívá k ochraně laku před poškozením. Jako plnič byl použit dvousložkový akrylátový HB BODY P334 PRO, viz obr. 5.19. Mezi jeho výhody patří zejména vysoká plnicí schopnost, díky které

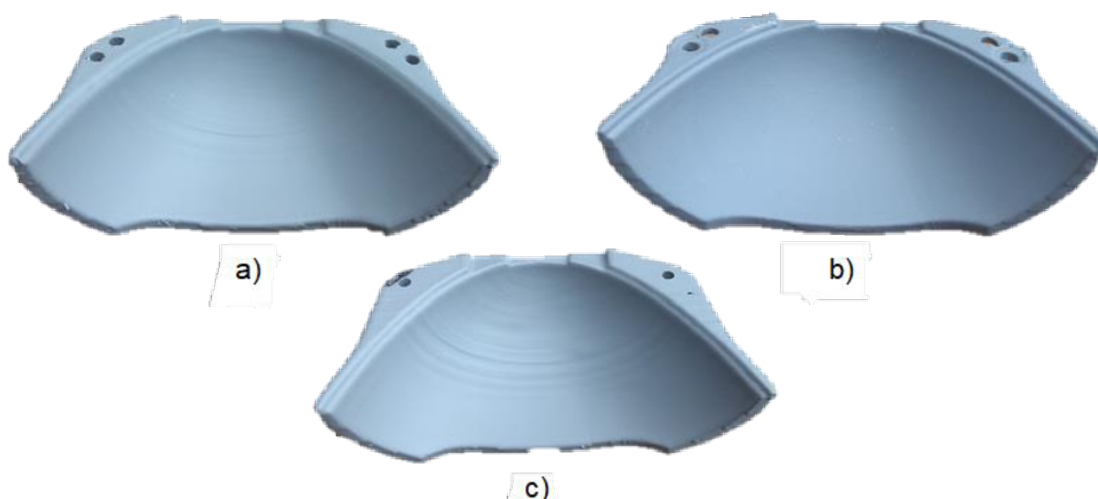
ho lze aplikovat v silných vrstvách. Dále tento prostředek rychle schne a má výborné vyrovnávací schopnosti [84, 85].

Pro nanesení plniče byla vytvořena směs v poměru 4:1 s tužidlem HB BODY H725, viz obr. 5.19, přičemž bylo do této směsi přidáno ředidlo HB BODY 740 ACRYL, viz obr. 5.19, v množství 10 % objemu směsi a takto připravená směs se nechala 10 minut odstát.



Obr. 5.19 Použité prostředky pro přípravu směsi: a) plnič HB BODY P334 PRO b) tužidlo HB BODY H725 c) ředidlo HB BODY 740 ACRYL.

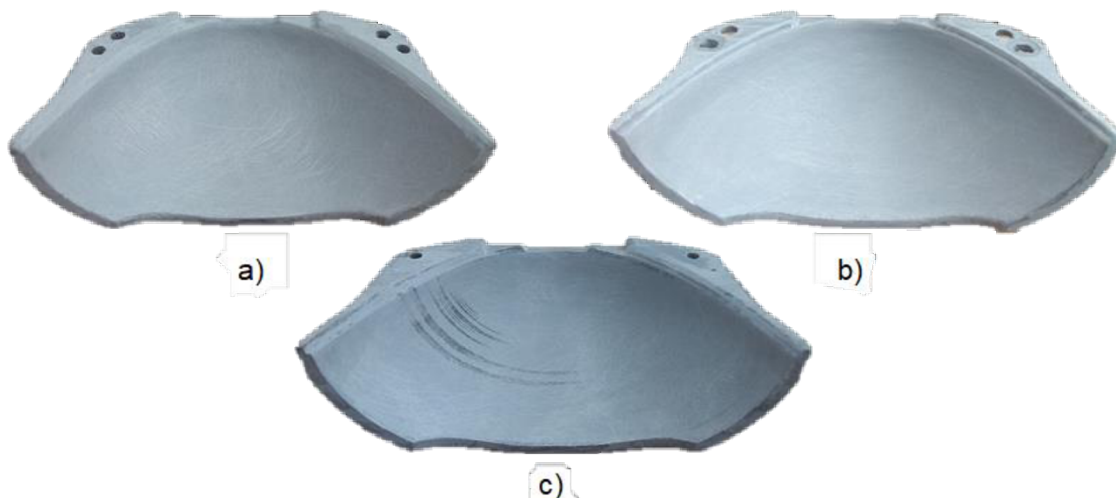
Doba zpracovatelnosti je do 50 až 60 minut při teplotě kolem 23 °C. Pro aplikaci plniče i základové barvy byla použita stříkácí pistole o průměru trysky 1,4 mm a byly nanесeny celkem 2 vrstvy plniče. Po nanesení jedné vrstvy plniče se kusy nechaly vytvrdnout 1 den při pokojové teplotě, přičemž doba schnutí je závislá na tloušťce nanesené vrstvy. Na kusech z materiálu ASA lze i po aplikaci plniče pozorovat mírné nerovnosti odrazné plochy, zatímco u výtisků z materiálu ABS došlo k nejvýraznějšímu zlepšení kvality plochy, viz obr. 5.20.



Obr. 5.20 Vzorky po první vrstvě plniče: a) materiál PET-G b) materiál ABS c) materiál ASA.

Jakmile kusy plně proschly, odrazné plochy se ručně přebrousily brusným papírem, viz obr. 5.21. Pro broušení první vrstvy plniče byl použit brusný papír o zrnitosti P180, přičemž druhá vrstva plniče před nanesením laku byla broušena za mokra s použitím brusného papíru o zrnitosti P800. Po této operaci se kusy umyly

pod tekoucí vodou a nechaly vyschnout v peci o teplotě 60 °C na 1 hodinu. Vyschlé kusy se podrobily nanesení druhé vrstvy plniče a po zopakování tohoto postupu (přebroušení, umytí, vyschnutí v peci) se následně na díly naněsli lak.



Obr. 5.21 Přebroušené vzorky brusným papírem: a) materiál PET–G b) materiál ABS c) materiál ASA.

Poslední fází úpravy povrchu před kovením je nanesení laku. Pro tuto operaci byl použit lak značky MayMeyer UHS Clear 0350. Jedná se o dvousložkový a čirý lak s vysokým obsahem sušiny pro zlepšení aplikace a dosažení vysoce kvalitního vzhledu povrchu. Tento lak se používá také na bodové opravy nebo opravy celých dílů. Pomocí laku MayMeyer UHS Clear 0350 lze dosáhnout odolného a vysoce lesklého povrchu. Jelikož se jedná o vysokosušinnový materiál je nutné ho nanášet při minimální teplotě 15 °C. V opačném případě se mohou vyskytovat problémy s absorpcí. Lze ho použít s několika druhy tužidel a ředidel, ale pro lakování reflektoru, o kterém uvedená práce pojednává, se pro vytvoření lakovací směsi použilo tužidlo MayMeyer UHS Hardener 2860 v poměru 3:1, viz obr. 5.22. Ve směsi s tímto tužidlem výrobce udává dobu zpracovatelnosti 2 hodiny [86].



Obr. 5.22 Použité látky pro tvorbu směsi na lakování: a) lak MayMeyer UHS Clear 0350 b) tužidlo MayMeyer UHS Hardener 2860.

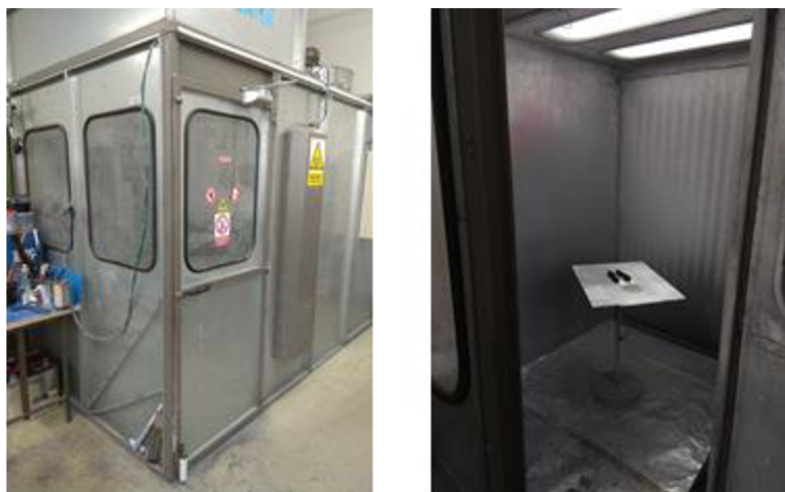
Součástí směsi bylo také ředidlo HB BODY 740 ACRYL, které se přidalo v množství 5 až 10 % objemu směsi. Lak se aplikoval pomocí stříkací pistole o průměru 1 mm. Zalakované díly se nechaly na půl dne vyschnout a poté se vložily

do pece o teplotě 60 °C na 8 hodin, viz obr. 5.23. Následně se díly vyjmuly z pece a nechaly se opět půl dne zchladnout na vzduchu.



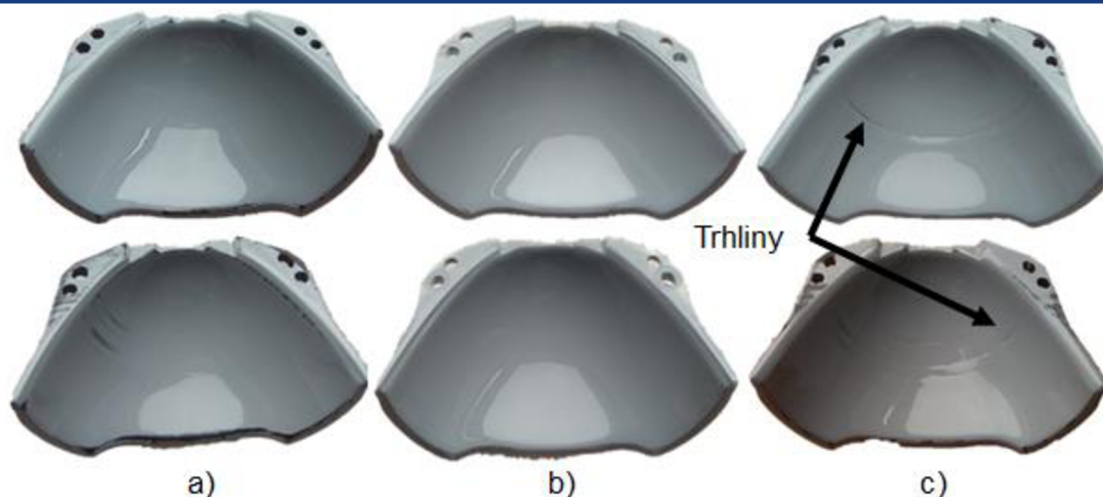
Obr. 5.23 Použitá pec.

Aplikace základové barvy, plniče plastu i konečné nanášení laku probíhalo ve stříkacím boxu, viz obr. 5.24, kde byla udržována konstantní teplota 25 °C, která je nutná pro provedení kvalitního nástřiku. V komoře se nachází ventilátor, díky kterému je zajištěno odvětrávání výparů tvořících se při stříkání. Součástí odvětrávacího systému jsou také filtry, které dostatečně očistí vzduch vypouštěný do ovzduší.



Obr. 5.24 Stříkací box.

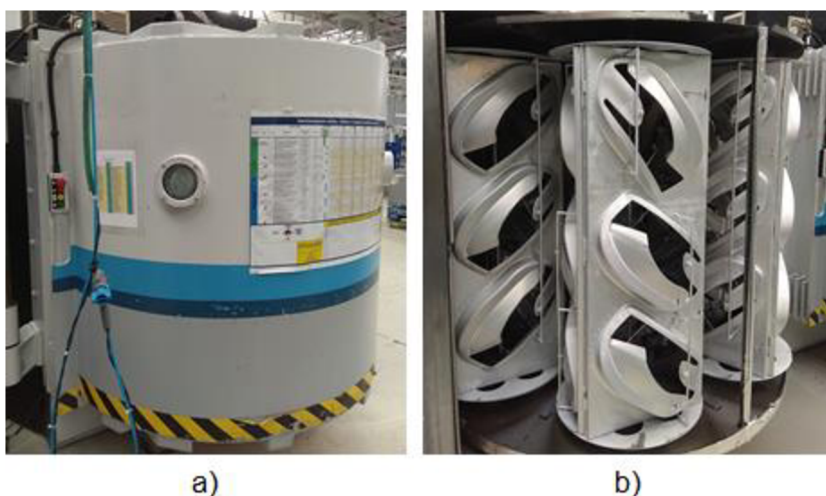
Na nalakovaných kusech z materiálu ABS a PET-G došlo ke vzniku požadovaného jednolitého a lesklého povrchu, nicméně na vzorcích z materiálu ASA lze pozorovat vznik trhlin, viz obr. 5.25. Tyto vady budou mít negativní vliv na další operaci – napařování. Při této operaci vzniká na povrchu substrátu tenká vrstva hliníku, jenž má za cíl zvýšení odrazivosti reflektorů. Ovšem tato odrazná vrstva přesně kopíruje povrch dílu, na kterém se vytváří. To znamená, že na kusech z materiálu ASA, které obsahují na svém povrchu trhliny, dojde ke vzniku nekvalitní odrazné vrstvy, což bude mít za následek rozptýlení světelných paprsků. Z tohoto důvodu nebylo provedeno fotometrické měření obou vzorků z materiálu ASA, ale pouze jednoho pro ověření teplotní odolnosti materiálu.



Obr. 5.25 Nalakované vzorky: a) materiál PET–G b) materiál ABS c) materiál ASA.

#### 5.4.2 Napařování tenké vrstvy hliníku

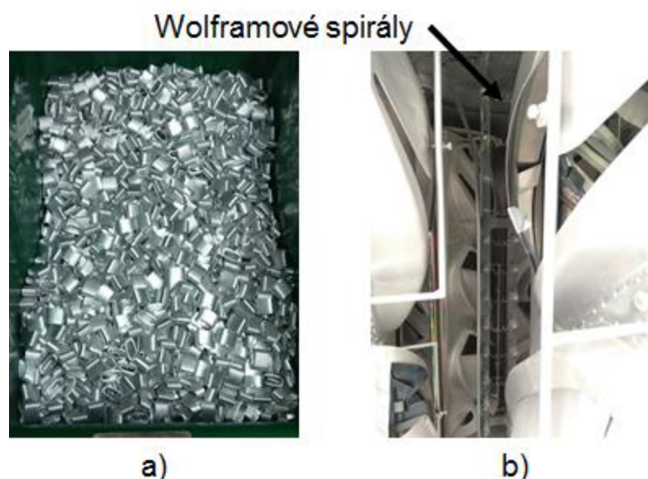
Ve firmě Varroc Lighting Systems s.r.o. se pro úpravu optických ploch součástí využívá zejména PVD proces napařování tzv. kovení hliníku, nicméně ve výrobních halách lze v malém počtu nalézt i zařízení pro metodu napařování. Tenká hliníková vrstva se na dílech vytváří z důvodu zvýšení odrazivosti (optické díly) anebo je také u některých součástí využívána pro zvýšení estetiky (designové díly). Vakuové zařízení pro metodu napařování se skládají ze dvou komor se závěsy na kusy, viz obr. 5.26 [87].



Obr. 5.26 Vakuovací zařízení: a) uzavřená komora b) otevřená komora se závěsy.

Tyto závěsy jsou konstruovány pro určitý typ součásti, a proto při změně výroby je nutné závěsy vyměnit. Při běžném provozu je jedna komora s navěšenými kusy zavřená a probíhá v ní proces napařování. Druhá komora je otevřená, aby mohl operátor manipulovat s díly (navěšování a svěšování). Stojany s navěšenými díly během napařování rotují po obvodu pracovní komory i kolem své osy, aby se částice deponovaného materiálu dostaly do všech požadovaných míst na součástech. Nicméně jelikož se během procesu částice nanášeného materiálu pohybují přímo od zdroje do všech směrů, je potřeba zakrýt plochy dílů, na kterých nemá dojít k pokovení [87].

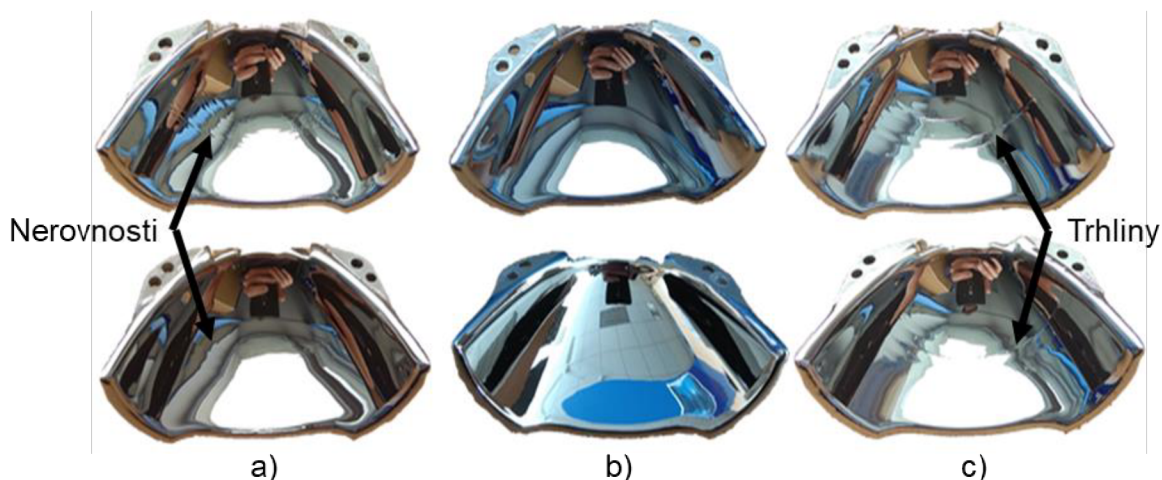
Před uzavřením komory se navěšené kusy čistí ionizovaným vzduchem, aby se z povrchů dílů odstranily nečistoty, které by způsobily vznik vad na pokovených kusech. Jako zdroj nanášeného materiálu slouží kousky hliníku tzv. filamenty, které se před kovením vkládají na wolframové spirály umístěné uprostřed komory, viz obr. 5.27. Během procesu napařování dochází k odporovému ohřevu těchto spirál a následnému vypařování hliníku, jehož částice kondenzují na substrátu o nižší teplotě [87].



Obr. 5.27 Zdroj nanášeného materiálu: a) hliníkové filamenty b) wolframové spirály.

Proces napařování je rozdělen do několika fází, přičemž posledním krokem je vznik ochranné vrstvy polymeru (hexametyldisiloxan – plasil). Tato látka se nanáší na vrstvu hliníku, aby zamezila jeho oxidaci, jelikož se na vzduchu na hliníku vytváří vrstva oxidu hlinitého [87].

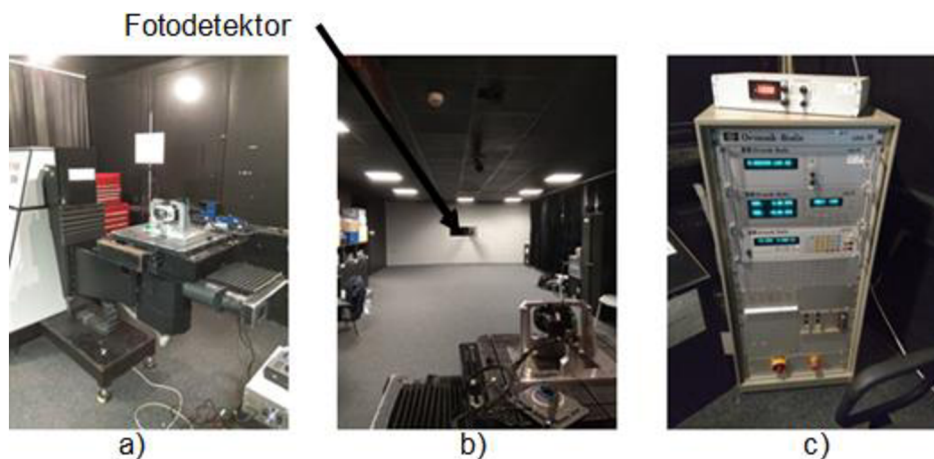
Na pokovených vzorcích z materiálu ASA lze jasně pozorovat trhliny, zatímco na kusech z materiálu ABS došlo k výraznému zvýšení odrazivosti optické plochy, viz obr. 5.28. U vzorků z materiálu PET-G došlo během kovení ke zvýraznění nerovností odrazné plochy, které vznikly v průběhu předchozích operací úpravy povrchu a nebyly před kovením viditelné. Tyto vady budou mít za následek snížení světelného výstupu při fotometrickém měření, a tudíž výsledek měření bude nesrovnatelný s výchozím reflektorem. Nicméně změřen bude pouze jeden kus, který je zhotoven z materiálu PET-G pro ověření teplotní odolnosti materiálu.



Obr. 5.28 Pokovené vzorky: a) materiál PET-G b) materiál ABS c) materiál ASA.

## 5.5 Měření světelného výstupu

Měření fotometrie proběhlo ve zkušební laboratoři za pomoci goniofotometru, viz obr. 5.29. Jedná se o zařízení, které se skládá z otočného stolu, fotodetektoru a řídicí jednotky. Princip měření spočívá v umístění měřeného objektu (modul, světlomet) na stůl, který je otočný v horizontálním a vertikálním směru, a jeho postupném natáčení o daný úhel, zatímco fotodetektor umístěný ve vzdálenosti 25 m od světelného zdroje měří světelný výstup. Výsledkem měření může být isocandelová mapa nebo lze měřit svítivost přímo v daných bodech [88].



Obr. 5.29 Goniofotometr ve zkušební laboratoři: a) otočný stůl  
b) fotodetektor c) řídicí jednotka.

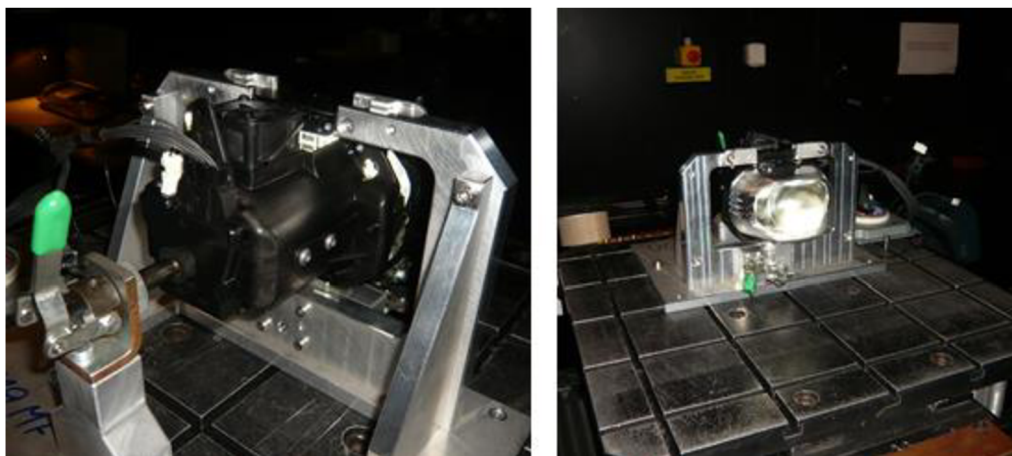
Pro vytvoření isocandelové mapy se testovaný objekt natáčí zleva doprava postupně shora dolů, přičemž fotodetektor znamená svítivost v daných krocích. Na začátku měření je potřeba vystředit měřený objekt do optické osy za pomoci laserového zařízení. Dále je třeba určit velikost kroku a rozsah mapy, která je daná maximálním úhlem natočení v horizontálním i vertikálním směru. Výsledkem je síť bodů, ze které se jejich spojením a následným dopočítáním pomocí specializovaného softwaru vytvoří isocandelová mapa [88].

Než se začne samotným měřením, musí se světelný zdroj stabilizovat – uvést do stavu, kdy nedochází ke změně velikosti světelného výstupu. Světelný zdroj typu LED ihned po zapnutí vykazuje vyšší hodnoty svítivosti než po určité době, která je závislá na typu měřeného zařízení a zejména na jeho chladicím systému. Světelný výstup LED systémů je totiž závislý na teplotě, kdy při zvyšující se teplotě dochází k jeho mírnému snížení. Nicméně hodnoty svítivosti se po určité době ustálí a lze začít s měřením. Dle předpisu ECE 123 pro dálkovou funkci se testovaný objekt považuje ve stabilizovaném stavu v případě, kdy rozdíl svítivosti v bodě HV (nulové natočení v obou směrech) je po dvou sobě jdoucích měřeních menší než 3 %, přičemž se měření provádí hned v 1. minutě a následně vždy po 15. minutách [88].

U hliníkového reflektoru byl pokles svítivosti v 1. minutě a v 16. pouze -1,3 %, takže se mohlo začít s měřením ihned v 16. minutě, přičemž další vzorky byly také stabilizované po této době, kdy u všech byl rozdíl svítivosti vždy menší než 3 %. Tato krátká doba stabilizace byla dosažena díky efektivnímu chlazení modulu [88].

Postup měření vzorků byl následovný. Modul se připevnil do specializovaného přípravku, který se upnul na otočný stůl, viz obr. 5.30. Následně proběhla stabilizace a poté se spustilo měření bodů pro zhotovení isocandelové mapy. Samotné měření trvalo u všech vzorků 18 minut a 35 vteřin, jelikož čas měření je závislý na velikosti

kroku a mapy, které byly pro všechna měření stejné. Tyto parametry jsou závislé na měřeném módu testovaného objektu. Pro potkávací funkci se např. měří jiná mapa, než pro mód dálkového světla [88].



Obr. 5.30 Modul upnutý v přípravku.

Nejprve se změřil modul se stávajícím hliníkovým reflektorem. Výsledek tohoto prvního měření sloužil jako výchozí pro porovnávání s ostatními vzorky. Po skončení měření se vyměnil testovaný reflektor a proběhlo další měření. Pro výměnu vzorků se modul musel rozebrat (odšroubovat čočku a rámeček) a vysunout chladič s reflektorem, viz obr. 5.31. Reflektor se nahradil dalším vzorkem a modul se opět složil.

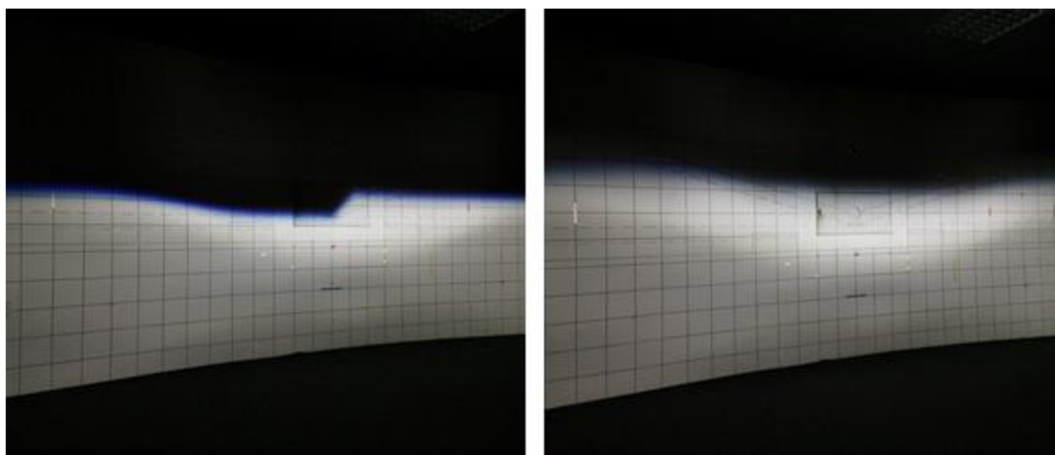


Obr. 5.31 Rozložený modul.

Při tomto úkonu ovšem docházelo k vychýlení rámečku s objemovou rotační clonkou, jelikož při opětovném sestavení nebylo možné zaručit nastavení rámečku do předešlé pozice, což mělo za následek ovlivnění světelného výstupu a narušení opakovatelnosti měření. Před měřeními se vždy musel rámeček seřídít do přibližně stejné polohy. Nicméně pro zaručení opakovatelnosti měření probíhala v módu dálkového svícení, protože v tomto režimu se clonka nachází v dolní úvratí (je maximálně odkloněna) a tím pádem nedochází k ovlivnění měření jejím nastavením. Konstrukční řešení modulu je provedeno se dvěma reflektory, které zajišťují jak potkávací, tak i dálkové svícení. V případě měřeného reflektoru se jedná o tzv. multifunkční low-beam reflektor, což znamená, že jeho funkcí je potkávací svícení a v kombinaci s druhým reflektorem i dálkové. Ovšem během měření byl napájen pouze tento multifunkční reflektor v režimu dálkového světla, díky čemuž bylo



dosaženo pouze částečného dálkového svícení, viz obr. 5.32. Nicméně pro účel srovnání výstupů jednotlivých vzorků bylo toto nastavení dostačující [88].



Obr. 5.32 Tvar světelného výstupu hliníkového reflektoru na světelné stěně:  
a) potkávací b) částečný dálkový.

## 5.6 Porovnání výsledků

Výsledky měření fotometrie se hodnotily na základě výsledných isocandelových map z jednotlivých měření. Rozsah těchto map je dán maximálním úhlem natočení v horizontálním a vertikálním směru. Pro měření zhotovených vzorků byl maximální horizontální úhel zvolen 55° tzn. natočení od -55° do 55° a natočení ve vertikálním směru od -20° do 10°, přičemž velikost kroku byla nastavena na 0,2°. Na výsledných mapách jsou barevně odlišeny oblasti s různou hodnotou svítivosti, přičemž lze zvolit různé zobrazovací palety. Pro hodnocení vzorků byla použita výchozí barevná paleta a také paleta ve stupních šedi, která lépe vyobrazuje homogenitu svícení. V horní části map jsou vypsány minimální a maximální hodnoty s polohou bodů, kde byly naměřeny. Dále je uveden celkový světelný tok a v úplně horní části se také nachází legenda. Na výsledných mapách se hodnotily zejména maximální hodnoty svítivosti, celkový světelný tok, symetrie a homogenita svícení.

Světelný výstup měřených objektů popisují fotometrické veličiny světelný tok a svítivost. Světelný tok udává množství světla vyzářeného světelným zdrojem do všech směrů s ohledem na citlivost lidského oka na vlnové délky. Záření, které je pro oko neviditelné, se do světelného toku nezapočítává. Tato veličina se značí  $\Phi$  a jednotkou je lumen [lm]. Další fotometrickou veličinou je svítivost, která popisuje rozdělení světelného toku do různých směrů, jelikož světelný zdroj zpravidla nezáří do všech směrů rovnoměrně a lze ji vyjádřit dle vztahu (5.1). Svítivost se značí  $I$  a jednotkou je kandela [cd] [89].

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega} \text{ [cd]} \quad (5.1)$$

kde:  $I$  [cd] - svítivost,  
 $\Delta\Phi$  [lm] - světelný tok v daném směru,  
 $\Delta\Omega$  [sr] - prostorový úhel.

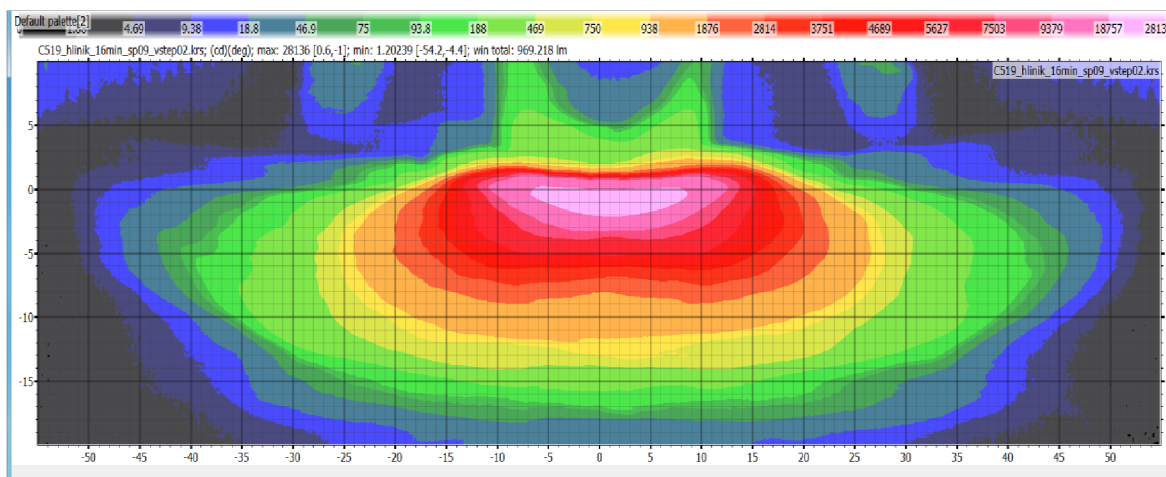
V průběhu fotometrického měření byl testován světelný výstup čtyř vzorků zhotovených pomocí aditivní technologie a jednoho stávajícího hliníkového reflektoru.

Jelikož během úpravy vytisknutých reflektorů došlo k vytvoření trhlin a nerovností na odrazné ploše na obou vytisknutých vzorcích z materiálů ASA i PET-G, nemělo by měření fotometrie těchto vzorků význam. Nicméně se provedlo měření jednoho kusu z materiálu ASA a PET-G pro ověření teplotní odolnosti a pro demonstraci vlivu nedokonalosti optické plochy na světelný výstup. V tab. 5.5 jsou uvedeny vzorky, u kterých byla měřena fotometrie. Výsledné hodnoty jednotlivých vzorků uvedené v následujících odstavcích jsou naměřeny ve stabilizovaném stavu.

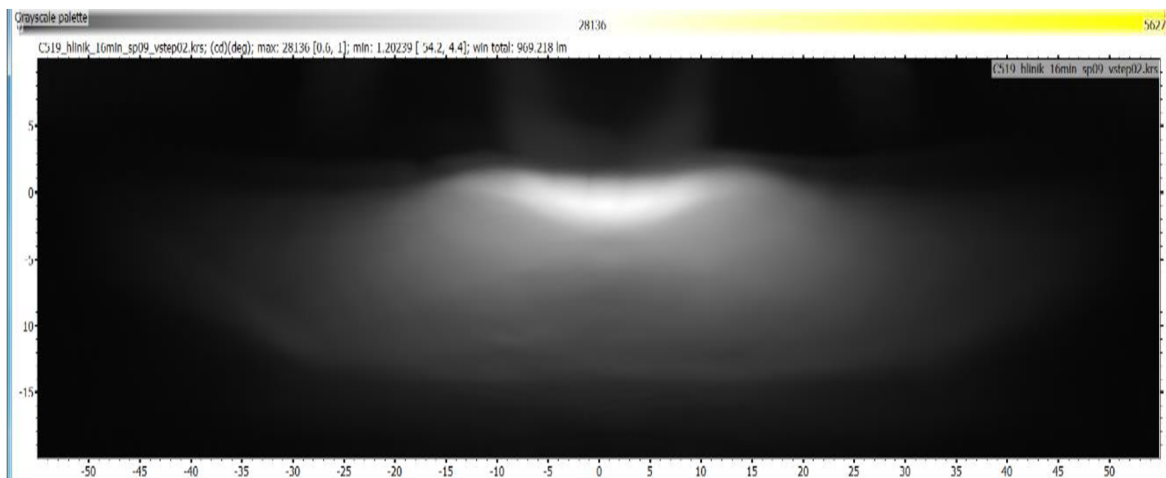
Tab. 5.5 Měřené vzorky.

Vzorek	Tiskárna	Materiál	Tryska [mm]	Výška vrstvy [mm]
Vzorek 1	-	Hliník	-	-
Vzorek 2	Vshaper PRO	ABS	0,4	0,2
Vzorek 3	Vshaper PRO	ABS	0,25	0,12
Vzorek 4	Original Prusa i3 MK3	ASA	0,6	0,2
Vzorek 5	Original Prusa i3 MK3	PET-G	0,6	0,2

Prvním měřeným vzorkem byl stávající reflektor z hliníku. Na výsledné mapě lze pozorovat, že rozložení světelného výstupu je symetrické, přičemž maximální hodnota svítivosti je 28 136 cd a celkový světelný tok je 969,2 lm, viz obr. 5.33. Při přepnutí této mapy do palety ve stupních šedi lze hodnotit homogenitu svícení, která je u vzorku 1 velice dobrá, viz obr. 5.34.

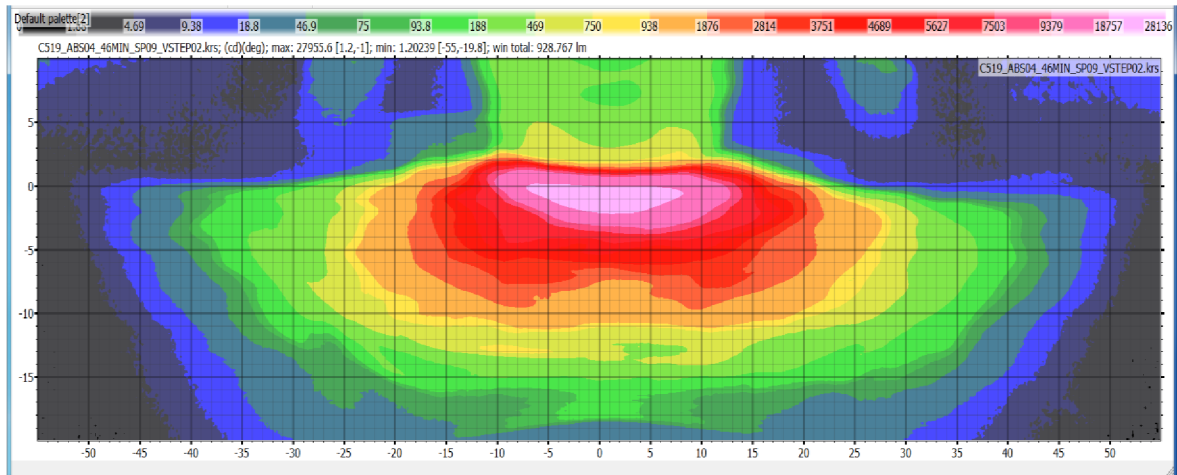


Obr. 5.33 Mapa vzorku 1 ve výchozí paletě.

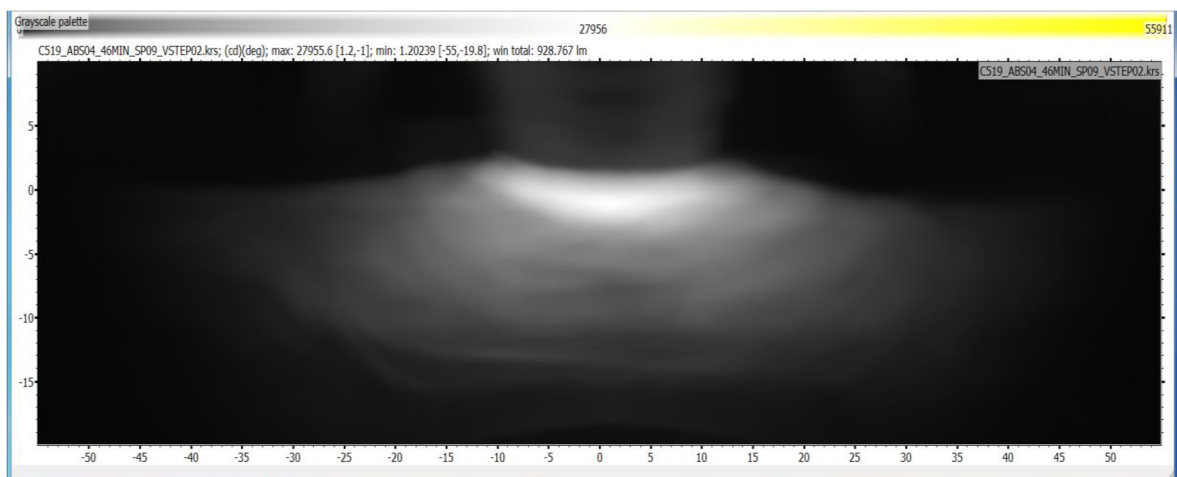


Obr. 5.34 Mapa vzorku 1 ve stupních šedi.

Výsledky měření vzorku 2 ukázaly jasné odlišnosti v rozložení svítivosti oproti výchozímu výsledku, viz obr. 5.35. Jednotlivé barevné oblasti se stejnou svítivostí mají přibližně stejný tvar jako u měření hliníkového reflektoru, nicméně světelný výstup lze stále považovat za symetrický, přičemž maximální svítivost je 27 955,6 cd a celkový světelný tok je 928,8 lm. Tato naměřená hodnota je nižší, než u vzorku 1, avšak rozdíl maximální svítivosti je zanedbatelný. Homogenita svícení je u tohoto reflektoru ovšem nízká, viz obr. 5.36.

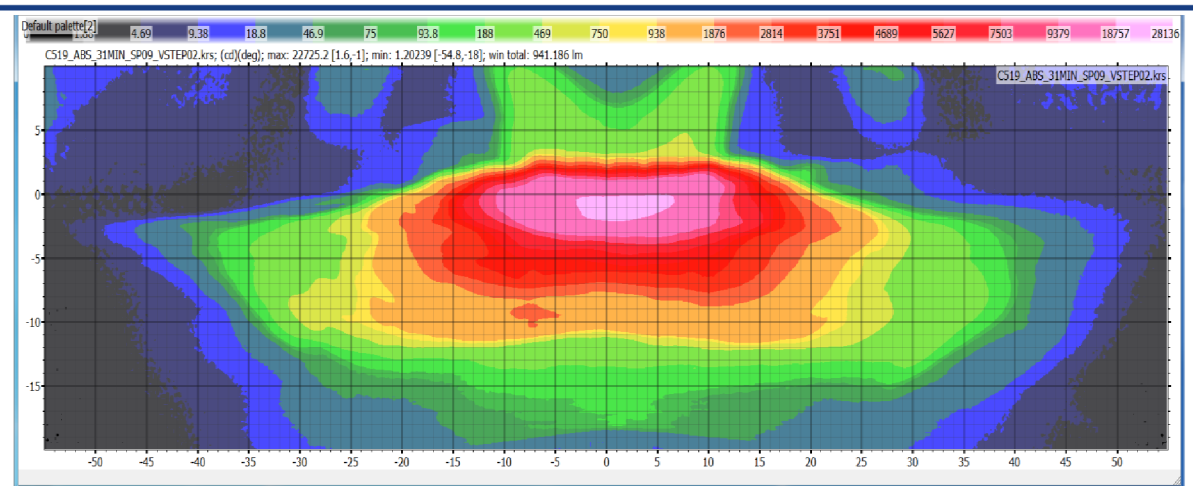


Obr. 5.35 Mapa vzorku 2 ve výchozí paletě.

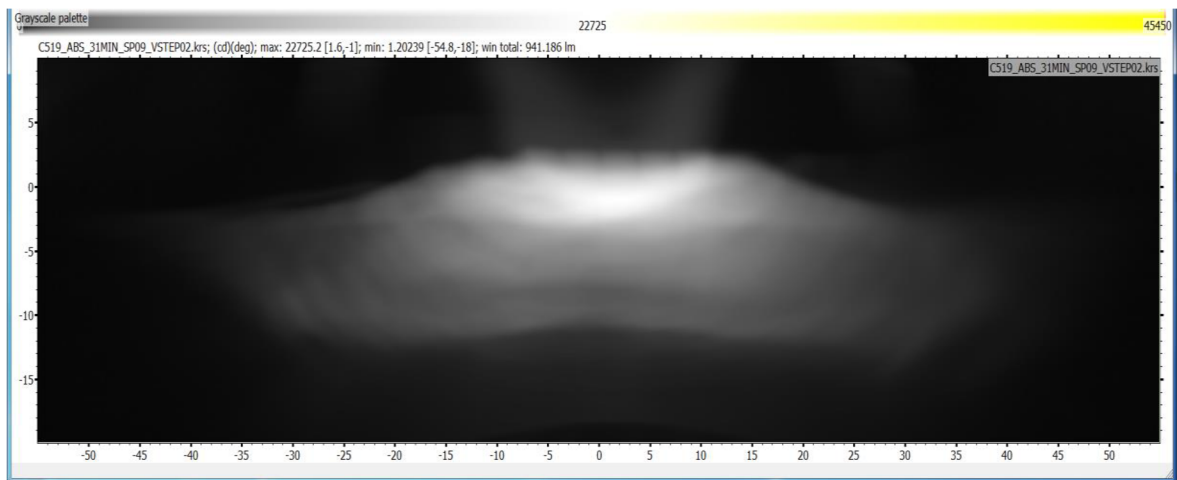


Obr. 5.36 Mapa vzorku 2 ve stupních šedi.

Dle výsledné mapy vzorku 3 lze konstatovat, že svícení je méně symetrické, než u vzorku 2, viz obr. 5.37. Barevné oblasti mají značně odlišný tvar, než vzorek 1, nicméně homogenita svícení je mírně lepší oproti vzorku 2, viz obr. 5.38. Maximální hodnota svítivosti je 22 725,2 cd a světelný tok má hodnotu 941,2 lm, z čehož lze pozorovat snížení maximální hodnoty svítivosti oproti vzorku 1, avšak vykazuje vyšší hodnoty světelného toku, než vzorek 2.

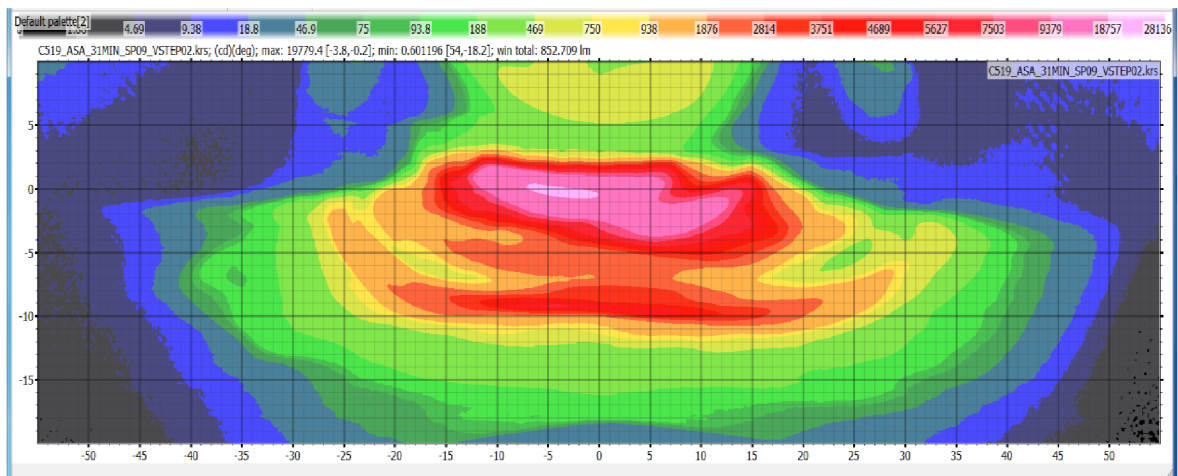


Obr. 5.37 Mapa vzorku 3 ve výchozí paletě.

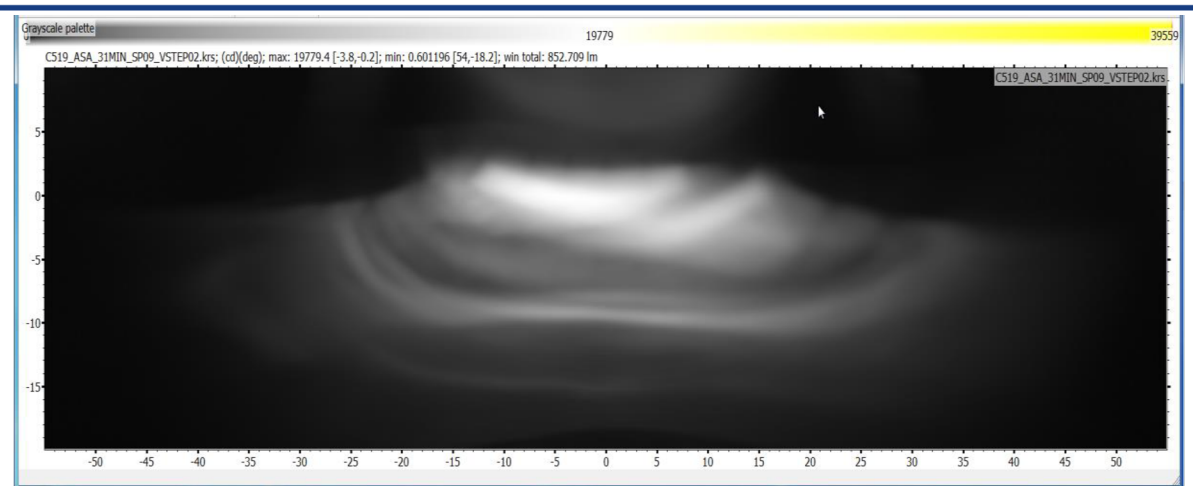


Obr. 5.38 Mapa vzorku 3 ve stupních šedi.

Vzorek 4 má na optické ploše trhliny a nerovnosti, které negativně ovlivňují rozložení a množství světelných paprsků. Na výsledné mapě lze jasně pozorovat, že světelný výstup je značně nesymetrický, viz obr. 5.39. Dle mapy ve stupních šedi je svícení výrazně nehomogenní, viz obr. 5.40. Sledovaná hodnota svítivosti a světelný tok jsou značně nižší, než u předchozích vzorků, přičemž maximální svítivost je 19 779,4 cd a hodnota světelného toku je 852,7 lm.

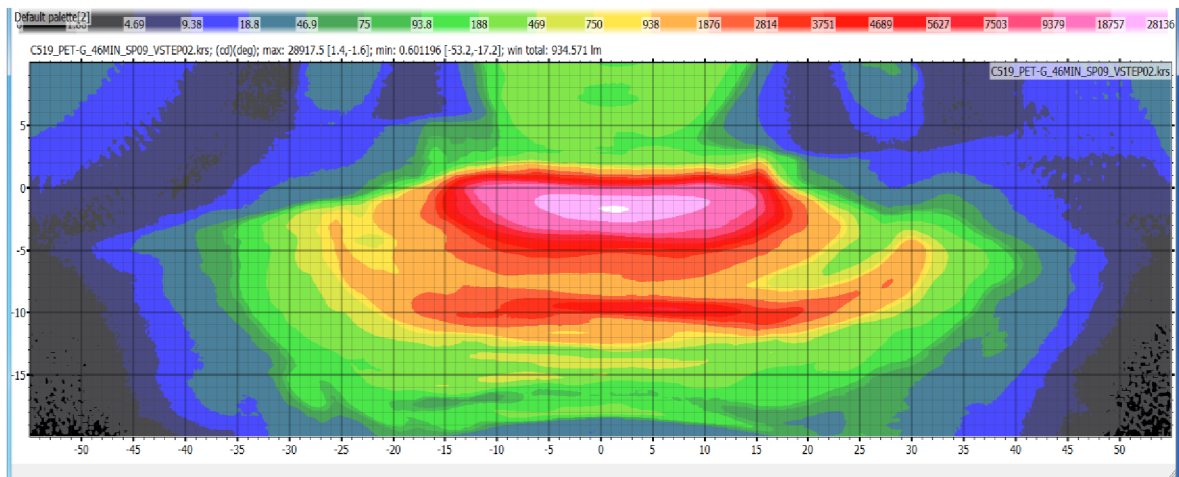


Obr. 5.39 Mapa vzorku 4 ve výchozí paletě.

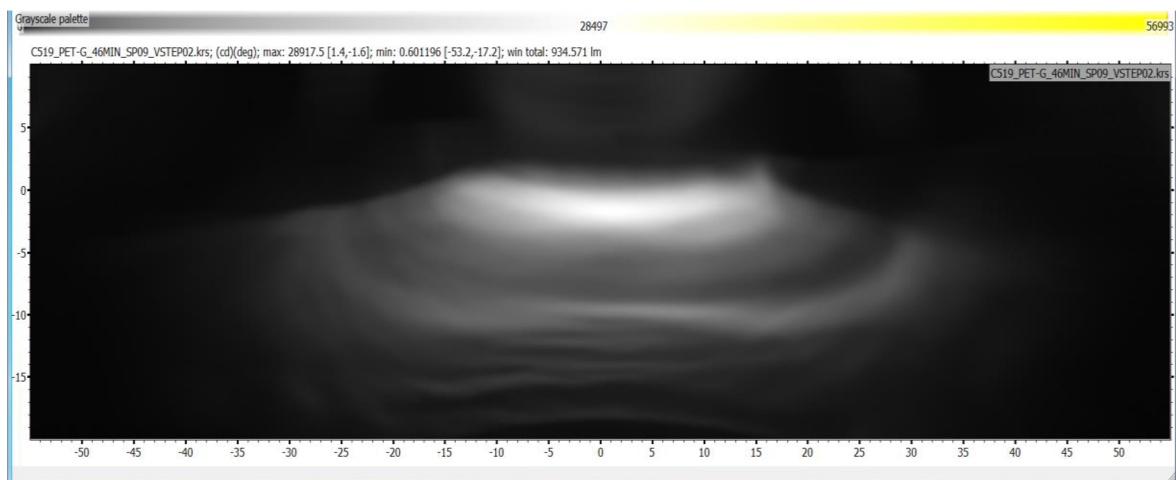


Obr. 5.40 Mapa vzorku 4 ve stupních šedi.

Na výsledné mapě vzorku 5 lze pozorovat velice nevhodné rozložení svítivosti, které je způsobeno vadami na optické ploše, viz obr. 5.41. Homogenita svícení je u tohoto vzorku také velmi nízká, viz obr. 5.42. Maximální naměřená hodnota svítivosti je 28 917,5 cd, přičemž celkový světelný tok je 934,6 lm.



Obr. 5.41 Mapa vzorku 5 ve výchozí paletě.



Obr. 5.42 Mapa vzorku 5 ve stupních šedi.

Výsledky fotometrického měření jsou uvedeny v tab. 5.6. Dle hodnocených parametrů světelného výstupu měřených vzorků se výchozímu hliníkovému reflektoru

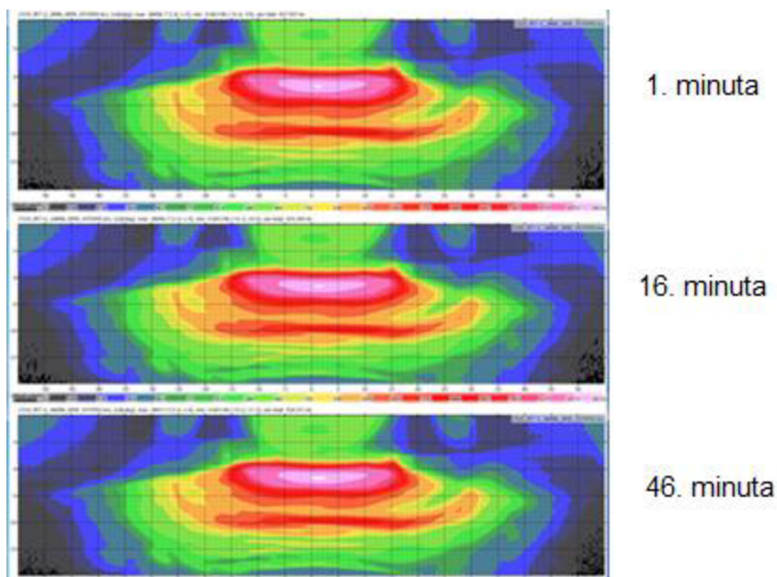
nejvíce přiblížil vzorek 2 tzn. reflektor vytisknutý na průmyslové tiskárně z materiálu ABS za použitím trysky o průměru 0,4 mm s výškou vrstvy 0,2 mm. Rozdíl maximální hodnoty svítivosti s výchozím vzorkem je minimální (pohybuje se kolem 180 cd). Největší rozdíl mezi vzorky 1 a 2 je ve světelném toku, kdy je tato veličina u vzorku 2 o 40,4 lm nižší, což je považováno za značný rozdíl. Tento vzorek má také symetrii a homogenitu světelného výstupu nejvíce podobnou s výchozím reflektorem. Nicméně i tento nejlepší výsledek měření není dostačující.

Tab. 5.6 Naměřené hodnoty.

Měřené veličiny		Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5
Světelný tok [lm]	1. minuta	-	930,1	942,3	853,8	937,9
	16. minuta	969,2	-	-	-	935,5
	31. minuta	-	928,7	941,2	852,7	-
	46. minuta	-	928,8	-	-	934,6
Maximální svítivost [cd]	1. minuta	-	27 895,5	22 725,2	19 599,0	28 496,7
	16. minuta	28 136,0	-	-	-	28 496,7
	31. minuta	-	27 955,6	22 725,2	19 779,4	-
	46. minuta	-	27 955,6	-	-	28 917,5

U vzorku 3 došlo vlivem nepřesné geometrie odrazné plochy k narušení světelného výstupu a rozptýlení světelných paprsků, což mělo za následek snížení maximální svítivosti. Hodnota světelného toku se sice více přibližuje výchozímu reflektoru, než u vzorku 2, nicméně svítivost je výrazně nízká. Měření vzorků z materiálu ASA a PET-G probíhalo pouze pro zjištění teplotní odolnosti materiálů, jelikož během úprav odrazné plochy došlo ke vzniku vad a bylo zřejmé, že světelný výstup bude výrazně ovlivněn a nemá smysl ho porovnávat.

Pro ověření teplotní odolnosti použitých materiálů byly vytisknuté reflektory měřeny v intervalech, přičemž první měření proběhlo ihned v 1. minutě ještě v nestabilizovaném stavu pro získání výchozích hodnot daného vzorku. Výchozí reflektor z hliníku se měřil až po stabilizaci v 16. minutě, přičemž další měření tohoto vzorku již nebyly nutné, jelikož nebylo potřeba ověřovat teplotní odolnost tohoto materiálu. Homogenita svícení i rozložení svítivosti v průběhu celého fotometrického měření zůstaly neměnné u všech vzorků, viz obr. 5.43. Naměřené isocandelové mapy získané v různých časech měření jsou uvedeny v příloze 2.



Obr. 5.43 Ukázka porovnání map z různých časů měření reflektoru z materiálu PET-G.

---

Dle výsledných hodnot lze pozorovat, že změna měřených veličin v průběhu celého měření (stabilizace a samotné měření) je u každého vzorku minimální. Rozdíly naměřeného světelného toku jsou u jednotlivých vzorků v řádu jednotek, zatímco maximální svítivost je v některých případech dokonce stejná.

Průběh měření tedy ukázal, že všechny použité materiály, ze kterých byly reflektory vytisknuty (ABS, ASA, PET-G), jsou dostatečně odolné proti teplotní deformaci, jelikož během svícení nedošlo vlivem zvýšené teploty ke změně tvaru reflektorů, která by během měření výrazně ovlivnila světelný výstup. Je však nutno podotknout, že značný vliv na tuto skutečnost má chladičový systém modulu.

## 6 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Tato kapitola pojednává o technických a ekonomických aspektech výroby reflektoru pomocí aditivní technologie. Zhodnocení bylo vypracováno především se záměrem porovnání nákladů na výrobu reflektoru 3D tiskem s cenou prototypů ve firmě Varroc Lighting Systems s.r.o. Většina prototypových součástí se ve firmě přímo nevyrábí, ale nakupují se od dodavatelů, přičemž se pro dosažení kvalitní odrazné plochy prototypů optických dílů musí provést také lakování a kovení stejně jako u dílů zhotovených na 3D tiskárnách, o kterých práce pojednává. Uvedené dvě operace proto nejsou v ekonomickém zhodnocení zahrnuty.

Ve společnosti Varroc Lighting Systems s.r.o. se v roce 2019 utratilo za prototypy celkem 8 647 556 Kč, z čehož byly pomocí FDM technologie vyrobeny díly v hodnotě 2 619 556 Kč. Jedná se o tisk funkčních dílů, přípravků pro uchycení dílců během testů a vzorků pro prezentaci zákazníkovi [90].

Dále je uveden popis výpočtu cen vzorků reflektoru vytisknutých na stolní 3D tiskárně. Do celkových nákladů na zhotovení výtisků je zahrnuta cena spotřebovaného materiálu a náklady na úpravu modelu, které jsou tvořeny z ceny materiálu použitého pro zkušební výtisky a zejména mzdy pracovníka, jelikož pro tisk na stolní 3D tiskárně bylo potřeba upravit digitální model tak, aby bylo možné zhotovit kvalitní výtisk.

Pro výpočet ceny spotřebovaného materiálu na zkušební tisky bylo potřeba stanovit objem zkušebních výtisků a cenu použitého materiálu PET–G. Objem byl určen pomocí softwaru PrusaSlicer a cena materiálu PET–G byla vyčíslena na 0,728 Kč.cm<sup>-3</sup>. Cena jednotlivých zkušebních výtisků byla vypočtena dle (6.1), přičemž celkové materiálové náklady se získaly součtem těchto cen a byly vyčísleny na 32,6 Kč. V tab. 6.1 jsou uvedeny vypočtené ceny výtisků.

$$N_t = V_{sm} \cdot C_v \text{ [Kč]} \quad (6.1)$$

kde:  $N_t$  [Kč] - cena výtisku,  
 $V_{sm}$  [cm<sup>3</sup>] - spotřebovaný objem materiálu,  
 $C_v$  [Kč.cm<sup>-3</sup>] - cena použitého materiálu.

Tab. 6.1 Cena zkušebních výtisků.

Zkušební výtisk	$V_{sm}$ [cm <sup>3</sup> ]	$C_v$ [Kč.cm <sup>-3</sup> ]	$N_t$ [Kč]
Zkušební výtisk 1	8,000	0,728	5,8
Zkušební výtisk 2	7,828	0,728	5,7
Zkušební výtisk 3	9,540	0,728	6,9
Zkušební výtisk 4	10,142	0,728	7,4
Zkušební výtisk 5	9,198	0,728	6,7
<b>Celkem</b>			<b>32,6</b>

Dále bylo potřeba určit hodinovou mzdu pracovníka a celkovou dobu provádění modifikace. Hodinová mzda byla stanovena na 200 Kč a časová náročnost úpravy modelu byla určena přibližně na 6 hodin (úprava 3D modelu a zhotovení zkušebních výtisků). Celkové náklady na úpravu modelu se poté vypočítaly podle vztahu (6.2).

$$N_p = H_m \cdot t_p + C_z = 200 \cdot 6 + 32,6 = 1232,6 \text{ Kč} \quad (6.2)$$



kde: $N_p$ [Kč]	-	náklady na úpravu modelu,
$H_m$ [Kč.hod <sup>-1</sup> ]	-	hodinová mzda,
$t_p$ [hod]	-	pracovní doba,
$C_z$ [Kč]	-	celkové materiálové náklady na zkušební výtisky.

Nutno podotknout, že náročnost úpravy modelu je závislá na geometrii dílu a provádí se pro daný typ součástí. Jakmile je model upraven do tisknutelné podoby, náklady na tisk poté tvoří výhradně spotřebovaný materiál.

Náklady na materiál pro tisk vzorků reflektoru (již upraveného modelu) na stolní 3D tiskárně jsou nízké, jelikož se vytvářel díl o malých rozměrech. Cena druhého použitého materiálu ASA byla stanovena na 0,668 Kč.cm<sup>-3</sup> a materiálové náklady vzorků reflektoru byly vyčísleny stejně jako u zkušebních výtisků dle (6.1). V tab. 6.2 jsou uvedeny vypočtené ceny vzorků reflektoru z materiálu ASA a PET-G.

Tab. 6.2 Ceny vzorků reflektoru zhotovených na stolní tiskárně.

Materiál	$V_{sm}$ [cm <sup>3</sup> ]	$C_v$ [Kč.cm <sup>-3</sup> ]	$N_t$ [Kč]
ASA	9,198	0,668	6,15
PET-G	9,198	0,728	6,70

Dodavatel Vshaper Sp. z.o.o. stanovil cenu za vzorek reflektoru z materiálu ABS, který byl zhotoven na průmyslové tiskárně Vshaper PRO, na 28,9 Kč. Tab. 6.3 obsahuje ceny výtisků reflektoru spolu s cenou původního prototypu a sériového reflektoru [90].

Tab. 6.3 Ceny reflektorů [90].

Reflektor	Výrobní technologie	Tiskárna	Materiál	Úprava modelu [Kč]	Cena [Kč.ks <sup>-1</sup> ]
Výtisk	FDM	Original Prusa i3 MK3	ASA	1232,6	6,15
			PET-G		6,70
Výtisk		Vshaper PRO	ABS	-	28,90
Prototyp	SLS	-	PA-GF	-	45,70
Sériový kus	Tlakové lití	-	hliník	-	44,20

Uvedená tab. 6.3 ukazuje, že náklady na zhotovení reflektoru na stolní tiskárně jsou nejvyšší, a to z důvodu nutnosti upravovat model. Na druhou stranu, jakmile jsou tyto úpravy provedeny, náklady na tisk jsou velice nízké. Ovšem v průběhu celého výrobního procesu se ukázalo, že takto zhotovené výtisky nejsou vhodné pro úpravu povrchu lakováním a kovením. Toto zjištění spolu s pracnější přípravou tisku (náročnější úprava modelu) vedlo k upřednostnění průmyslové tiskárny před stolní.

Dále dle tab. 6.3 je cena reflektoru vytisknutého na průmyslové tiskárně o cca 37 % nižší, než cena za prototyp od externího dodavatele. To představuje roční úsporu 963 000 Kč z celkové částky za nakoupené prototypy zhotovené FDM technologií. V případě nákupu 3D tiskárny Vshaper PRO, která stojí 1 223 924 Kč, by byla vzhledem k úspoře nákladů za prototypové díly návratnost zhruba 1 rok a 3 měsíce. V praxi se ovšem výběr výrobního zařízení provádí na základě porovnání vybraných kritérií z několika nabídek, avšak pro účely této práce je návratnost vztažena k použité 3D tiskárně Vshaper PRO [90].

---

## ZÁVĚR

Uvedená diplomová práce měla za cíl charakterizovat světlomet, vybrat jeden jeho optický prvek a zhotovit jej jednou z popsaných metod aditivní výroby. Tuto součást následně upravit pro zástavbu do modulu a porovnat její světelný výstup se sériovým dílcem.

Teoretická část práce přibližuje způsob výroby hliníkového reflektoru, který byl vybrán jako optický díl pro výrobu pomocí aditivní technologie. Ze všech metod 3D tisku, které byly v práci popsány, byla vybrána metoda FDM pro tvorbu prototypu, a to hlavně z důvodu její největší rozšířenosti a dostupnosti poměrně široké škály materiálů.

V rámci praktické části byl digitální model reflektoru převeden do formátu pro 3D tisk, a na základě několika zkušebních tisků upraven tak, aby nejlépe odpovídal podmínkám použité technologie. Takto vyrobené prototypy na stolní tiskárně a na průmyslové tiskárně u potenciálního dodavatele byly následně polakovány a pokoveny pro dosažení kvalitní odrazné plochy.

Na vzorcích z materiálu ASA a PET-G zhotovených na stolní tiskárně vznikly v průběhu úpravy povrchu vady, které znemožňovaly přímé porovnání výsledků měření s výchozími hodnotami. Konstrukční provedení tohoto typu tiskárny je s otevřenou pracovní komorou, která neumožňuje dosažení stabilní teploty prostředí a vzhledem k náchylnosti materiálů na změny teplot se lze domnívat, že tyto vady byly způsobeny právě použitým výrobním zařízením, jelikož u vzorků z materiálu ABS vytisknutých na průmyslové tiskárně, které podstoupily totožné operace úpravy povrchu, nedošlo ke vzniku zjevných vad.

Porovnání výsledků měření reflektorů z materiálu ABS vytisknutých na průmyslové tiskárně se stávajícím hliníkovým reflektorem ukázalo, že nejlepšími výsledky dosáhl vzorek tisknutý tryskou o průměru 0,4 mm s výškou vrstvy 0,2 mm. Nicméně dle naměřených hodnot, a hlavně homogenity svícení nelze FDM aditivní technologii za použití daných postupů úpravy povrchu, jež jsou běžně pro prototypové součásti používány, doporučit pro tvorbu prototypů optických dílů, na kterých je měřena a hodnocena fotometrie. Lze ji však uplatnit pro výrobu nevzhledových dílců, součástí přípravků ve výrobě i pro interní testování.

Nicméně i přes nedostačující výsledky měření fotometrie výtisků lze díky zjištění, že všechny použité materiály (ASA, PET-G, ABS) jsou teplotně dostatečně odolné, aplikovat tento výrobní postup pro tvorbu svítících vzhledových vzorků modulů a světlometů, kde není kladen důraz na kvalitu světelného výstupu. Navíc při vhodné optimalizaci tiskového procesu je možné dosáhnout kvalitnějších výtisků, které by mohly splňovat nároky kladené na zkušební optické díly.

V rámci technicko – ekonomického zhodnocení bylo zjištěno, že cena dílce zhotoveného na vlastní 3D průmyslové tiskárně by byla o 37 % nižší, než u dílce nakoupeného externě na výrobu prototypu pro daný projekt. Investice do vybrané tiskárny od polského dodavatele Vshaper Sp. z.o.o., která by svou velikostí pracovní komory umožnila zpracovat významnou část zakázek, jež jsou nyní dodávány externími dodavateli, by se vrátila zhruba za 1 rok a 3 měsíce.

Závěrem lze konstatovat, že všechny vytyčené cíle diplomové práce byly splněny.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Historie a budoucnost osvětlení automobilů: Od svíčky k laseru. In: *Auto.cz* [online]. 3. 2. 2014 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/historie-a-budoucnost-osvetleni-automobilu-od-svicky-k-laseru-79316>
- [2] SAJDL, Jan. Světlo met automobilu. In: *Autolexicon.net* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/svetlomet-automobilu/>
- [3] PAVLŮSEK, Ondřej. Audi R8 jako první dostane světlo mety pouze ze světelných diod. In: *Auto.cz* [online]. 15.8.2007 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/audi-r8-jako-prvni-dostane-svetlomety-pouze-ze-svetelnych-diod-10324>
- [4] ŠKODA AUTO A.S. *Vývoj a konstrukce světlo metů*. Mladá Boleslav, 2007.
- [5] ZDENĚK, Jan, Bronislav ŽDÁNSKÝ a Jindřich KUBÁT. *Automobily 6 - Elektrotechnika motorových vozidel II*. 3. vydání. Brno: Avid, 2013. ISBN 978-80-87143-27-8.
- [6] VANÍK, František a Vilém HOLEČEK. *Světlo mety a elektronika světlo metů* [online]. 13.11.2009 [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: [http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy\\_z\\_projektu/03~Partner%20-%20%C5%A0KODA%20Auto/P2-06\\_Sv%C4%9Btlomety%20a%20elektronika%20-%20Hole%C4%8Dek.pdf](http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy_z_projektu/03~Partner%20-%20%C5%A0KODA%20Auto/P2-06_Sv%C4%9Btlomety%20a%20elektronika%20-%20Hole%C4%8Dek.pdf)
- [7] SMUTNY, Miloslav. Plastic in Automotive Lighting [prezentace]. Šenov u Nového Jičína: VLS, 1.2019 [cit. 2019-11-21].
- [8] ZDRAŽIL, Zdeněk. VÝLISKY Z PLASTŮ&VSTŘIKOVACÍ FORMY [prezentace]. Šenov u Nového Jičína: VLS, 6.6.2014 [cit. 2019-11-21].
- [9] FERBAS, Petr. Optika a její využití v automobilovém osvětlení [prezentace]. Šenov u Nového Jičína: VLS, 2019 [cit. 2019-11-21].
- [10] VLK, František. OSVĚTLENÍ MOTOROVÝCH VOZIDEL. *SOUDNÍ INŽENÝRSTVÍ*. 2006, roč. 17, č. 5, s. 292-300. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2006-05-292-300.pdf>
- [11] MCCARTER, Glenn. Optics 101 [prezentace]. Šenov u Nového Jičína: VLS, 28.2.2011 [cit. 2019-11-21].
- [12] LED moduly jsou srdcem světlo metů. In: *Tvoříme světlo* [online]. Jun 29, 2018 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.tvorimesvetlo.cz/led-moduly-jsou-srdcem-svetlometu/>
- [13] RYŠAVÝ, Robert. Vývoj modulu [konzultace]. Šenov u Nového Jičína: VLS, 28.5.2020
- [14] O nás. *Varroc Lighting Systems* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.varroclighting.com/aboutUs/SitePages/AboutUs.aspx>
- [15] Lokality. *Varroc Lighting Systems* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.varroclighting.com/contact/SitePages/ContactDetails.aspx?contactCountry=Czech%20Republic>

- 
- [16] Společnost Varroc Lighting Systems má nové Vývojové centrum elektroniky. *Automa* [online]. 2017(5) [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: [https://automa.cz/cz/casopis-clanky/spolecnost-varroc-lighting-systems-ma-nove-vyvojove-centrum-elektroniky-2017\\_05\\_0\\_10512/](https://automa.cz/cz/casopis-clanky/spolecnost-varroc-lighting-systems-ma-nove-vyvojove-centrum-elektroniky-2017_05_0_10512/)
- [17] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
- [18] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [19] NOVÁ, Iva, Zdeněk HOŠEK a Iva NOVÁKOVÁ. Rozvoj tlakového lití. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004(5) [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rozvoj-tlakoveho-liti.html>
- [20] TALANDA, Ivan. Technologie výroby reflektorů [konzultace]. Olomouc: ALW, 4.6.2020.
- [21] SUCHÁNEK. Otěruvzdorné povrchové úpravy - 2. část. *TriboTechnika* [online]. 2011(4) [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42011/oteruvzdorne-povrchove-upravy-2-cast.html>
- [22] FOŘT, Tomáš. *Charakterizace nanostruktur deponovaných PVD a CVD technologiemi* [online]. Brno, 2009 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=20198](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=20198). Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky.
- [23] Současnost a trendy povlakování technologií PVD. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003(4) [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologie-pvd.html>
- [24] ADÁMEK, Martin. *Technologie výroby a používané materiály* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s\\_2\\_3\\_2.htm](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_2_3_2.htm)
- [25] 2. Mechanism of the vacuum thin film coating system. *ShinMaywa* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: [https://www.shinmaywa.co.jp/vac/english/vacuum/vacuum\\_2.html](https://www.shinmaywa.co.jp/vac/english/vacuum/vacuum_2.html)
- [26] LIBRA, Martin. Naprašování tenkých vrstev. *ELEKTRO* [online]. 2003(7) [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/naprasovani-tenkych-vrstev--14441>
- [27] Additive Manufacturing. *Fast Radius* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.fastradius.com/capabilities/additive-manufacturing/>
- [28] Aditivní výroba. In: *3D-tisk.cz* [online]. 26.2.2013 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/aditivni-vyroba/>
- [29] Aditivní výroba - moderní způsob obrábění. In: *AXIOM TECH* [online]. 4. 9. 2017 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.axiomtech.cz/25836n-aditivni-vyroba-moderni-zpusob-obrabeni>
-

- 
- [30] GRAMES, Emmett. 3D Printing Layer Height: How Much Does It Matter? In: *All3DP* [online]. Jan 12, 2020 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-layer-height-how-much-does-it-matter/>
- [31] HORÁČEK, Libor, Vojtěch PRAŽMA a Pavel VYDRA. Aditivní technologie pro Průmysl 4.0. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2018(4) [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aditivni-technologie-pro-prumysl-4-0.html>
- [32] Additive Fabrication. *CustomPart.Net* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- [33] ZUZA, Mikolas. Vše o tryskách s různým průměrem. In: *Josef Průša* [online]. 29. 5. 2018 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruzny-m-prumerem/>
- [34] The Free Beginner's Guide. *3D Printing Industry* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide>
- [35] KOVÁČIK, Miroslav. HISTORIE 3D TISKU.... In: *3dfactory.cz* [online]. 27. 10. 2017 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/10/27/historie/>
- [36] KERNS, Jeff. 3D Printing: The Machine that Started It All. In: *MachineDesign* [online]. AUG 23, 2017 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21835865/3d-printing-the-machine-that-started-it-all>
- [37] REVERSE ENGINEERING. In: *Department of Reverse Engineering and Additive Technologies* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <http://3dlaboratory.cz/reverse-engineering/>
- [38] FORT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. *Autodesk Inventor - Funkční navrhování v průmyslové praxi*. Brno: Computer press, 2007, 318 s. ISBN 978-80-251-1773-6.
- [39] COYKENDALL, John. 3D opportunity for aerospace and defense. In: *Deloitte* [online]. 02 June 2014 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-aerospace.html>
- [40] REDWOOD, Ben. The additive manufacturing process. In: *3D Hubs* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-process/>
- [41] 2020 Most Common 3D Printer File Formats. In: *All3DP* [online]. Feb 13, 2020 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printer-file-format/>
- [42] Standardising File Formats for Additive Manufacturing Software — An Ongoing Challenge. In: *AMFG* [online]. 03 March 2017 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2017/03/03/additive-manufacturing-software-formats/>
-

- 
- [43] CHAKRAVORTY, Dibya. STL File Format (3D Printing) – Simply Explained. In: *All3DP* [online]. Feb 14, 2019 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>
- [44] GIANG, Ken. 3D printing STL files: A step-by-step guide. In: *3D Hubs* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-stl-files-step-step-guide/>
- [45] How To Prepare STL Files. *Stratasys* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/resources/tutorials/how-to-prepare-stl-files>
- [46] The Most Common STL File Errors You Will Meet in 3D Printing Process. *Facfox* [online]. 2019-12-24 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://facfox.com/docs/the-most-common-stl-file-errors-you-will-meet-in-3d-printing-process>
- [47] The Top 5 STL File Errors You Should Know Before You Print. In: *AMFG* [online]. 19 April 2018 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/04/19/top-5-stl-file-errors-you-should-know/>
- [48] NELLI, Fabio. How to check and repair STL files for 3D printing. In: *Meccanismo Complesso* [online]. 31 January 2014 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.meccanismocomplesso.org/en/how-to-check-and-repair-stl-files-for-3d-printing/>
- [49] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. Understand and fix common STL file errors. In: *3D Hubs* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fixing-most-common-stl-file-errors/>
- [50] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. Introduction to SLA 3D printing. In: *3D Hubs* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>
- [51] Stereolithography. *CustomPart.Net* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- [52] Technologie Rapid Prototypingu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002(1) [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-rapid-prototypingu.html>
- [53] Stereolitografie. *Materialise* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/stereolitografie>
- [54] Fused Deposition Modeling (FDM). *CustomPart.Net* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [55] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. Introduction to FDM 3D printing. In: *3D Hubs* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>
- [56] Selective Laser Sintering. *CustomPart.Net* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
-

- 
- [57] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. Introduction to SLS 3D printing. In: *3D Hubs* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/>
- [58] Multi Jet Fusion. *Materialise* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/multi-jet-fusion>
- [59] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. HP MJF vs. SLS: A 3D printing technology comparison. In: *3D Hubs* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison/>
- [60] Multi Jet Fusion, MJF. *Manufacturing Guide* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/multi-jet-fusion-mjf>
- [61] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. Introduction to material jetting 3D printing. In: *3D Hubs* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>
- [62] Jetted Photopolymer. *CustomPart.Net* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer>
- [63] Carbon DLS. *Proto Labs* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.protolabs.com/services/3d-printing/carbon-digital-light-synthesis/>
- [64] PLEWA, Kat. Why should you use CLIP (DLS) technology for your next project? In: *Sculpteo* [online]. Mar 27, 2019 [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2019/03/27/why-should-you-use-clip-dls-technology-for-your-next-project/>
- [65] How Carbon's Digital Light Synthesis Technology Is Changing the Game for 3D Printing. In: *AMFG* [online]. 06 February 2018 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/02/06/digital-light-synthesis-paragon-carbon-partnership/>
- [66] Digital Light Synthesis™. *Carbon* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.carbon3d.com/our-technology/>
- [67] Insights into Continuous Liquid Interface Production (CLIP) and Digital Light Processing (DLP) 3D Printers. In: *Additive3d.com* [online]. August 18, 2016 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://additive3d.com/insights-continuous-liquid-interface-production-clip-digital-light-processing-dlp-3d-printers/>
- [68] Hardware That Drives Business. *Carbon* [online]. [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.carbon3d.com/hardware/>
- [69] Carbon Materials for DLS™ 3D Printing. *Carbon* [online]. [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.carbon3d.com/materials/>
- [70] Digital Light Processing, DLP. *Manufacturing Guide* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/digital-light-processing-dlp>
- [71] SLA vs. DLP: Guide to Resin 3D Printers. In: *Formlabs* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>
-

- 
- [72] Laminated Object Manufacturing, LOM. *Manufacturing Guide* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/laminated-object-manufacturing-lom>
- [73] LOM (Laminated Object Manufacturing): 3D Printing with Layers of Paper. *Sculpteo* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/>
- [74] Laminated Object Manufacturing (LOM). *CustomPart.Net* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
- [75] RYŠAVÝ, Robert. Charakteristika reflektoru [konzultace]. Šenov u Nového Jičína: VLS, 28.5.2020
- [76] VSHAPER PRO. In: *Mayis Tasarim* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <http://www.mayistasarim.com/proen.pdf>
- [77] About Us. *Vshaper* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://vshaper.com/en/about-us/>
- [78] FLYNT, Joseph. Original Prusa i3 MK3 Review. In: *3D Insider* [online]. May 19, 2018 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/original-prusa-i3-mk3-review/>
- [79] O nás. *Prusa Research* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/o-nas/>
- [80] Original Prusa i3 MK3 Review: Best 3D Printer of 2018. In: *All3DP* [online]. May 5, 2019 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/original-prusa-i3-mk3-review-3d-printer/>
- [81] 3D TISKÁRNÝ PRUSA RESEARCH. *3D Station* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.3dstation.cz/prusa/>
- [82] PrusaSlicer. *Prusa Research* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/prusaslicer/>
- [83] BODY 340 PLASTOFIX sprej základní barva na plast 400 ml. *BarvyDOFAL* [online]. [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <https://www.dofal.cz/oprava-plastu/63-body-340-plastofix-sprej-zakladni-barva-na-plast-400-ml.html>
- [84] Lakování Plnění. In: *Autolaky-eshop* [online]. 21. 12. 2015 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.autolaky-eshop.com/clanek/18/lakovani-plneni/>
- [85] HB BODY® P334 PRO HS PRIMER 2K AKRYLÁTOVÝ ZÁKLADOVÝ PLNIČ. *ELEMENT-SHOP.CZ* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.autolaky-eshop.cz/product/hb-body---automobilovy-prumysl/akrylatova-tuzidla/body-h725-rychle-tuzidlo-do-2k-plnicu/2325>
- [86] MaxMeyer Čirý lak UHS 1.360.0350. In: *MayMeyer Car Refinish* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: [https://buyat.ppg.com/Refinish\\_SSA/Common/ShowPdf.aspx?AppId=2&BrandId=2&LanguageId=cs-CZ&IntDialCode=420&PdfId=12430&ProductCode=%271.360.0350%27](https://buyat.ppg.com/Refinish_SSA/Common/ShowPdf.aspx?AppId=2&BrandId=2&LanguageId=cs-CZ&IntDialCode=420&PdfId=12430&ProductCode=%271.360.0350%27)
-



- [87] RYŠAVÝ, Robert. Technologie napařování [konzultace]. Šenov u Nového Jičína: VLS, 28.5.2020
- [88] ZÁPRAŽNÝ, Mikuláš. Měření fotometrie [konzultace]. Šenov u Nového Jičína: VLS, 9.6.2020
- [89] Fotometrické veličiny. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>
- [90] Náklady na výrobu prototypových dílců. Šenov u Nového Jičína: VLS, 23.6.2020

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
PP	-	Polypropylen
PC	-	Polykarbonát
např	-	například
ECE	-	Economic Commission for Europe
tzv	-	takzvaně
CAD	-	Computer Aided Design
CAE	-	Computer Aided Engineering
popř	-	popřípadě
PVD	-	Physical Vapour Deposition
CVD	-	Chemical Vapour Deposition
SLA	-	Sterolitografie
SLS	-	Selektivní Laserové Slinování
FDM	-	Fused Deposition Modeling
SL	-	Laserové Slinování
BPM	-	Ballistic Particel Manufacturing
LOM	-	Laminated Object Manufacturing
LENS	-	Laser Engineered Net Shaping
EBAM	-	Electron Beam Additive Manufacturing
DOD	-	Drop On Demand
SLS	-	Selective Laser Sintering
MJF	-	Mult Jet Fusion
DMLS	-	Direct Metal Laser Sintering
SLM	-	Selective Laser Melting
EBM	-	Electron Beam Melting
DLP	-	Digital Light Processing
CLIP	-	Continuous Liquid Interface Production
PA 12	-	Polyamid 12
RPU	-	Rigid Polyurethane
EPU	-	Elastomeric Polyurethane
ABS	-	Akrylonitrilbutadienstyren
tzn	-	to znamená
PET-G	-	Polyetyléntereftalát-glykol
ASA	-	Akrylonitril-styren-akryl
$\Phi$	lm	světelný tok
I	cd	svítivost
$\Omega$	sr	prostorový úhel
$N_t$	Kč	cena výtisku
$V_{sm}$	cm <sup>3</sup>	spotřebovaný objem materiálu
$C_v$	Kč.cm <sup>-3</sup>	cena použitého materiálu
$N_p$	Kč	náklady na úpravu modelu
$H_m$	Kč.hod <sup>-1</sup>	hodinová mzda
$t_p$	hod	pracovní doba
$C_z$	Kč	celkové materiálové náklady na zkušební výtisky

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Dokument k 3D tiskárně Vshaper PRO
- Příloha 2 Isocandelové mapy jednotlivých vzorků z různých časů měření

# VSHAPER PRO

Prints created in VSHAPER PRO, widely popular in medicine, automotive and aerospace industries, are often used as alternatives to elements made of metal.

Monolithic construction, closed chamber and heated working platform provide full control over the process of cooling and welding subsequent paths. Additional emergency power supply guarantees continuous work of 3D Printers in industrial conditions.

3D Prints created with the use of VSHAPER PRO are characterized by high endurance during shock loading and when being stretched or bent. They are most commonly used by companies producing gear wheels, ring gears, rotor blades and heavily exploited machine parts.



*When choosing a device, we commissioned PEEK printing to many different producers of 3D Printers. The quality of VSHAPER prints was by far the best.*

**Marek Schnitzer**  
Technical University of Košice

> PEEK Printing

> 450°C Printing Temperature

> Heated Table

> Isolated Heated Chamber

## Technical specification

### Printing Parameters

- Printing technology • Fused Filament Fabrication
- Workspace • 270 x 270 x 200 mm
- Resolution • 0.05 mm - 0.3 mm
- The accuracy of the position of layers • 30 µm
- Positioning accuracy • XY 11 µm / Z 2 µm
- Extruder • Two exchangeable extruders **VPREC-PRO** and **VPREC-SINGLE**
- Print temperature • Max 450°C
- Nozzle diameter • Standard: 0.4 mm nozzle (Optional: 0.2, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2)

### Working chamber

- Construction • Closed (isolated, with constant temp. inside)
- Heating • Yes (with active heating up to 70°C)
- Ventilation • Yes (with carbon filter)

### Working platform

- Type • Vacuum table
- Area • Removable polymer surface
- Heating • Yes (build platform temperature up to 150°C – ideal material adhesion)
- Auto leveling • Yes

### Filament

- Filament diameter • 1,75 mm
- Filament feeding accuracy • 1 µm
- Automatic control of the beginning and the end of filament • Yes
- Recommended materials for **VPREC-PRO** • PEEK, PEI, PPSU
- Recommended materials for **VPREC-SINGLE** • PLA, ABS, PMMA, PA, PC, PET-G, HIPS, PVA

### Mechanical and electrical parameters

- Construction • Powdered steel
- Housing • Powdered aluminium + anodized aluminium
- Z axis • Ball screw
- XY axis • Linear guides
- Engines • NEMA17
- The volume of noise during printing • < 40 dB
- Power supply • 100-240V ~ 2A, 50-60 Hz

### Control

- Processor • LPC1769 - ARM® Cortex®-M3 MCU 32 Bit
- Touch panel • Yes
- Display • Monochrome (128 x 64 px)
- Interfaces • USB, SD Card, Ethernet

- Operating system • Windows (7/8/10), Mac OSX (10.8/10.9), Linux (Ubuntu 10.04+)

### Dimensions and weight

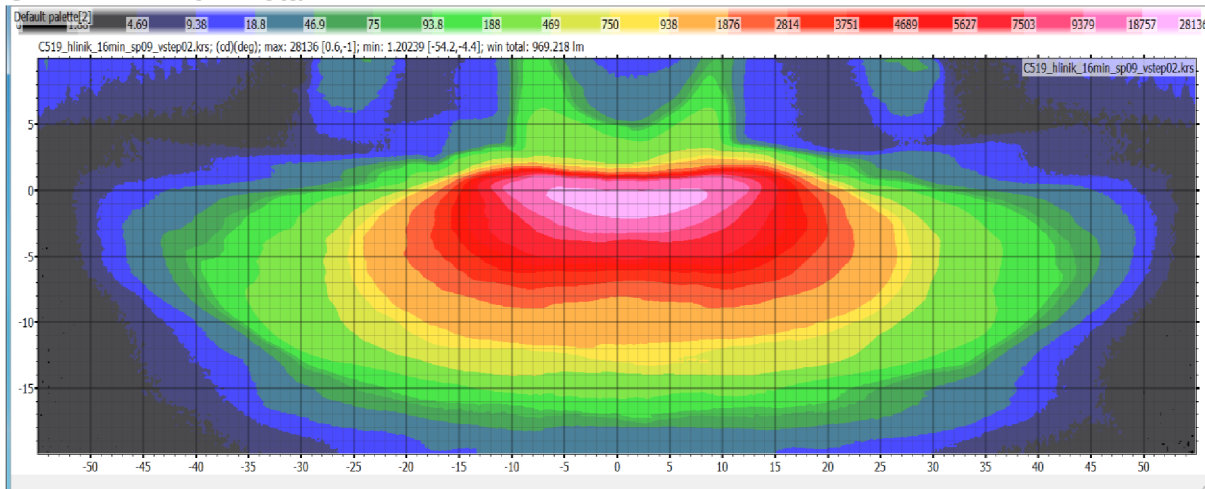
- External dimensions • 590 x 462 x 463 mm
- Weight • 37 kg

## VSHAPER PRO

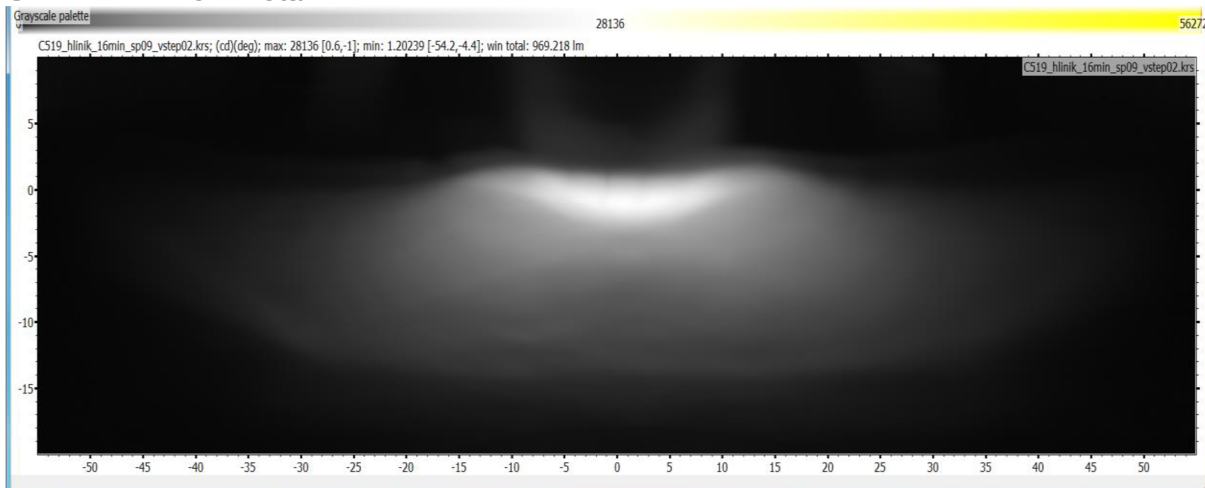
## Příloha 2

### Vzorek 1

Čas měření: 16.minuta

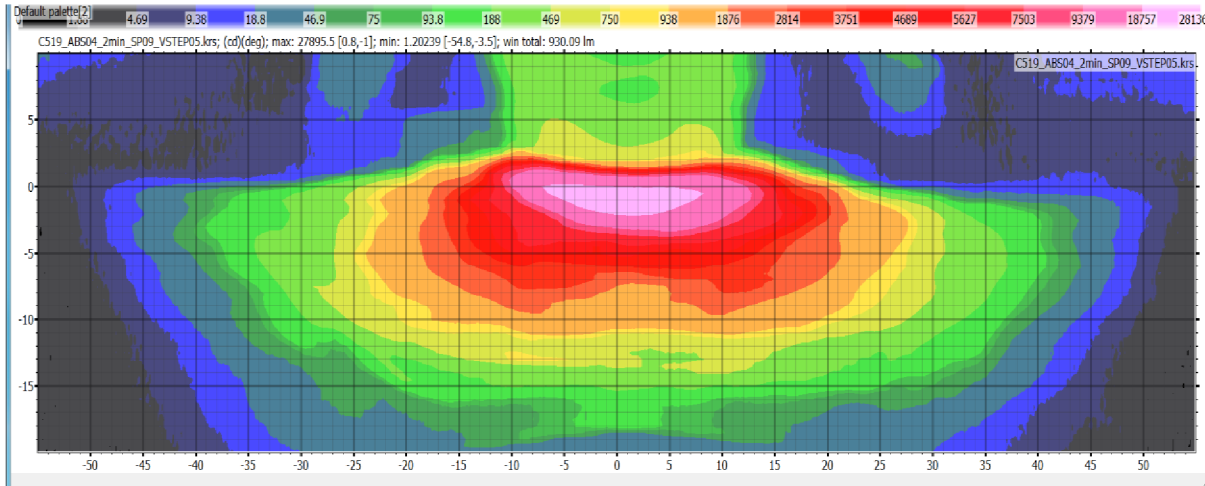


Čas měření: 16.minuta

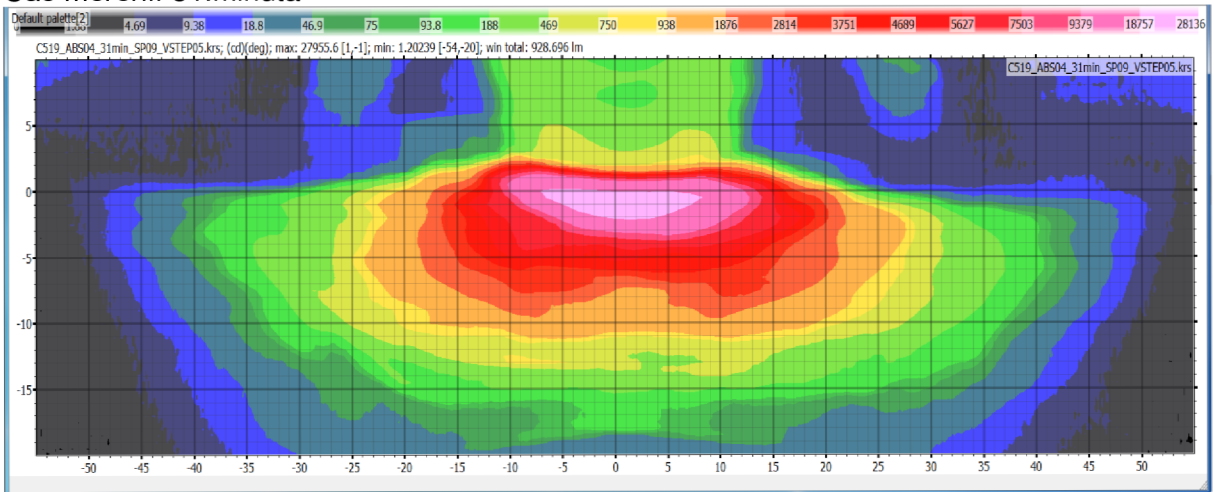


### Vzorek 2

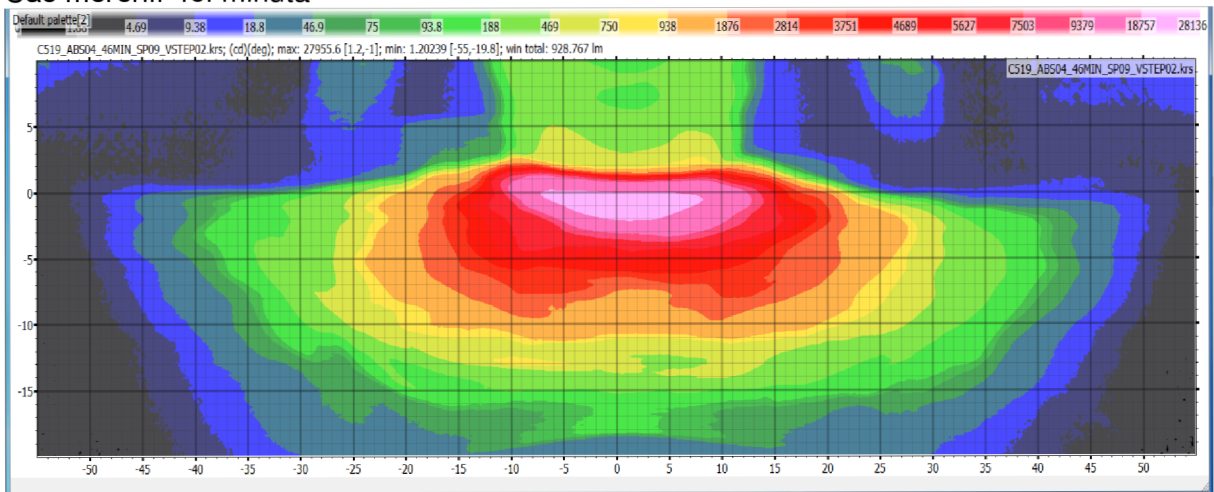
Čas měření: 1.minuta



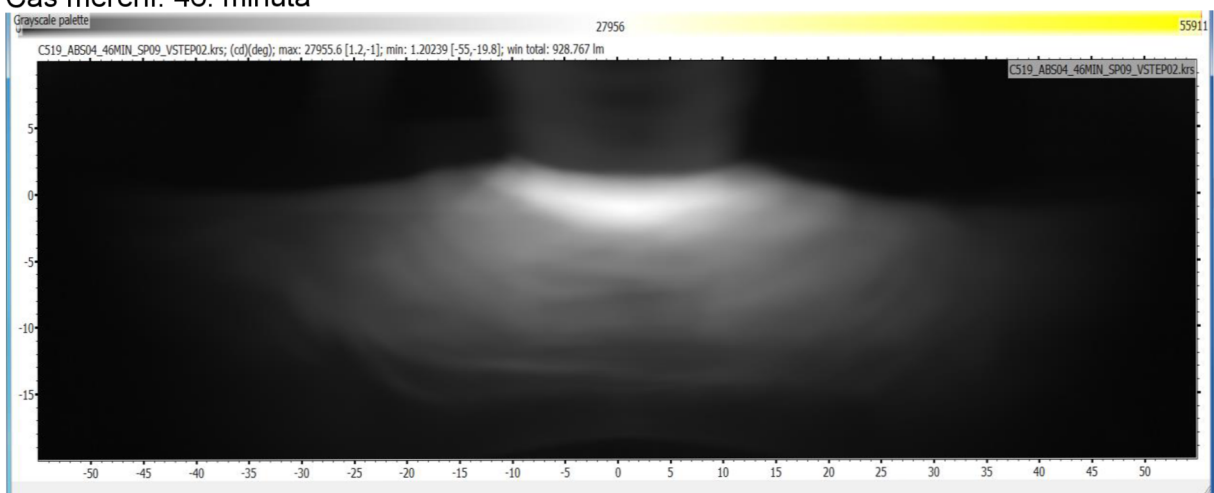
Čas měření: 31.minuta



Čas měření: 46. minuta

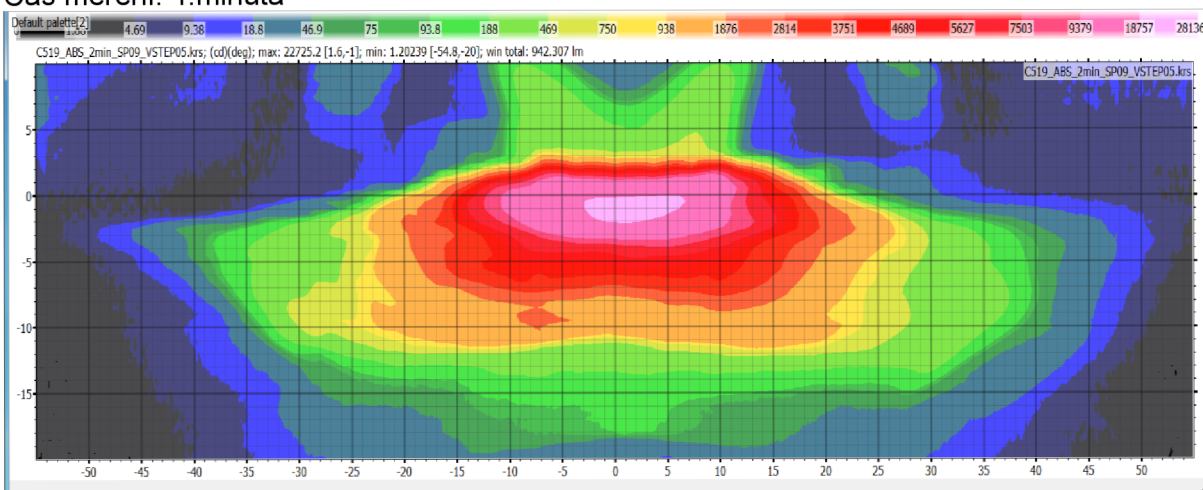


Čas měření: 46. minuta

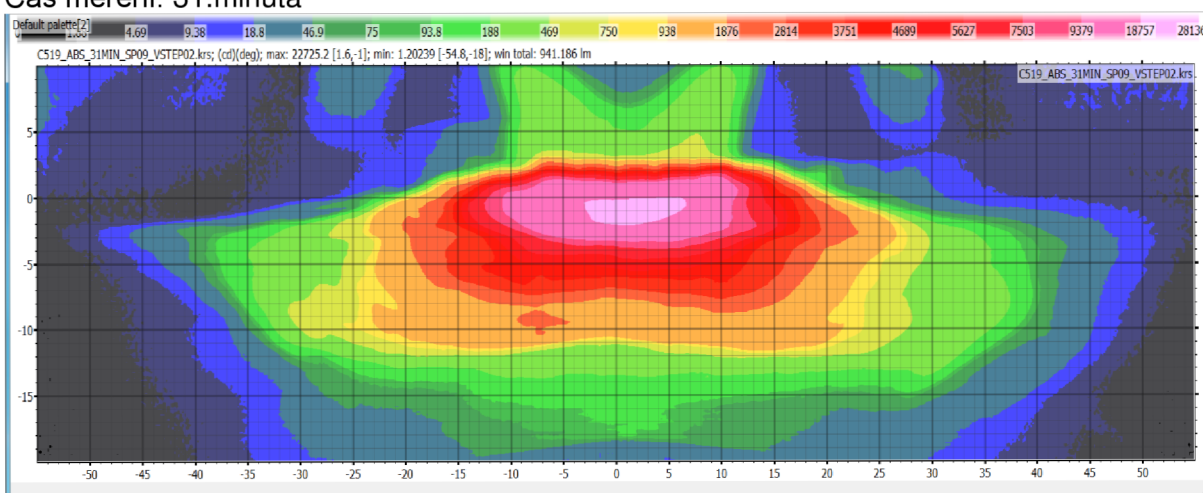


### Vzorek 3

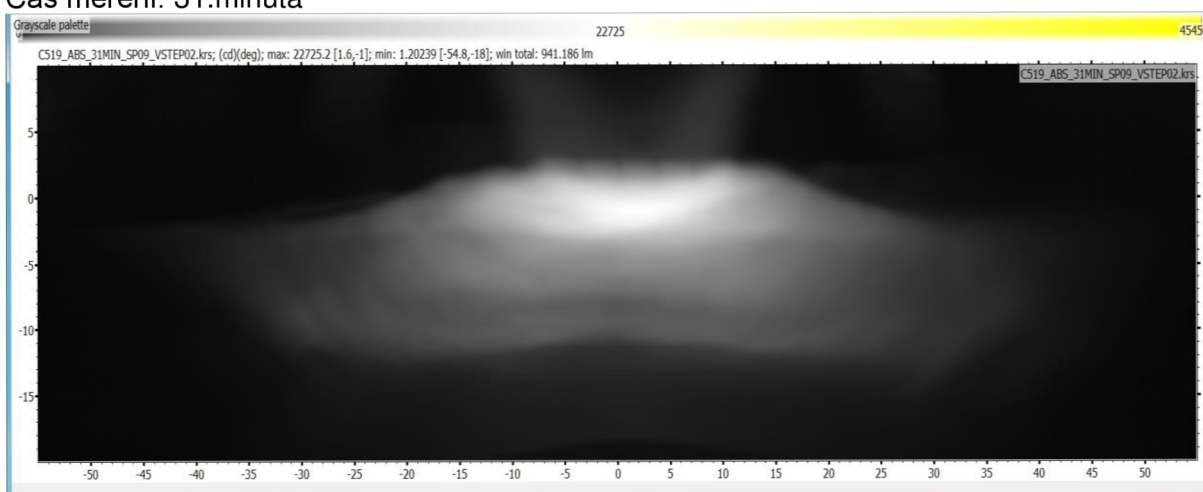
Čas měření: 1.minuta



Čas měření: 31.minuta



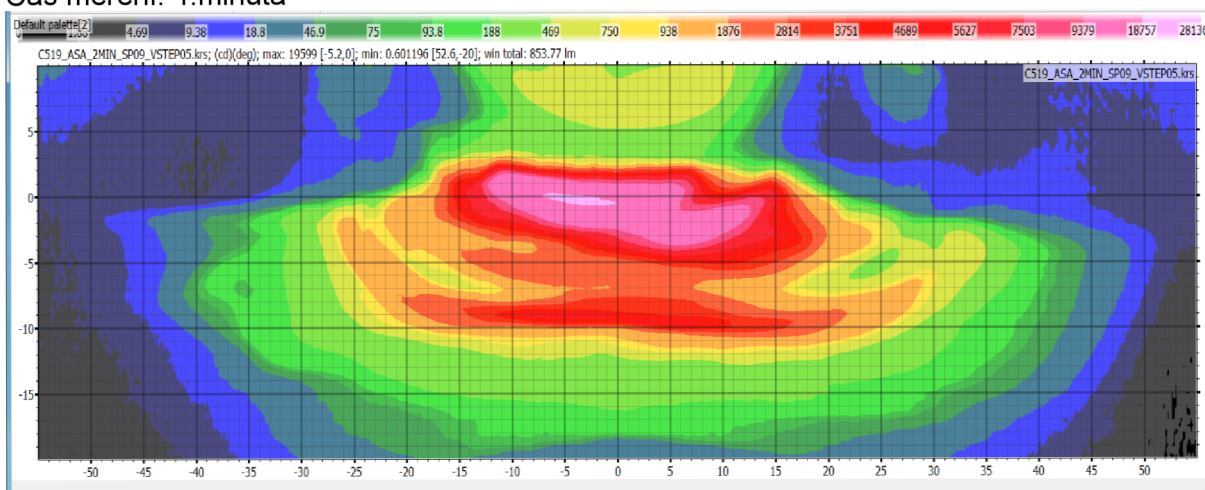
Čas měření: 31.minuta



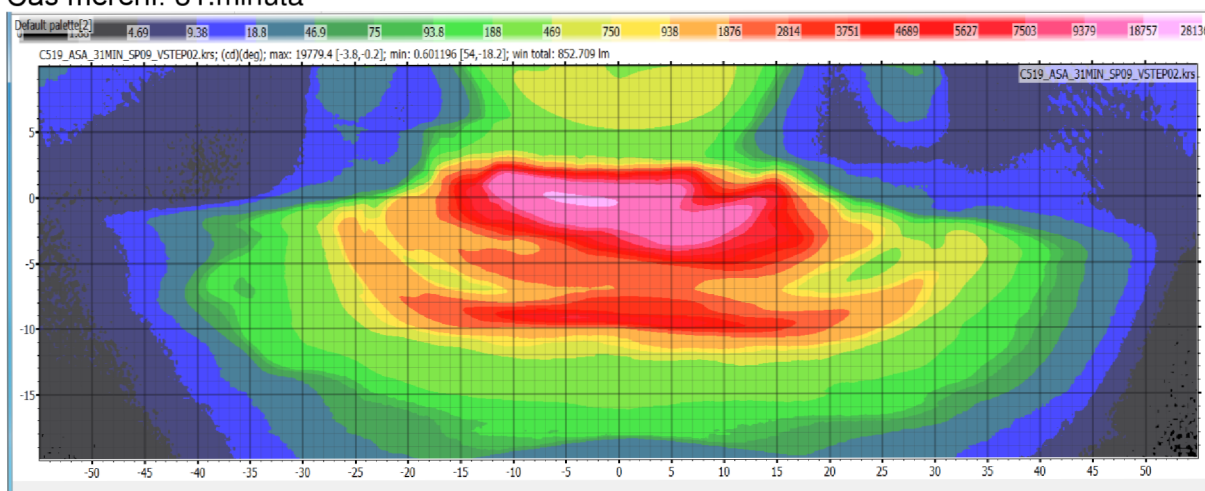


## Vzorek 4

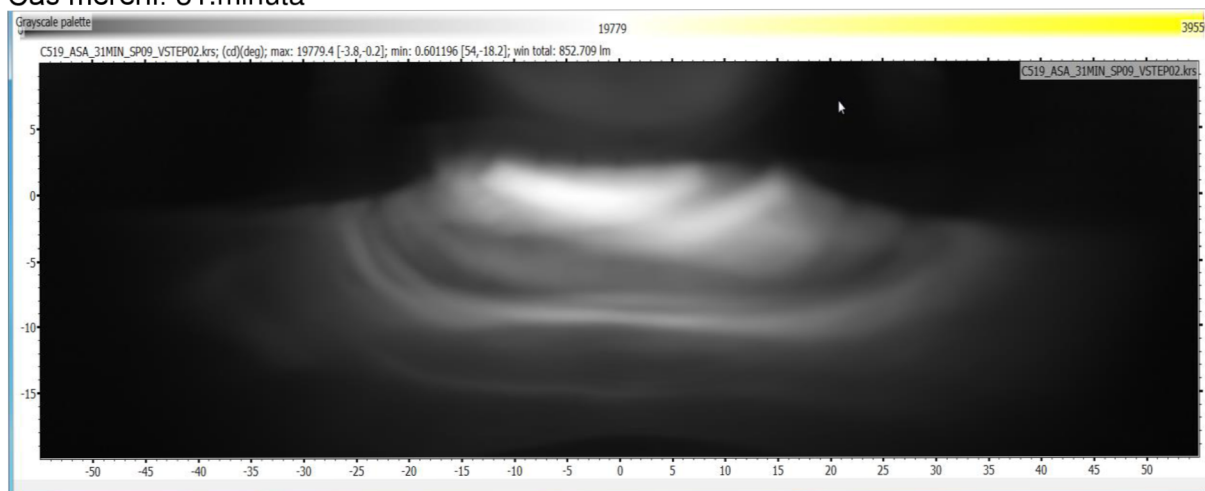
Čas měření: 1.minuta



Čas měření: 31.minuta

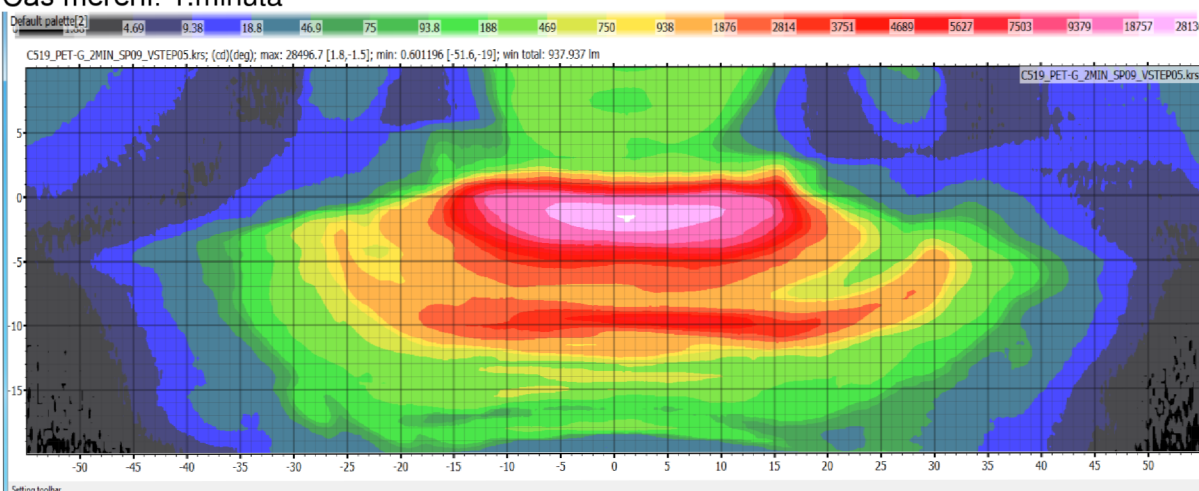


Čas měření: 31.minuta

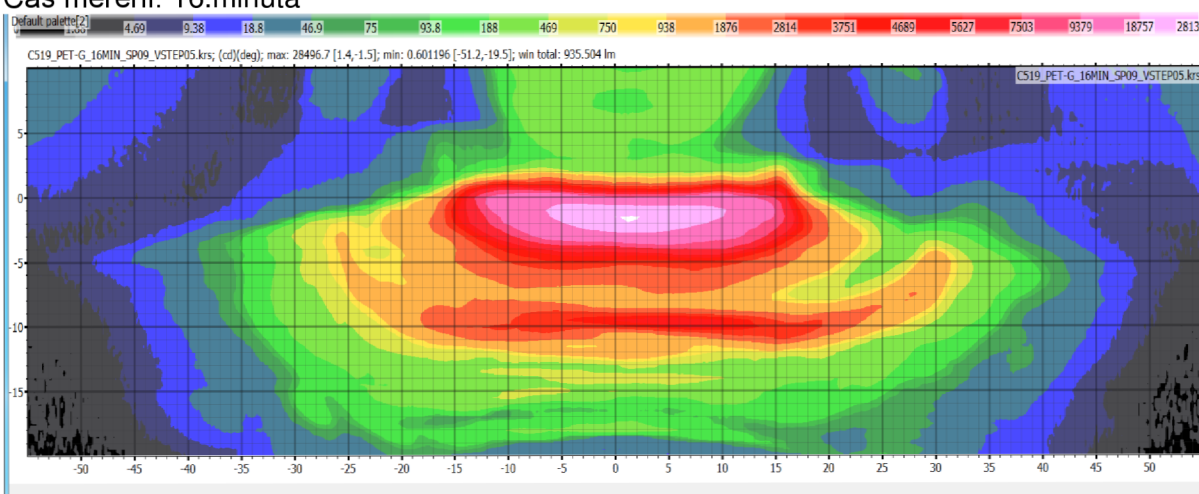


## Vzorek 5

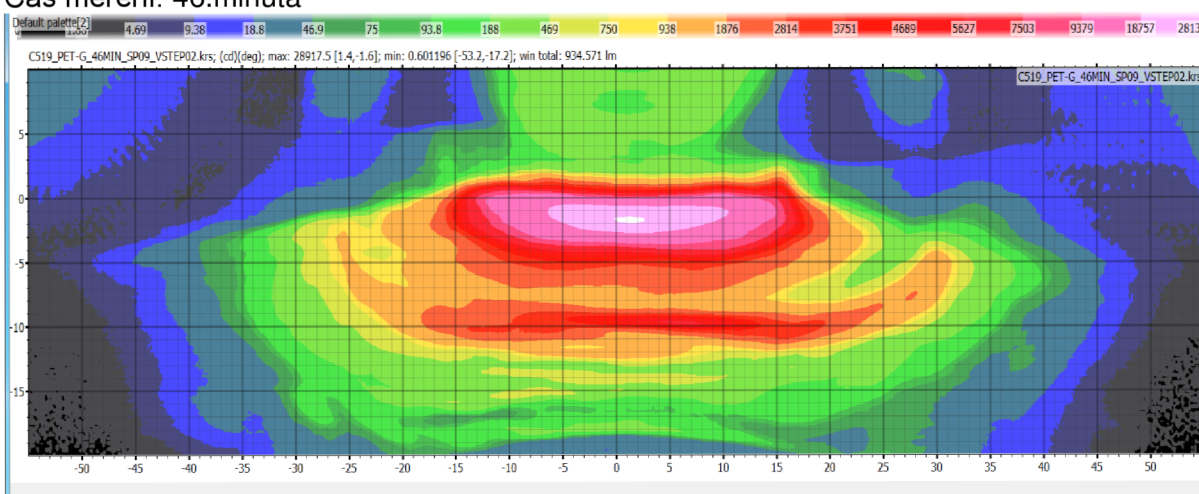
Čas měření: 1.minuta



Čas měření: 16.minuta



Čas měření: 46.minuta



Čas měření: 46.minuta

