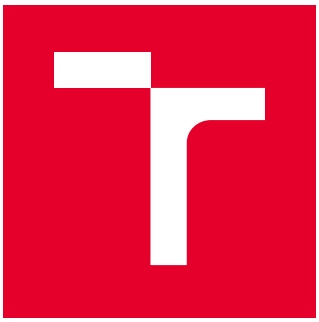


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ 3D TISKU A NÁSLEDNÁ VÝROBA SOUČÁSTI

THE COMPARISON OF 3D PRINTING TECHNOLOGIES AND THE SUBSEQUENT PRODUCTION OF A COMPONENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Zdeněk Čuma

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Zdeněk Čuma**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	**Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.**
Akademický rok:	2017/18

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

Porovnání technologií 3D tisku a následná výroba součásti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou popsány a porovnány dostupné technologie 3D tisku. Praktická část je zaměřena na konstrukci a výrobu reálné součásti pomocí technologií 3D tisku a následné porovnání vlastností vytištěných modelů při použití různých technologií.

Cíle bakalářské práce:

1. Technologie 3D tisku.
2. Konstrukce reálné součásti.
3. Výroba součásti pomocí různých technologií.
4. Porovnání vytištěných 3D modelů.

Seznam doporučené literatury:

JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W. and BOCKING, C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004. pp. 112. ISBN 1860584659.

PÍŠA, Z., KEJDA, P. a GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In: Proceedings of the Abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004. 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 2005. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 07.09.2005-09.09.2005. 30 s. ISBN 80-248-0895-1.

PÍŠKA, M. Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---	---
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

Anotace
Cílem práce je porovnání technologií 3D tisku. V první části je popsána podstata 3D tisku a rozebrány jeho jednotlivé metody. Druhá část je věnována konstrukci reálné součásti – sacího hrdla. Další praktické části jsou zaměřeny na vlastní výrobu součásti pomocí různých 3D technologií a následné porovnání vytištěných modelů.

Abstract
The objective of the thesis is a comparison of 3D printing technologies. The essence of 3D printing is described and its individual methods are analyzed in the first part. The second part is focused on the construction of a real component – a suction branch. Other practical parts focus on the production of the component itself using various 3D technologies and subsequent comparison of the printed models.

Klíčová slova
3D tisk, Aditivní technologie, Rapid Prototyping, Autodesk Inventor

Keywords
3D print, Additive manufacturing, Rapid Prototyping, Autodesk Inventor

ČUMA, Zdeněk. *Porovnání technologií 3D tisku a následná výroba součásti.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Porovnání technologií 3D tisku a následná výroba součásti* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Aleše Jaroše, Ph.D., s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

Zdeněk Čuma

Děkuji svému vedoucímu panu Ing. Aleši Jarošovi, Ph.D. za odborné vedení při zpracování bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD ……. 9

1 TECHNOLOGIE 3D TISKU …… 10
1.1 Podstata 3D tisku …… 10
1.2 Historie 3D tisku …… 11
1.3 Využití 3D tisku ……. 13
1.4 Vytvoření 3D modelu ……. 14
1.5 Přehled jednotlivých metod 3D tisku ……. 15
1.5.1 Technologie na bázi tuhých materiálů …….. 15
1.5.2 Technologie na bázi fotopolymerů …… 18
1.5.3 Technologie na bázi spékání prášku ……. 21

2 KONSTRUKCE REÁLNÉ SOUČÁSTI …….. 23
2.1 Motocykl ČZ 125 C …… 23
2.1.1 Palivový systém motocyklu ……... 24
2.2 Konstrukce sacího hrdla ……. 25
2.2.1 Konstrukce dosedací části ……. 27
2.2.2 Konstrukce těla ……. 28
2.2.3 Konstrukce připojovací části a zaoblení hran …… 29
2.2.4 Konstrukce otvoru pro průchod palivové směsi …… 30
2.3 Kontrola pomocí 3D Skeneru …… 31
2.3.1 Princip funkce 3D Skeneru …… 31
2.3.2 3D sken vyráběné součásti …… 31
2.3.3 Porovnání zkonstruovaného modelu a 3D skenu …….. 32

3 VÝROBA SOUČÁSTI POMOCÍ RŮZNÝCH TECHNOLOGIÍ ……. 33
3.1 Fused Deposition Modeling – FDM …… 33
3.2 Stereolitografie – SLA …… 35
3.3 PolyJet Matrix – PJM ……. 37
3.4 Selective Laser Melting – SLM …….. 40

4 POROVNÁNÍ VYTISKNUTÝCH 3D MODELŮ 41
4.1 Měření rozměrové přesnosti 41
4.1.1 Měření vnějšího průměru připojovací části 41
4.1.2 Měření vnitřního průměru připojovací části 42
4.1.3 Měření průměru otvoru pro šroub..... 44
4.1.4 Měření rozteče otvorů pro šrouby..... 45
4.2 Měření drsnosti..... 47
4.3 Měření hmotnosti..... 48
4.4 Srovnání času tisku..... 49
4.5 Srovnání ceny..... 49
4.6. Zkouška vytištěného modelu na motocyklu..... 49

ZÁVĚR 52

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 53

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 55

SEZNAM OBRÁZKŮ 57

SEZNAM TABULEK..... 58

ÚVOD

Dnešní moderní doba s sebou přináší nové pokrokové technologie. Mezi tyto technologie beze sporu patří i 3D tisk, který se postupně stává technologií pro rychlou a přesnou výrobu prototypových nebo plně funkčních výrobků pro různou širokou oblast použití. A právě 3D tisku je věnována tato práce.

V první části práce je popsána podstata 3D tisku a rozebrány jeho jednotlivé metody.

Druhá část je věnována konstrukci reálné součásti. Zvolena byla součást „sací hrdlo“, která je součástí motoru motocyklu ČZ 125 C z roku 1952. Cílem práce je navrhnout tuto součást a následně pomocí technologií 3D tisku vyrobit její funkční repliku, která by mohla být použita k výrobě skořepinové formy a následnému odlití nové součásti pomocí technologie přesného lití.

Další praktické části jsou zaměřeny na vlastní výrobu součásti pomocí různých 3D technologií a následné porovnání vytištěných modelů. Měřena byla rozměrová přesnost vnějšího a vnitřního průměru připojovací části, průměru otvoru pro šroub a rozteče otvorů pro šrouby. Byla měřena drsnost povrchu jednotlivých modelů a orientačně byla porovnána i jejich hmotnost. Dále pak byl srovnáván čas tisku a v neposlední řadě i cena výtisků.

Porovnávány byly čtyři výtisky. Výtisk vyrobený metodou Fused Deposition Modeling, metodou Stereolitografie, metodou PolyJet Matrix a metodou Selective Laser Melting.

1 TECHNOLOGIE 3D TISKU

K novodobým trendům výroby prototypových dílů, malých sérií a tvarově složitých součástí patří zejména technologie 3D tisku. Tyto technologie nazýváme také jako aditivní nebo rapid prototyping. Využívají na příklad spékání prášků různého chemického složení, zrnitosti, fyzikálních, chemických i jiných užitných vlastností. Jedná se o technologický proces, při kterém je navrhování nového výrobku rychlejší a jednodušší, než je možné běžnými výrobními technologiemi [1,2,24].

Zařízení na výrobu 3D modelů nazýváme 3D tiskárny. Pracují na principu rozložení počítačového modelu do tenkých vrstev a jejich následném spojení. Fyzický model vzniká v pracovním prostoru 3D tiskárny. Rozdílem oproti běžným obráběcím technologiím je skutečnost, že se materiál neubírá, ale naopak po vrstvách přidává [1,3].

1.1 Podstata 3D tisku

S rozvojem 3D tisku přímo souvisí vznik nových technologií. Mezi tyto technologie patří rapid prototyping, který se zabývá stavbou prototypových součástí nebo celých sestav. Výchozími daty pro rapid prototyping je prostorový virtuální model z některého systému CAD. Cílem rapid prototypingu je navržení nového výrobku rychleji v porovnání s běžnými výrobními technologiemi. Čas potřebný pro výrobu modelu je značně kratší. Díky tomu se snižují i výrobní náklady. Pomocí této technologie lze vyrobit jakkoliv složitý tvar funkčního, vlastnostmi vyhovujícího dílu [1].

3D tisk je proces, při kterém se z digitálního 3D modelu vytváří fyzický výrobek. Jedná se o proces aditivní, při kterém se materiál na rozdíl od klasických obráběcích metod neodebírá, ale přidává až do podoby finálního výrobku [4].

Technologie 3D tisku se postupně stává technologií pro rychlou a přesnou výrobu prototypových nebo plně funkčních výrobků pro různou širokou oblast použití [1].

Výhodou 3D tisku oproti běžnému obrábění je především velice nízký podíl odpadu. Odpad u součástí vyrobených pomocí aditivního obrábění tvoří jen pomocné podpory. Další výhodou je, že pokud chceme vytvořit model, stačí nám jen jeden stroj (3D tiskárna), který může být umístěn přímo v kanceláři v blízkosti konstruktéra.

Oproti slévárenství je u 3D tisku výhodou, že pokud si chceme finální výrobek nejdříve vyzkoušet, popř. osahat, zda splňuje naše očekávání, můžeme si vyrobit model, který z finančního hlediska vyjde mnohokrát levněji než slévárenská forma či její úprava.

Mezi další výhody 3D tisku také patří schopnost vyrobit tak tvarově složité díly, které by se jen velice těžko vyráběly pomocí běžných technologií a nebo by vůbec vyrobit nešly (viz. obrázek 1.1).

Obr. 1.1 Model tělesa s mezi plášťovým chlazením vyrobený pomocí 3D tisku od firmy 3D Systems.

1.2 Historie 3D tisku

V roce 1986 si Charles Hull nechal patentovat technologii zvanou stereolitrografie, čímž položil základy aditivních technologií (viz. obrázek 1.2). Steteolitografie je založena na trojrozměrném laserovém tisku, který využívá UV laser a tekutý fotopolymer. Počátky 3D tisku tedy spadají již do 80. let 20. století. Na konci 90. let firma 3D Systems pod vedením Charlese Hulla vyvinula první zařízení tisknoucí ve 3D formátu, které bylo dostupné pro širokou veřejnost. Jednalo se o tzv. stereolitografický aparát SLA-1 [5,6].

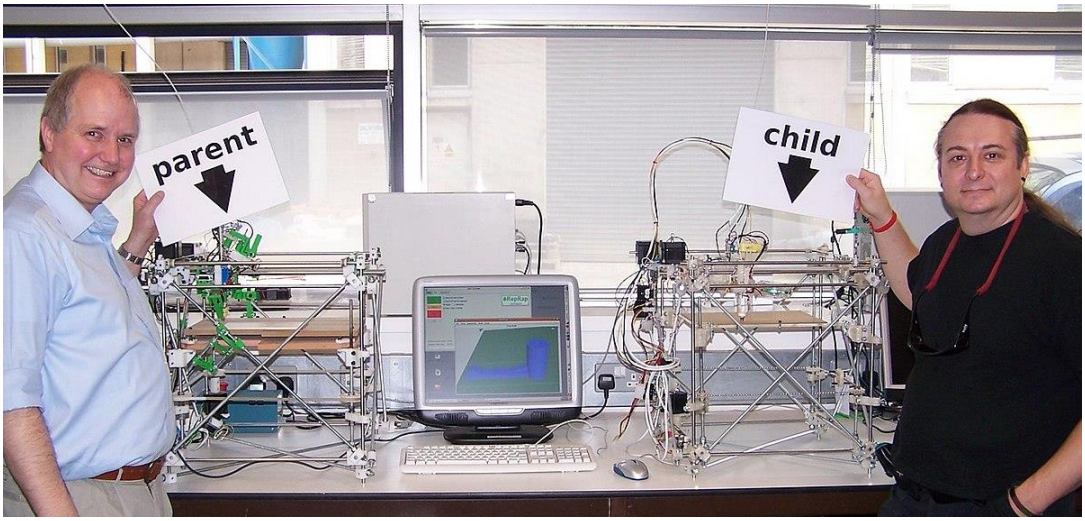
Obr 1.2 První 3D výtisk, který vytvořil Charles Hull v roce 1984 pomocí Stereolitografie [6].

První komerčně dostupnou 3D tiskárnu začala firma 3D Systems prodávat v roce 1992. Tato tiskárna využívala technologii Stereolitografie – SLA [7].

V 90. letech a na začátku roku 2000 bylo zaváděno mnoho nových technologií, které se stále zaměřovaly výhradně na průmyslové aplikace. Během této doby pořád převažovala především výroba prototypů, nicméně výzkum a vývoj se začal ubírat také směrem k novým specifickým technologiím, mezi které patřily přímé výrobní aplikace [8].

Prudký vývoj těchto zařízení začal v roce 2003, kdy vypršelo několik patentů z minulosti. Technologie 3D tisku se začala uplatňovat v mnohých průmyslových odvětvích. Postupně začaly klesat ceny 3D tiskáren a tak se tyto technologie staly dostupnějšími [5].

Jedním z nejdůležitějších okamžiků novodobé historie 3D tisku byl rok 2005. V tomto roce byl na University of Bath doktorem Adrianem Bowyerem založen projekt RepRap (Replication Rapid Prototyper). Cílem tohoto projektu bylo navrhnout 3D tiskárnu, která zvládne vyrobit co nejvíce vlastních součástek (viz. obrázek 1.3). Tento projekt byl od začátku otevřený pro veřejnost, což umožnilo zapojit se do spolupráce lidem po celém světě. Na základě projektu RepRap se staly tyto tiskárny nejrozšířenějším typem 3D tiskáren na celém světě. Díky tomuto projektu vznikla většina tiskáren v hobby a polo profi segmentu (do 100 tisíc Kč za tiskárnu) [7,24].



Obr. 1.3 Dr. Adrian Bowyer a Vik Oliver s první replikovanou tiskárnou [7,9].

Začátkem roku 2009 se na trhu objevila první 3D tiskárna určená pro veřejnost, která byla ve formě kitu na základě konceptu RepRap. V průběhu téhož roku se objevilo velké množství podobných tiskáren a nadále se tak děje [8,9].

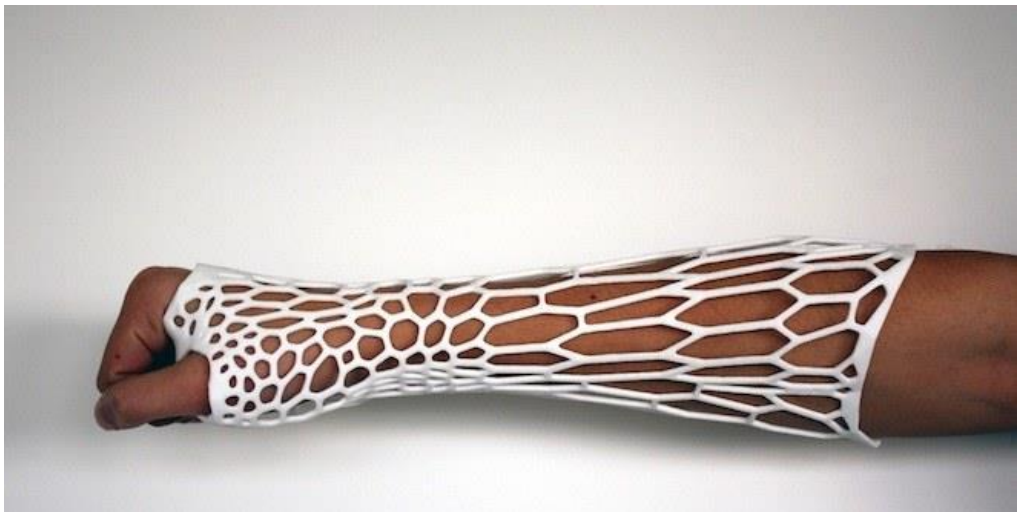
1.3 Využití 3D tisku

3D tisk původně sloužil k výrobě rychlých a levných prototypů. Později s příchodem modernějších a finančně dostupnějších technologií začal být 3D tisk využíván také v dalších oblastech výroby. Jednou z nich je například malosériová výroba. V případě, že je vyráběna menší série výrobků jsou náklady při výrobě běžnými technologiemi na přípravu výroby značně vyšší, 3D tisk tyto náklady podstatně redukuje [7].

Dalším využitím 3D tisku je možná fyzická prezentace výrobku zákazníkovi ještě před tím, než jde výrobek do výroby. Na základě přání zákazníka může být výrobek operativně upraven dle jeho požadavků [7].

Mezi využití 3D tisku patří také personalizovaná výroba, při které je každý jednotlivý kus vyráběn přesně na přání zákazníka. Do této kategorie můžou patřit na příklad výrobky, kde jsou zakomponovány iniciály nebo jméno dané osoby [7].

Specifickým prvkem pro zákazníka můžou být také zdravotnické prvky, které mohou zahrnovat na příklad umělé klouby, zuby, části kostí nebo protézy.



Obr. 1.4 Ortéza vyrobená přesně na míru za použití aditivních technologií [11].

Použitím aditivních technologií lze také vyrábět nedostupné náhradní díly, které jsou potřebné při opravě starožitností nebo na příklad veteránů, u kterých nejsou náhradní díly dostupné již desítky let. U těchto dílů je velice často potřeba jen jeden kus. Podobně tomu může být také u domácích spotřebičů [7].

V dnešní době se 3D tisk používá také k výrobě malých sérií, většinou čítajících jednotky, či desítky až případně stovky kusů. Jedním z těchto příkladů je letecký průmysl, kde se většinou roční série letadel pohybují v řádu jednotek (viz. obrázek 1.5). Z toho důvodu se vyplatí určité komponenty vytisknout, nežli odlévat. Navíc pomocí 3D tisku lze dosáhnout dokonce příznivějších vlastností než při odlévání.

Obr. 1.5 Konzoly křídel vyrobené pomocí technologie 3D tisku u letadel Airbus [10].

Kromě těchto základních kategorií je 3D tisk používán v konkrétních odvětvích velice specificky a je schopen zrychlit proces vývoje a výroby [7].

1.4 Vytvoření 3D modelu

Základním zdrojem dat pro 3D tisk je počítačový model výrobku zhotovený v některém systému CAD, ve kterém můžeme celý výrobek zkonstruovat [1,24].

V případě, že se jedná o již existující model, je možno využít technologií 3D skenování. Výsledkem 3D skenování je soubor bodů, který je nadále převeden na síť polygonů a poté vyhlazen. Tento soubor je možné dále zpracovávat a upravovat dalším programem [1].

Dalším krokem přípravy virtuálního modelu je převedení souboru do správného formátu. 3D tiskárny ve většině případů využívají data ve formátu STL. Tento formát definuje prostorové body a jejich propojením vytváří síťový objekt. Soubor se označuje jako plášťový model [24].

Digitální soubory ve formátu STL se nadále posílají do programů, které využívají 3D tiskárny k závěrečné přípravě modelu pro samotný tisk. V těchto programech dojde k nastavení polohy součásti, rozdělení součásti do jednotlivých tiskových vrstev a přidání nutných podpor. Výstupem těchto programů jsou již data pro samotnou tiskárnu, ale také informace o množství použitého materiálu, nákladech nebo času tisku.

1.5 Přehled jednotlivých metod 3D tisku

Většina výrobků je vyráběna pomocí specializovaných zařízení (3D tiskáren). Výroba probíhá na příklad nanášením jednotlivých vrstev nataveného materiálu (plast, vosk) nebo případně spojováním speciálních fólií. Mezi další metody patří také vytvrzování materiálu, který je v kapalném stavu, pomocí UV laserů. Dále pak mezi metody 3D tisku patří také spékání prášků různých materiálů (kov, plast). Všechny tyto způsoby výroby (viz. tabulka 1.1) mají společnou vlastnost, kterou je postupné nanášení jednotlivých vrstev materiálu [1].

Tab. 1.1 Přehled technologií 3D tisku [1,2,3].

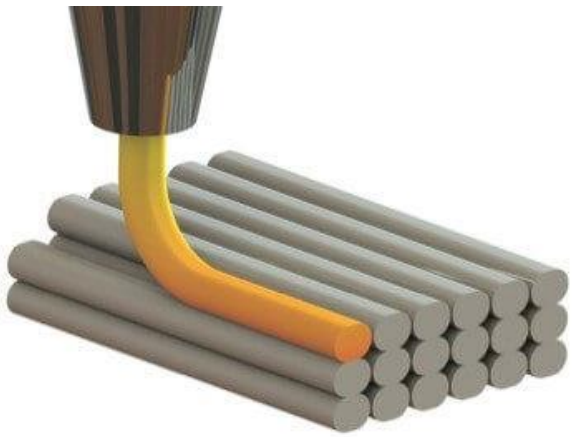
Technologie 3D tisku	Zkratka	Materiál
Fused Deposition Modeling	FDM	ABS, vosk, polykarbonát
Laminated Object Manufacturing	LOM	Papír s jednostranným pojivem
Stereolitografie	SLA, SL	Fotopolymer
PolyJet Matrix	PJM	Termopolymer, akrylátový fotopolymer
Selective Laser Sintering	SLS	Polyamid, nylon, vosk, kovové prášky
Direct Metal Laser Sintering	DMLS	Kovové prášky

1.5.1 Technologie na bázi tuhých materiálů

Do skupiny, která spočívá na bázi tuhých materiálů se řadí technologie, které používají vstupní materiál ve formě cívky s navinutým drátem nebo speciální fólie. Do této kategorie patří technologie Fused Deposition Modeling (FDM) a Laminated Object Manufacturing (LOM).

Fused Deposition Modeling - FDM

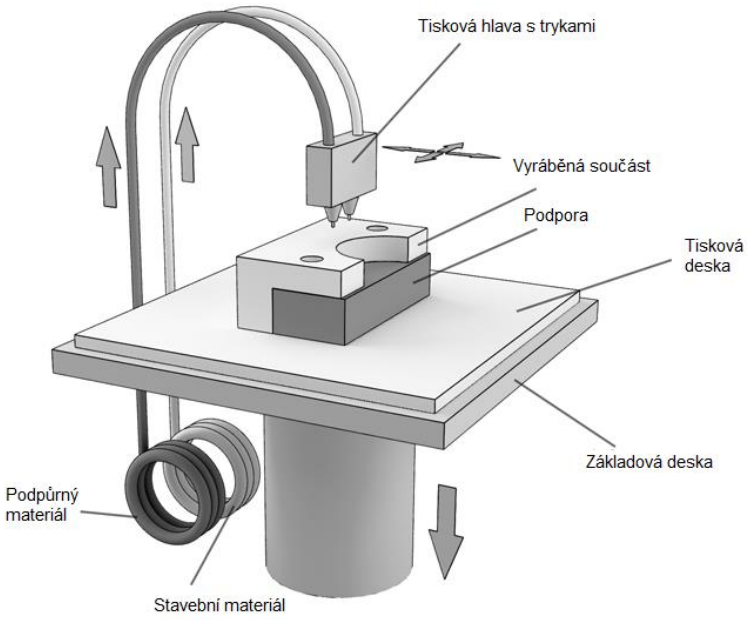
Metoda FDM je v současné době nejrozšířenějším typem 3D tisku. Princip je založen na tavení vlákna plastu nebo kovu uvnitř extruzní hlavy, která taveninu vytlačuje na podložku. Hlava se pohybuje ve dvou osách a nanáší tenkou vrstvu materiálu ve tvaru průřezu tištěného výrobku. Po nanesení celé vrstvy se podložka sníží a je nanášena další vrstva (viz. obrázek 1.6) [12].



Obr. 1.6 Nanášení jednotlivých vrstev materiálu pomocí technologie FDM [13].

Zařízení zpracovává dva druhy materiálu, který je do tiskárny vkládán ve formě drátu navinutého na cívkách. Každé zařízení má dvě cívky materiálu. Na jedné cívce je navinut materiál stavební, na druhé materiál podpůrný. Stavební materiál a podpůrný materiál je vytlačován střídavě, na vzduchu chladne a tuhne (viz. obrázek 1.7) [1,24].

Poté co je tisk dokončen, součást je zbavena podpor. Odstranění podpor probíhá dle použitého typu materiálu mechanicky nebo chemicky ponořením do speciálního roztoku [1].



Obr. 1.7 Princip metody FDM [14].

Tato metoda je využívána k výrobě prototypových součástí pro testování jejich funkčnosti a designu. Součásti mají dostatečnou pevnost a lze je vystavit reálnému zatížení [1].

Základní materiály pro FDM technologii:

PLA – Tisk tímto materiálem je nejsnadnější a model má dobrou kvalitu povrchu. Tento materiál má vysokou pevnost a tvrdost, ale je poměrně křehký.
ABS – Na rozdíl od PLA má tento materiál vyšší houževnatost a tepelnou odolnost. Nevýhodou je, že během tisku vylučuje více nebezpečných látek.
PET – Tento materiál je odolný vůči chemikáliím. Používá se na příklad u potravinářských obalů a dalších specifických využití.
Nylon – Má velmi dobré mechanické vlastnosti, mezi které patří především odolnost vůči nárazům. Negativní vlastností je problematická přilnavost mezi vrstvami.
PC – Vlastnosti tohoto materiálu jsou velmi podobné materiálu ABS. Je to nejsilnější materiál ze všech uvedených.
TPU – Jedná se o velmi flexibilní materiál [15].

Výhody:

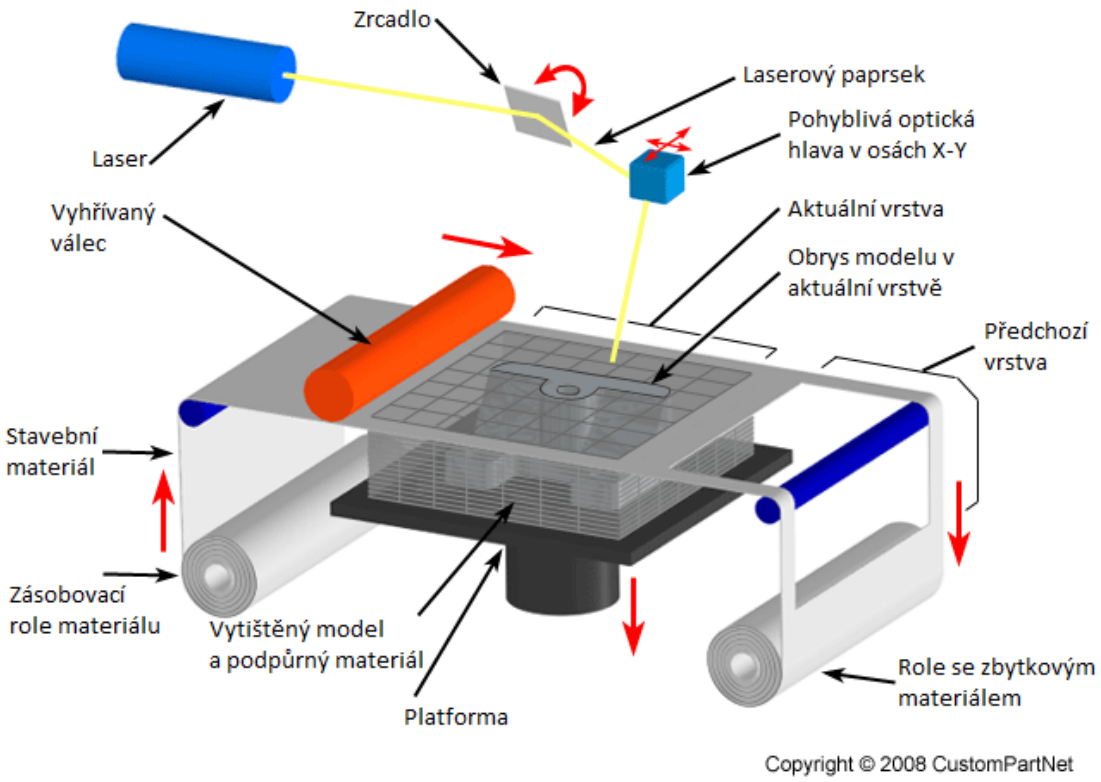
Metodou FDM lze vyrobit funkční prototypy, které mají podobné vlastnosti jako konečné produkty. K tisku je možnost využití různých materiálů. Při výrobě součásti vzniká minimální odpad – pouze materiál podpor. V průběhu výroby součásti je možno kazetu s materiálem vyměnit za novou a pokračovat ve výrobě. Jedná se o metodu, která je finančně dostupná i pro širokou veřejnost [1].

Nevýhody:

Nevýhodou metody FDM je omezená přesnost, která je způsobena použitým materiálem a průměrem výstupní trysky. Negativní vlastností materiálu je smrštění během chladnutí [1].

Laminated Object Manufacturing – LOM

Metoda LOM je založena na principu vrstvení fólií, které jsou k sobě přilepovány přilnavým nátěrem. Jednotlivé vrstvy fólií jsou kladeny na připravenou základnu a přitlačovány k sobě horkým válcem, čímž je aktivováno pojivo na spodní straně fólie. Laserem je následně vyřezáván obrys výrobku. Tento proces se opakuje, dokud není model hotov (viz. obrázek 1.8) [1].



Obr. 1.8 Princip metody LOM [16].

Výhody:

Velký výběr materiálů ve formě fólií. Mezi nejpoužívanější patří papír, dále pak plasty, kovy, keramika a kompozitní materiály. Velkou výhodou je rychlost a přesnost. Materiál se výrazně nesmršťuje. Není nutno použít jakékoliv podpory, tudíž je není třeba odstraňovat [1].

Nevýhody:

Metoda není vhodná pro tenkostěnné modely. Pevnost materiálu je omezena použitým pojivem. Pokud je nutné použití podpor, špatně se odstraňují, čímž může dojít k poškození součásti [1].

1.5.2. Technologie na bázi fotopolymerů

Tento typ 3D tiskáren nepoužívá k tisku výrobku materiál v tuhém stavu, ale kapalnou pryskyřici (polymer). Vytvrzování jednotlivých vrstev probíhá pod hladinou kapaliny pomocí UV laseru. Výrobek je tímto způsobem vytvrzován vrstvu po vrstvě a tím probíhá stavba celého modelu. Tyto metody jsou definovány podle typu laseru, metody skenování, zvedacího mechanismu a optické soustavy. Mezi tyto technologie patří Stereolitografie (SLA) a PolyJet Matrix (PJM) [1].

Stereolitografie – SLA

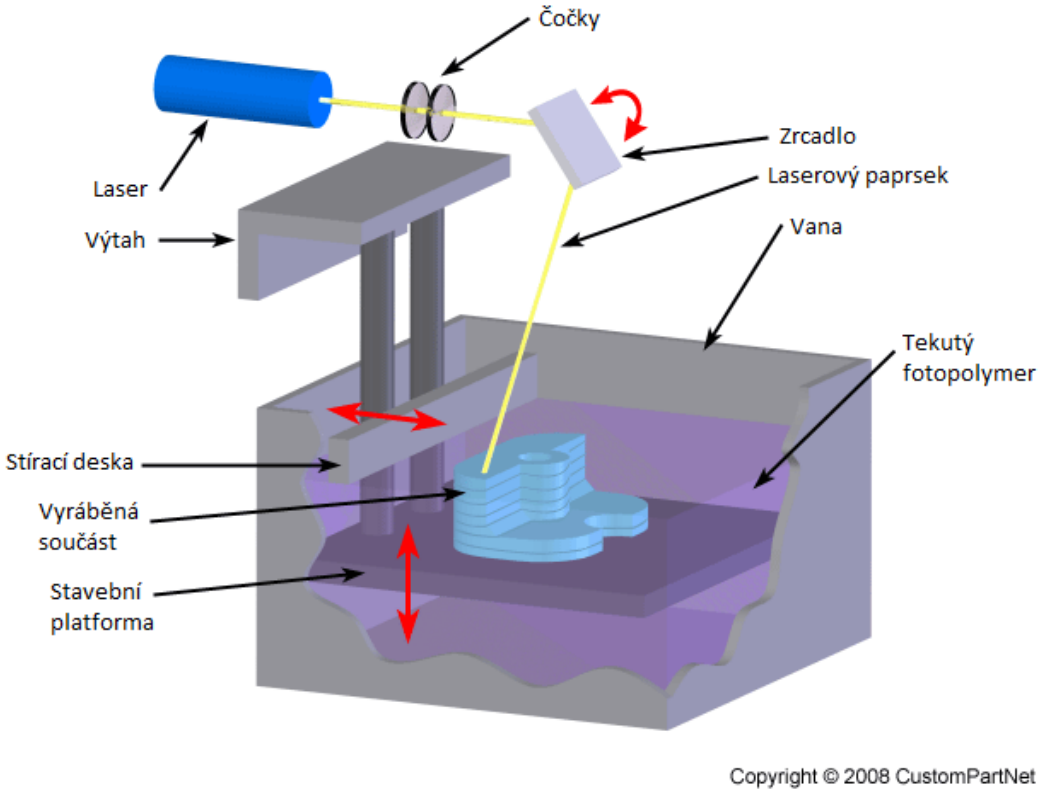
Metoda SLA patří mezi nejstarší metody 3D tisku. V současné době je po metodě FDM nejrozšířenější technologií. Jedná se o jednu z nejpřesnějších metod 3D tisku. Vysoká přesnost a jakost povrchu je zajištěna velice tenkými vrstvami, které jsou postupně nanášeny. Tato vlastnost je výhodná na příklad pro tvorbu forem nebo výrobu esteticky vypadajících modelů. Další výhodou této technologie je možnost výroby rozměrově velkých modelů, které mají dobré fyzikální vlastnosti a lze je dále obrábět. Nevýhodou je nutnost po skončení 3D tisku výrobek chemicky očistit, usušit a poté jej vytvrdit UV zářením. Při této metodě vzniká model působením ultrafialového paprsku na tekutý fotopolymer (pryskyřici), který je tímto způsobem po jednotlivých vrstvách vytvrzován. Po vytvrzení vrstvy se platforma posune o tloušťku nanášené vrstvy. Poté se opět nanese další vrstva pomocí stírací lišty, která je znovu UV laserem vytvrzena. V případě tisku tvarově složitějších modelů je nutná stavba dočasných podpor, které jsou po skončení tisku odstraňovány. Na rozdíl od metod na bázi tuhých materiálů nebo spékání prášku je po skončení tisku a odstranění podpor nutná další operace (viz. obrázek 1.9) [1,25].

Výhody:

Vysoká přesnost a jakost povrchu, výroba rozměrově velkých modelů, široký výběr materiálů, dobré fyzikální vlastnosti výrobku, možnost dalšího obrábění [1,25].

Nevýhody:

Po skončení tisku nutnost chemického čištění povrchu, sušení a vytvrzení součásti [1].

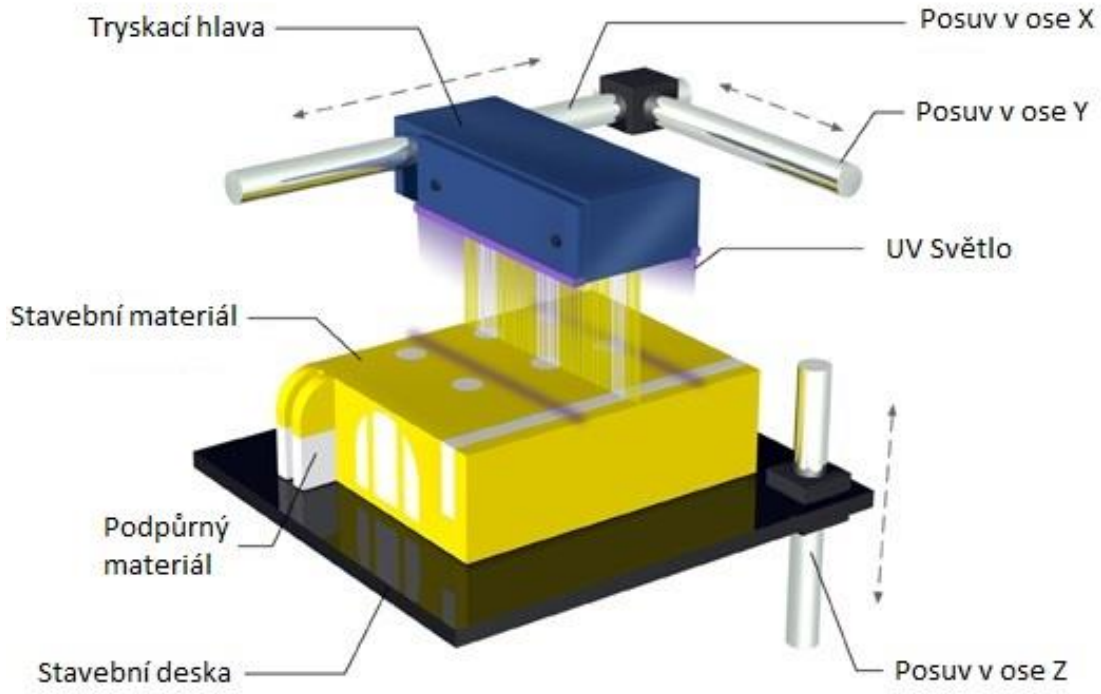


Obr. 1.9 Princip metody SLA [26].

PolyJet Matrix – PJM

Metoda PJM spočívá v tryskání jednotlivých vrstev fotopolymerních materiálů pomocí speciální tiskové hlavy s velkým počtem trysek. Jednotlivé trysky jsou umístěny vedle sebe. Model se vyrábí na základní desce podobně jako u ostatních metod. Tisková hlava se pohybuje v osách X a Y. Po nanesení celé vrstvy se základní deska sníží o její tloušťku v ose Z. Celý proces se tímto způsobem opakuje, dokud není výrobek zcela hotov. Nanášený materiál tuhne při dotyku s předchozí vrstvou (viz. obrázek 1.10) [1].

Tato technologie umožňuje výrobu modelu ze spousty různých materiálů, mezi které patří na příklad materiály podobné pryži, čiré pevné materiály, materiály podobné ABS nebo biomateriály. Velkou výhodou této technologie je tzv. více komponentní tisk, pomocí kterého lze při jednom tisku bez přerušení použít různé materiály zahrnující na příklad různý barevný rozdíl nebo rozdílné vlastnosti [37].



Obr. 1.10 Princip metody PJM [18].

Výhody:

Použití různých druhů materiálů. Jedná se o tzv. více komponentní tisk, pomocí kterého je možné během tisku používat různé materiály, aniž by došlo k zastavení tiskárny [36].

Nevýhody:

Malá přesnost vytištěného modelu a horší povrch. Po skončení tisku jsou nutné další dokončovací operace zahrnující mechanické a chemické odstranění podpor [1].

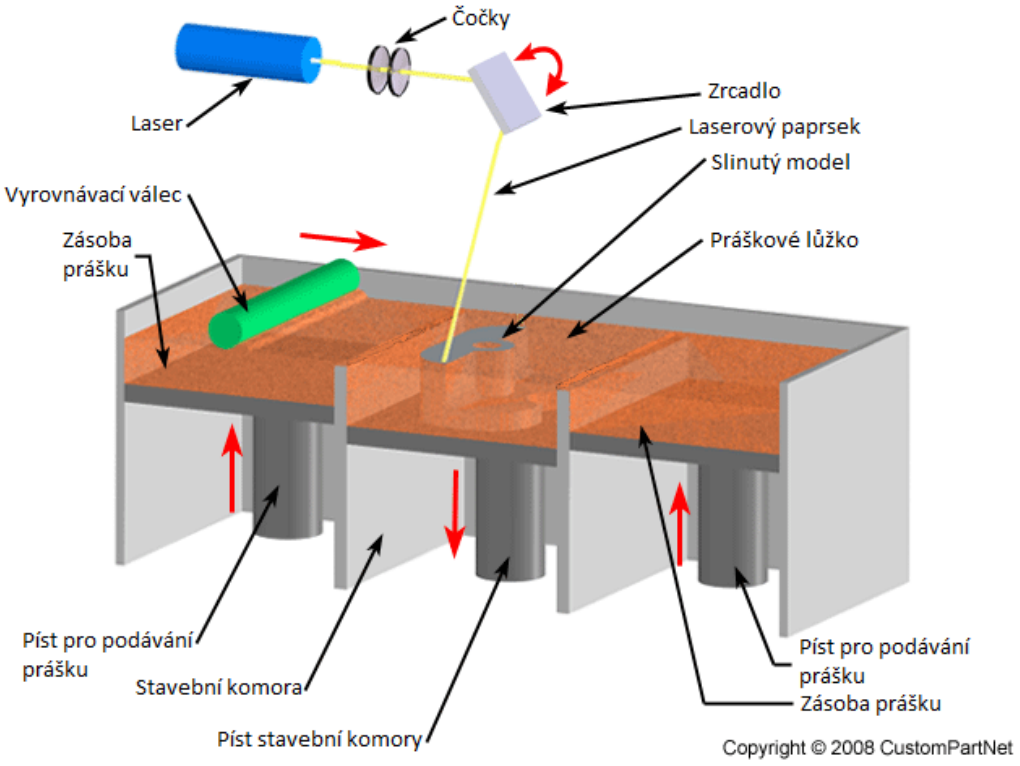
1.5.3. Technologie na bázi spékání prášku

Mezi tyto technologie patří metody, které využívají jako výchozí materiál pro tvorbu modelu jemný prášek. Princip těchto metod je založen na spékání prášku pomocí laserového paprsku [1].

Použitím těchto technologií je v dnešní době možné vyrábět zcela nové výrobky s velice dobrými vlastnostmi. Patří mezi ně na příklad pevné a lehké výtisky z titanu. Slitiny titanu mají při zpracování technologií 3D tisku téměř dokonalou hustotu převyšující 99,7%, která je lepší než u odlévání. Dosahují pevnosti v tahu více než 900 MPa [17].

Selective Laser Sintering – SLS

Metoda SLS je založena na tavení práškového materiálu, který je po tenkých vrstvách spékán pomocí vysoce výkonného laseru. Použitým materiálem může být na příklad plast, kov, keramika nebo sklo. Jednotlivé vrstvy jsou nanášeny vyrovnávacím válcem, předehřáty a poté spečeny laserovým paprskem. K zamezení oxidace je ve stavební komoře používána výplň interním plynem. Poté, co laserový paprsek osvítí celou plochu výrobku, je stavební komora snížena a celý proces se znovu opakuje, dokud není celý výrobek hotový. Výhodou je okolní nenatavený prášek, který po dobu tisku nahrazuje podpůrný materiál a není tak nutné složité odstraňování podpor. Za pomocí této technologie je možné zhotovit výrobky srovnatelných nebo lepších kvalit než konvenčními výrobními metodami. Na rozdíl od konvenčních metod lze také vyrábět velice složité tvary a struktury (viz. obrázek 1.11) [1,34].



Obr. 1.12 Princip technologie SLS [27].

Výhody:

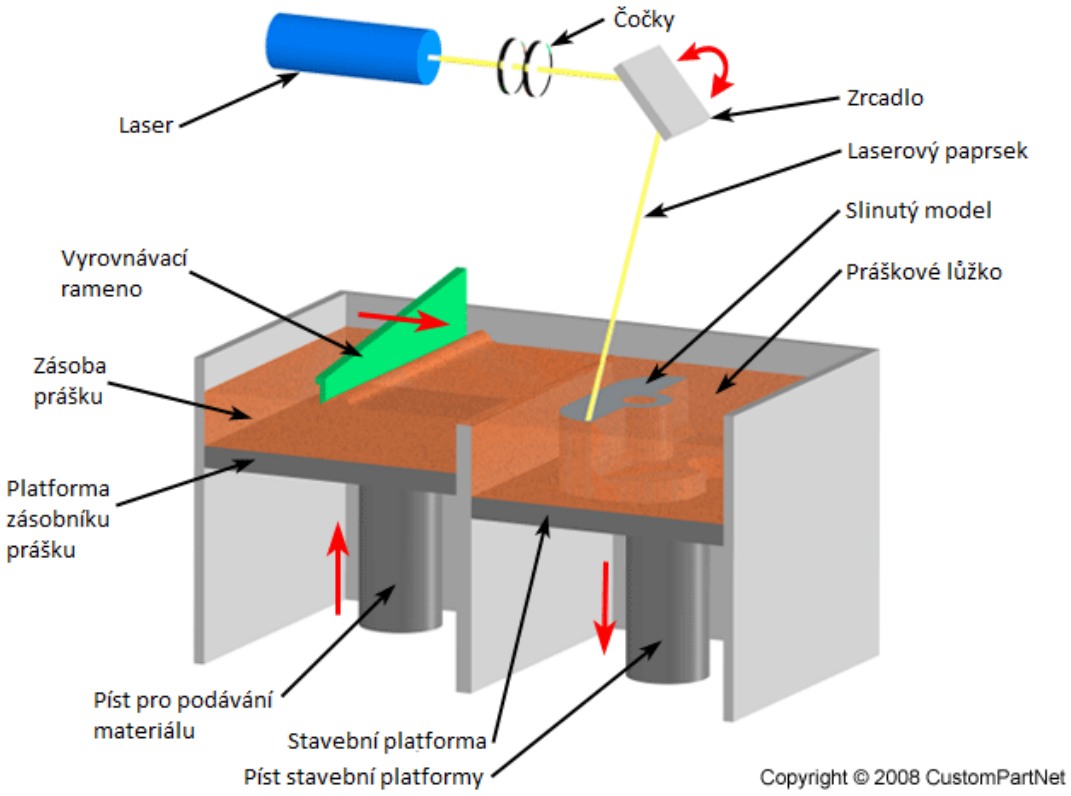
Vysoká pevnost vyrobených modelů, které mohou sloužit jako funkční součásti. Je možné tisknout velice složité tvary, které by byly použitím běžných technologií velmi těžko vyrobitelné, nebo by to vůbec nebylo možné. Vyráběná součást nepotřebuje žádné podpory [1].

Nevýhody:

Zařízení je prostorově, energeticky a finančně náročné. Kvalita povrchu je nižší než u jiných metod [1].

Direct Metal Laser Sintering - DMLS

Princip metody DMLS je téměř stejný jako u metody SLS. Rozdíl těchto dvou metod je především v nanášení vrstev prášku a použitém materiálu. Technologie DMLS používá k nanášení jednotlivých vrstev vyrovnávací rameno (viz. obrázek 1.12). Materiály pro výrobu jsou výhradně kovové (ocel, hliník, titan, nerezová ocel) [1,35].



Obr. 1.12 Princip metody DMLS [28].

2 KONSTRUKCE REÁLNÉ SOUČÁSTI

Pro porovnání dostupných technologií 3D tisku byla zvolena součást „sací hrdlo“, která je součástí motoru motocyklu ČZ 125 C z roku 1952. Tuto součást bylo třeba znovu zkonstruovat, protože k ní již není dostupná přesná výkresová dokumentace. Původní součást na motocyklu byla zničená a již předchozím majitelem motocyklu nahrazena neoriginální ne zcela vhodnou součástí.

Cílem práce je navrhnout tuto součást a následně pomocí technologií 3D tisku vyrobit její funkční repliku, která by mohla být použita k výrobě licí formy pro výrobu nové součásti.

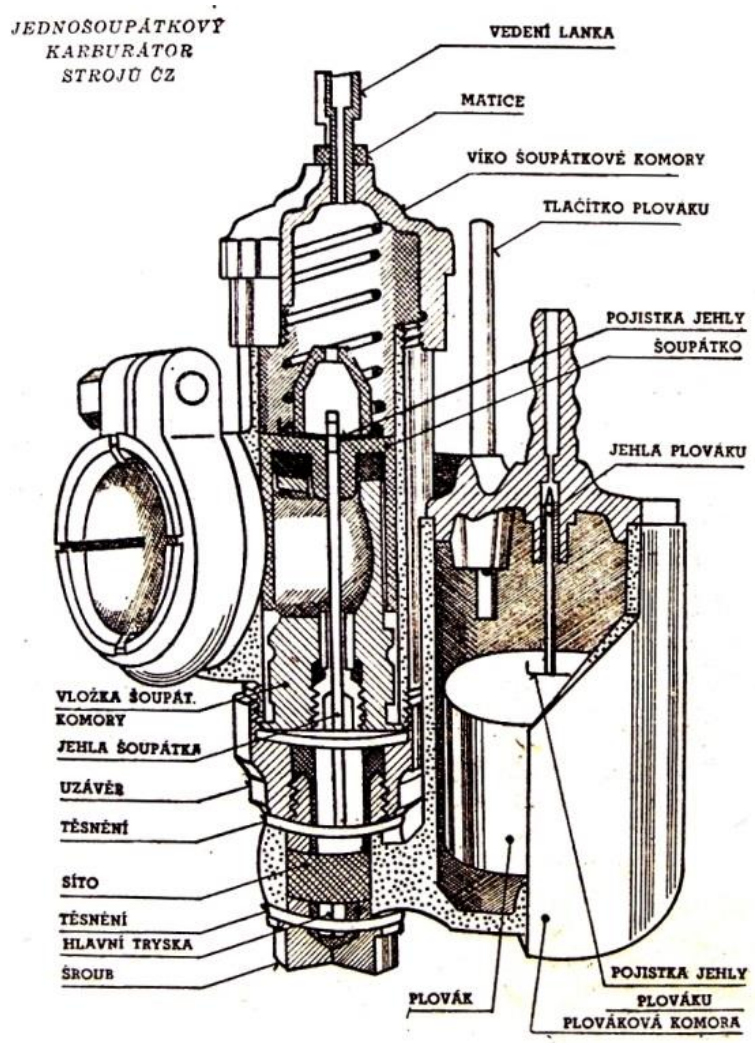
2.1 Motocykl ČZ 125 C

ČZ 125 C je motocykl vyráběný Českou Zbrojovkou ve Strakonicích v letech 1950 – 1953 (viz. obrázek 2.1). Jedná se o dvoudobý vzduchem chlazený jednoválec s obsahem 125 ccm. Jde o konstrukčně vylepšeného následovníka typu ČZ 125 B a T. Předchozí modely byly osazeny karburátorem nasazeným přímo na litém náustku válce motoru. V novém provedení u typu C došlo k zapracování karburátoru do bloku motoru a jeho překrytí. Motor tak dostal elegantní tvar, kterým není esteticky narušován. S novým řešením vstupuje mezi karburátor a motor nová součást „sací hrdlo“, jejíž zpětná konstrukce je obsahem mojí bakalářské práce [22,23].

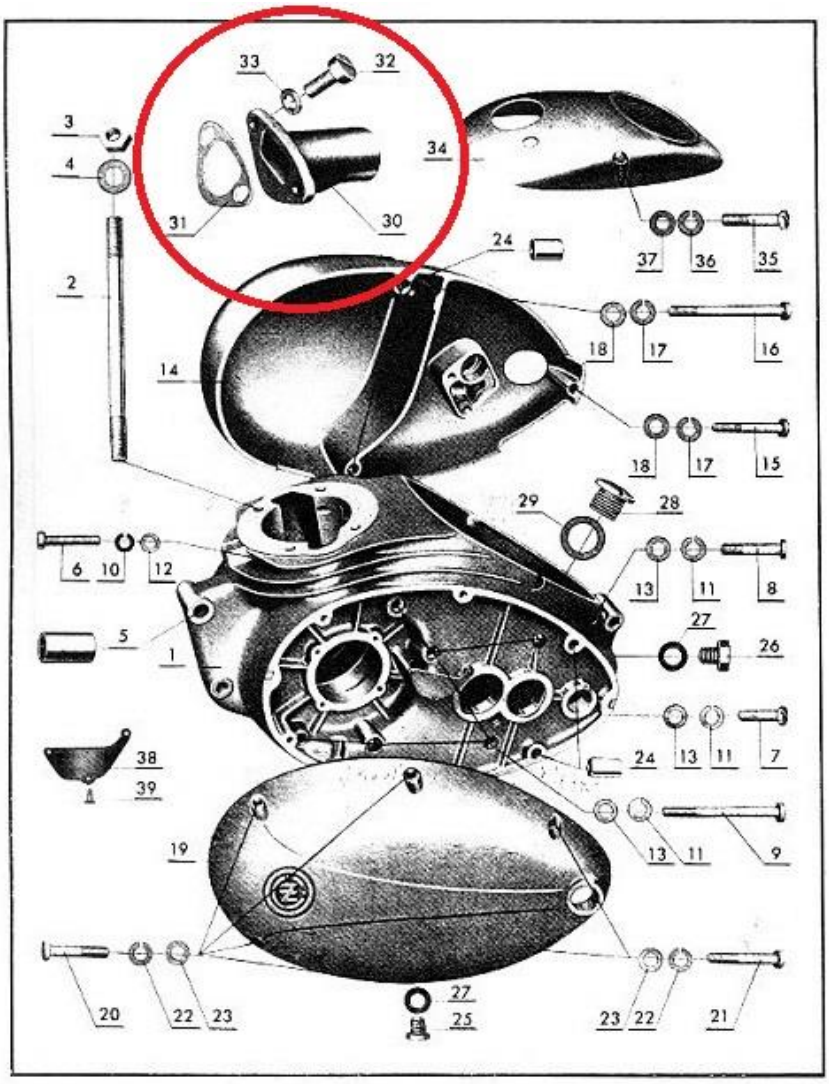
Obr. 2.1 Motocykl ČZ 125 C, rok výroby 1952.

2.1.1 Palivový systém motocyklu

Hlavní částí palivového systému je karburátor, ve kterém je připravována výbušná směs. Směs benzínu a oleje přichází z nádrže motocyklu přes uzavíratelný ventil opatřený sítem, které zachytí nečistoty. Dále pak hadičkou do plovákové komory. Odtud jde do hlavní trysky přes další síto na šroubu, přichycujícím plovákovou komoru ke komoře šoupátkové. Hlavní tryskou vystupuje palivo pouzdrem trysky až do výše hladiny plovákové komory. Proud nasávaného vzduchu strhne z pouzdra trysky určité množství paliva, rozpráší je a promísí se vzduchem. Tím je směs pro motor připravena a dále proudí do sacího hrdla, které spojuje karburátorem s motorem (viz. obrázek 2.2), (viz. obrázek 2.3) [20].



Obr. 2.2 Schématické znázornění jednošoupátkového karburátoru [20].



Obr. 2.3 Zobrazení jednotlivých dílů motoru [19].

2.2 Konstrukce sacího hrdla

Při konstrukci sacího hrdla bylo nutno přesně splnit několik rozměrových požadavků tak, aby byla zajištěna funkčnost součásti. Mezi tyto požadavky patří především konstrukce styčné plochy, která musí přesně dosednout na motor tak, aby správně odpovídaly otvory na šrouby a vnitřní dutina (viz. obrázek 2.4), (viz. obrázek 2.5). Dalším požadavkem je přesný tvar součásti, který zajistí správnou polohu karburátoru vůči motoru a zakrytování. Posledním, tentokrát již méně podstatným požadavkem byla také vizuální podoba původní originální součásti.

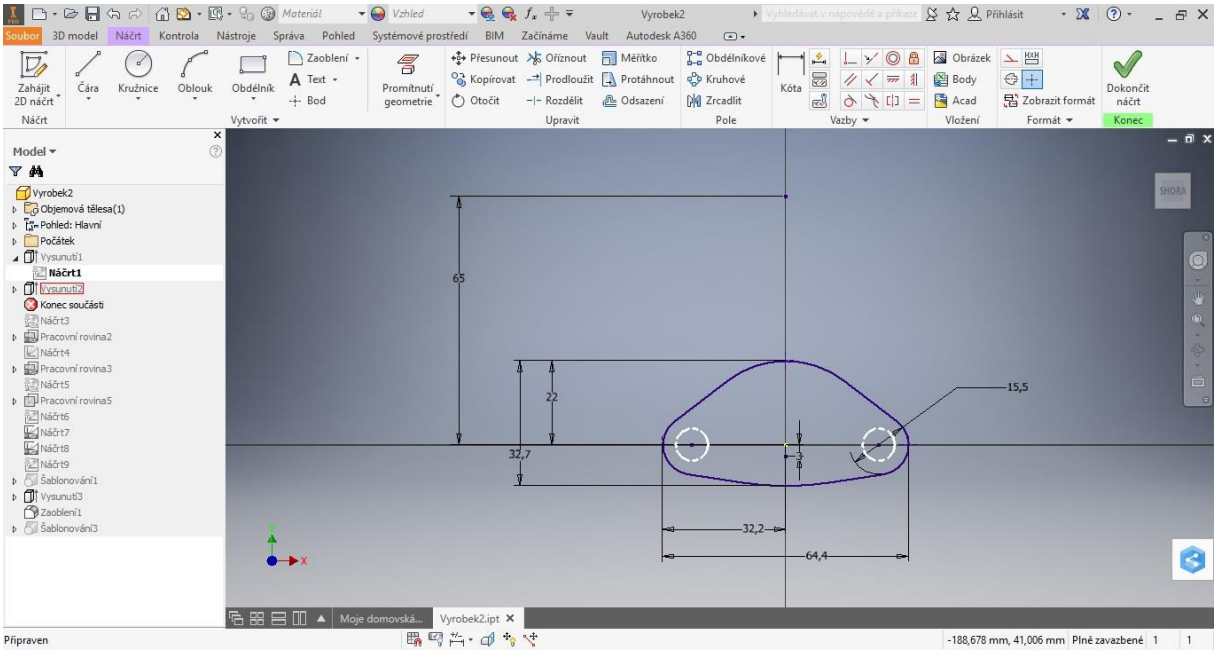
Ke konstrukci součásti byl použit program Autodesk Inventor 2017. K ověření požadovaných vlastností byl použit vlastní motocykl ČZ 125 C.

Obr. 2.4 Pohled na motor ČZ 125 C bez víka a karburátoru.

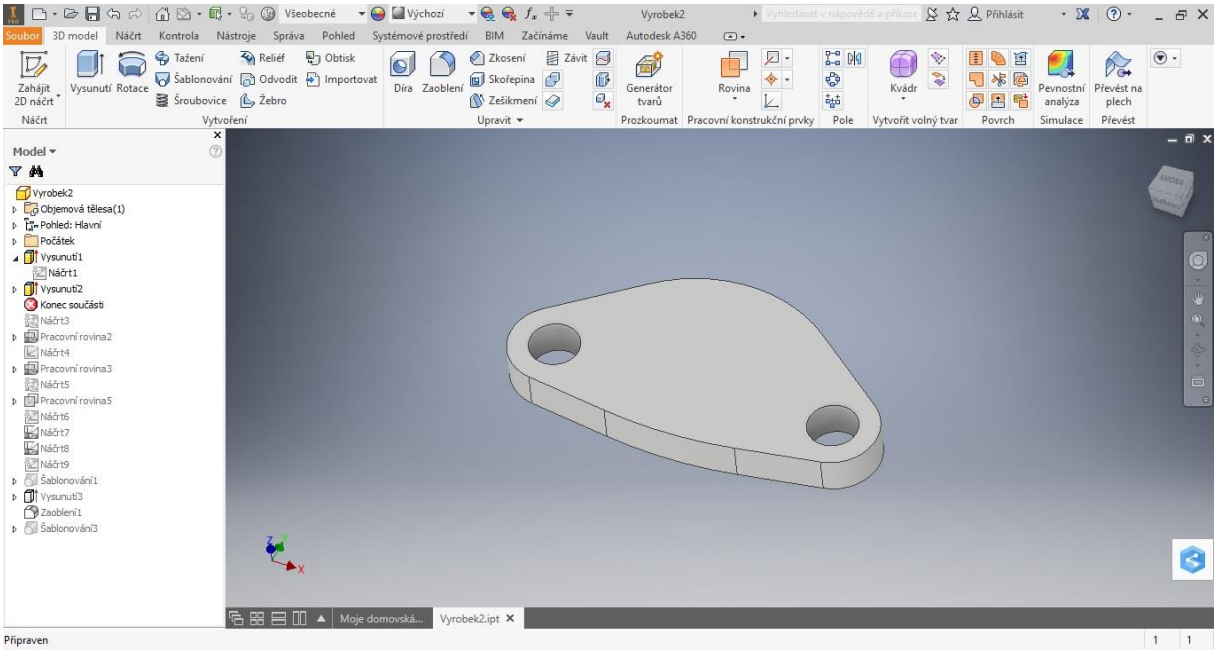
Obr. 2.5 Pohled do karburátorového prostoru na vstupní otvor palivové směsi do motoru.

2.2.1 Konstrukce dosedací části

Prvním krokem návrhu sacího hrdla byla konstrukce spodní dosedací části, která bude přidělána k motoru. Při tomto kroku bylo především nutné dodržet rozteč otvorů a jejich vzájemnou polohu se vstupním otvorem do motoru. Dále pak celkový tvar, který musel být identický jako je vybrání na motoru. Přístup k těmto místům byl obtížný, ke konstrukci tvaru styčné plochy bylo použito originální těsnění (viz. obrázek 2.6), (viz. obrázek 2.7).



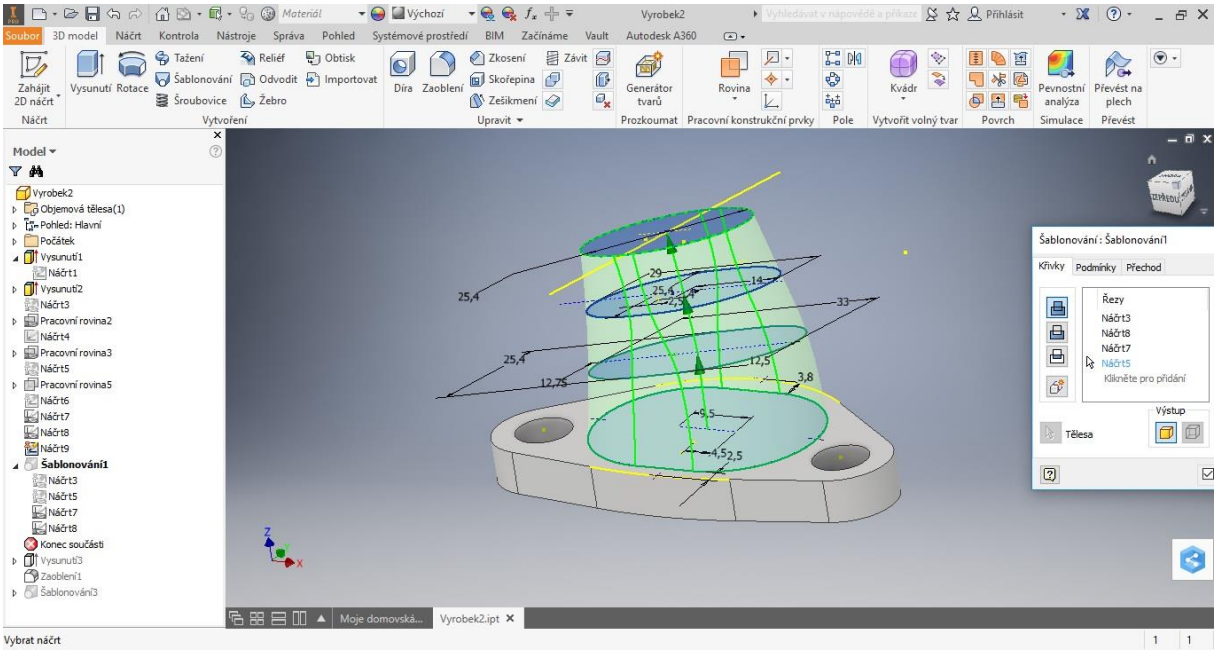
Obr. 2.6 Náčrt dosedací části sacího hrdla.



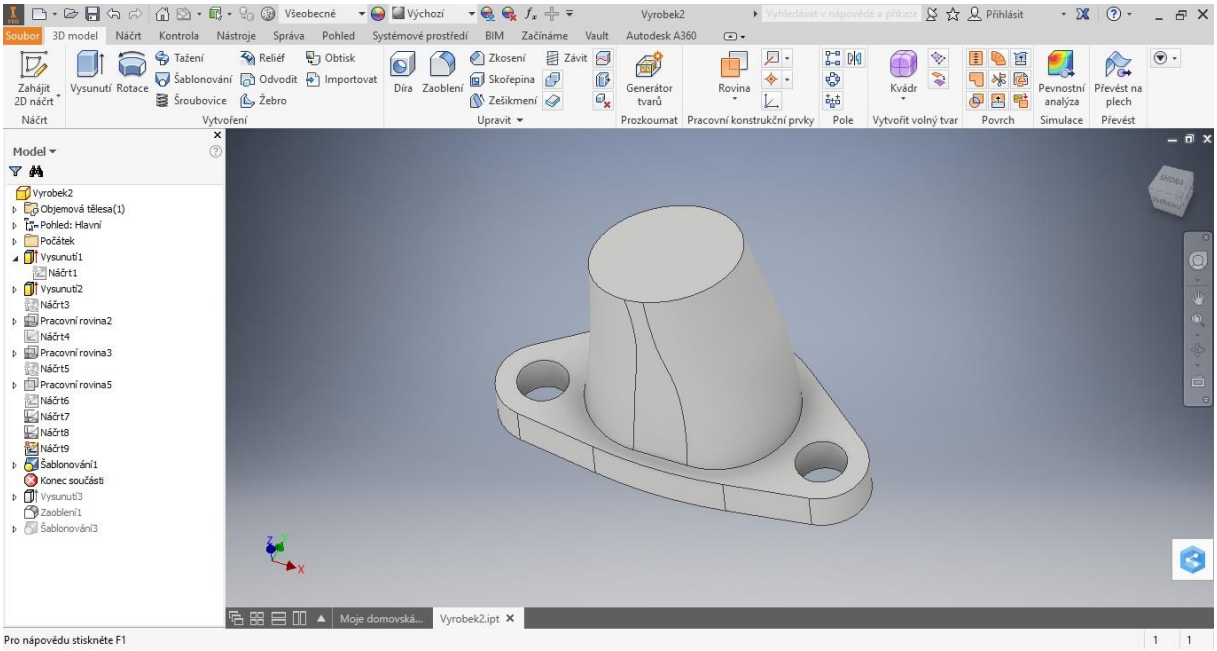
Obr. 2.7 Dosedací část sacího hrdla.

2.2.2 Konstrukce těla

Druhým konstrukčním krokem byl návrh těla sacího hrdla. Z hlediska funkčnosti bylo nutné zachovat příslušné úhly natočení osy tak, aby byla následně zajištěna správná poloha karburátoru vůči motoru. Tělo bylo vymodelováno pomocí experimentálního měření a následně použitím funkce „šablonování“ (viz. obrázek 2.8), (viz. obrázek 2.9).



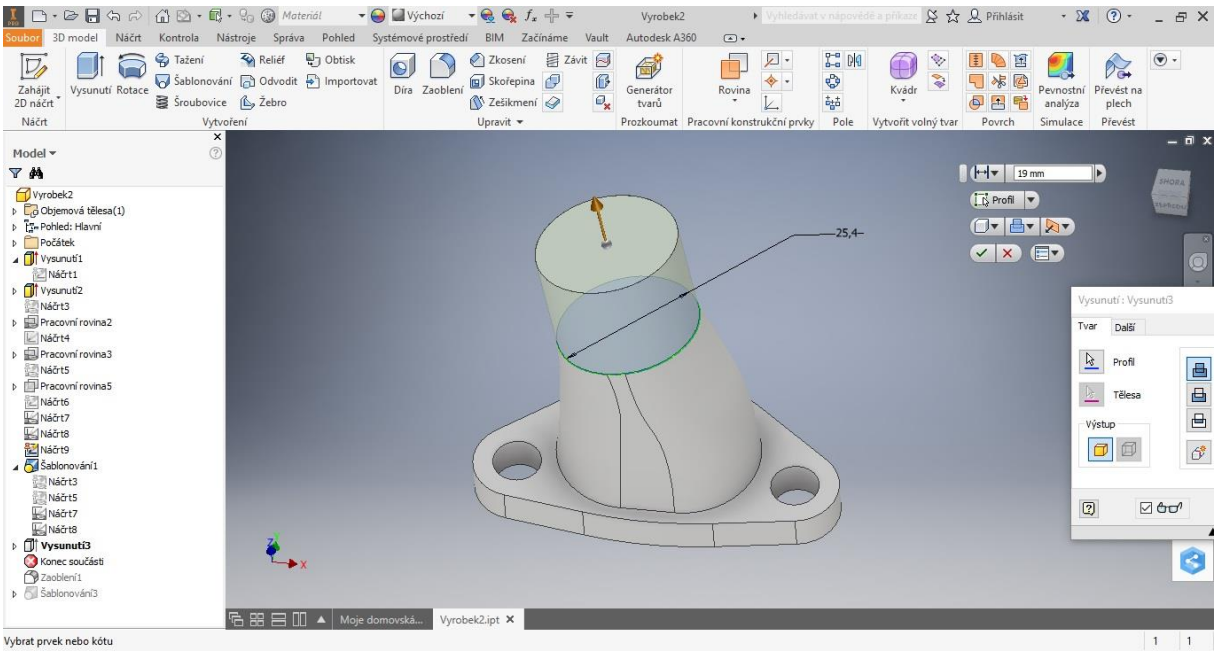
Obr. 2.8 Konstrukce těla sacího hrdla pomocí funkce šablonování.



Obr. 2.9 Dosedací část a tělo sacího hrdla.

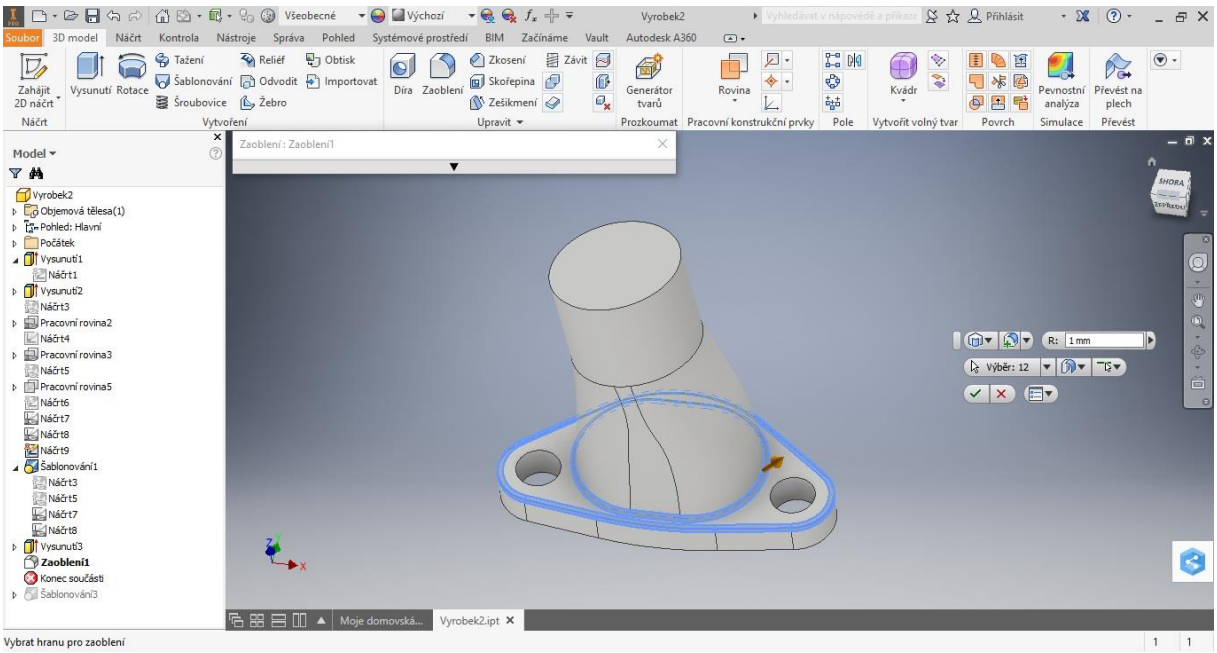
2.2.3 Konstrukce připojovací části a zaoblení hran

Dalším krokem konstrukce vyráběné součásti byla připojovací část, která se zasouvá do karburátoru. Správné natočení a polohu této části zajistila již vhodná konstrukce těla, která byla provedena v předchozím kroku. Důležitým prvkem této konstrukční části byl především přesný rozměr průměru tak, aby hrdlo dobře těsnilo a bylo dostatečně dlouhé (viz. obrázek 2.10).



Obr. 2.10 Konstrukce připojovací části.

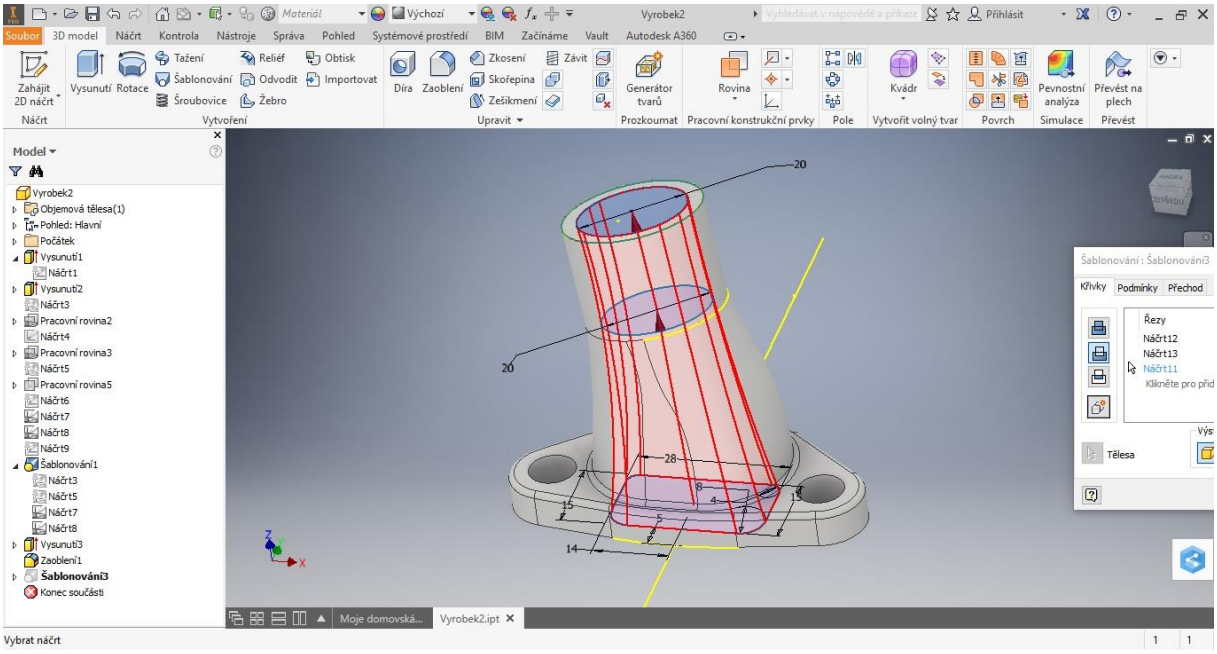
Dalším prvkem tohoto kroku byla volba vhodných zaoblení hran vyráběné součásti. Vzhledem k velikosti výrobku bylo zvoleno zaoblení o poloměru R = 1 mm, které je při použití zvolené technologie výroby dostačující (viz. obrázek 2.11).



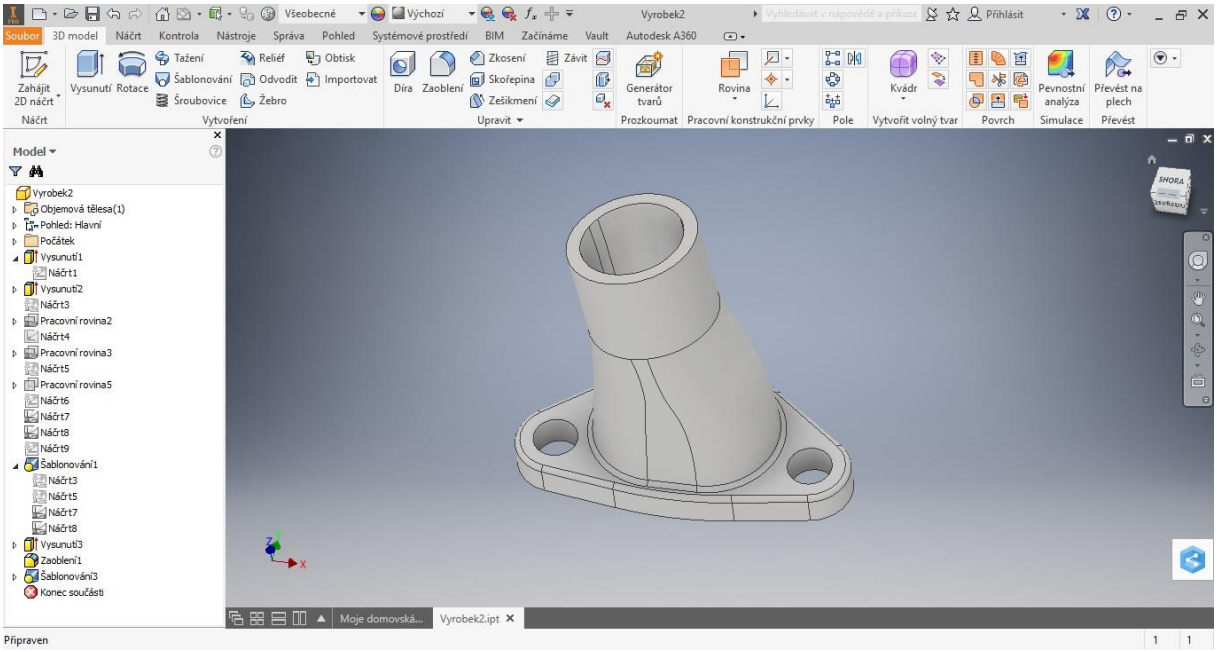
Obr. 2.11 Sací hrdlo s připojovací částí a zaoblením požadovaných hran.

2.2.4 Konstrukce otvoru pro průchod palivové směsi

Posledním krokem konstrukce součásti bylo navržení otvoru pro průchod palivové směsi. Zde byla hlavním požadavkem na přesnost poloha a velikost otvoru. Zároveň bylo nutné zachovat vhodnou tloušťku stěn. Tento prvek byl zkonstruován pomocí funkce šablonování (viz. obrázek 2.12), (viz. obrázek 2.13).



Obr. 2.12 Konstrukce otvoru pro průchod palivové směsi pomocí funkce šablonování.



Obr. 2.13 Výrobek ve finální podobě připravený k výrobě.

2.3 Kontrola pomocí 3D Skeneru

Pro finální kontrolu zkonstruovaného sacího hrdla byl zapůjčen originální díl z jiného motocyklu. K porovnání rozměrů zkonstruované součásti a zapůjčeného originálního dílu byla použita technologie 3D skenování.

2.3.1 Princip funkce 3D Skeneru

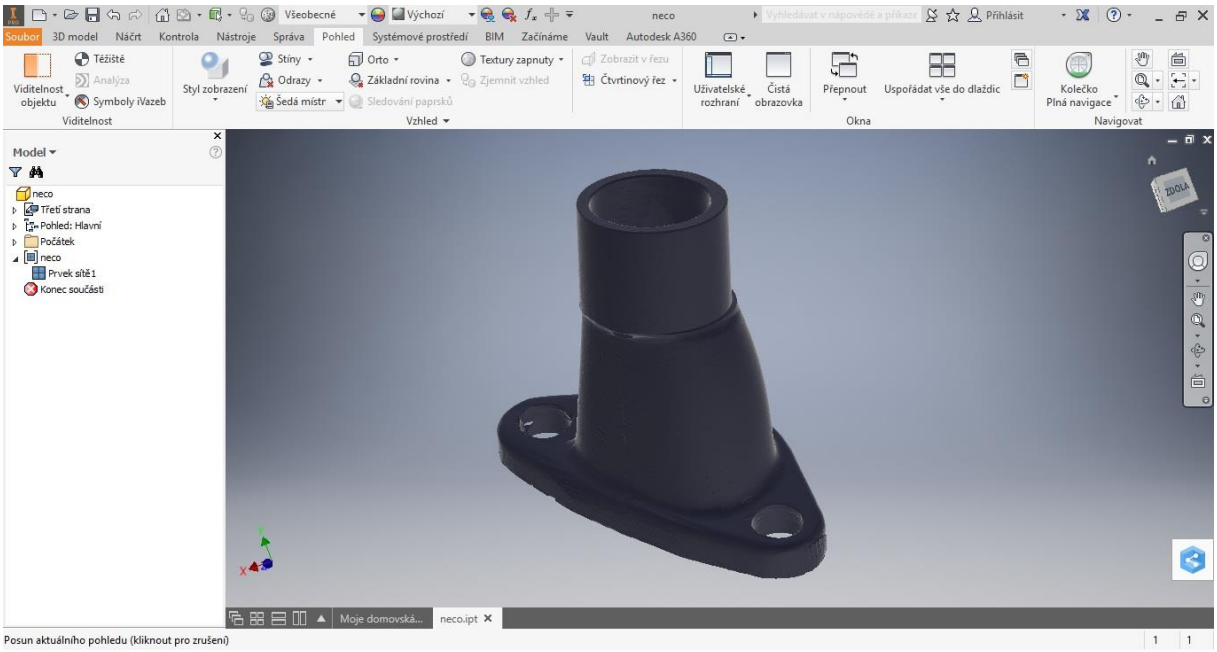
Digitalizovaná součást je v počítači prezentována jako velký počet bodů v prostoru. Skenery snímají povrch fyzické součásti právě v těchto diskrétních bodech. Různé typy skenerů se liší různými způsoby snímání uvedených bodů povrchu součásti [1].

2.3.2 3D sken vyráběné součásti

3D skenování bylo provedeno pomocí 3D skenu COMET LƎD od firmy ZEISS (viz. obrázek 2.14)

Obr. 2.14 3D skener COMET LƎD [21].

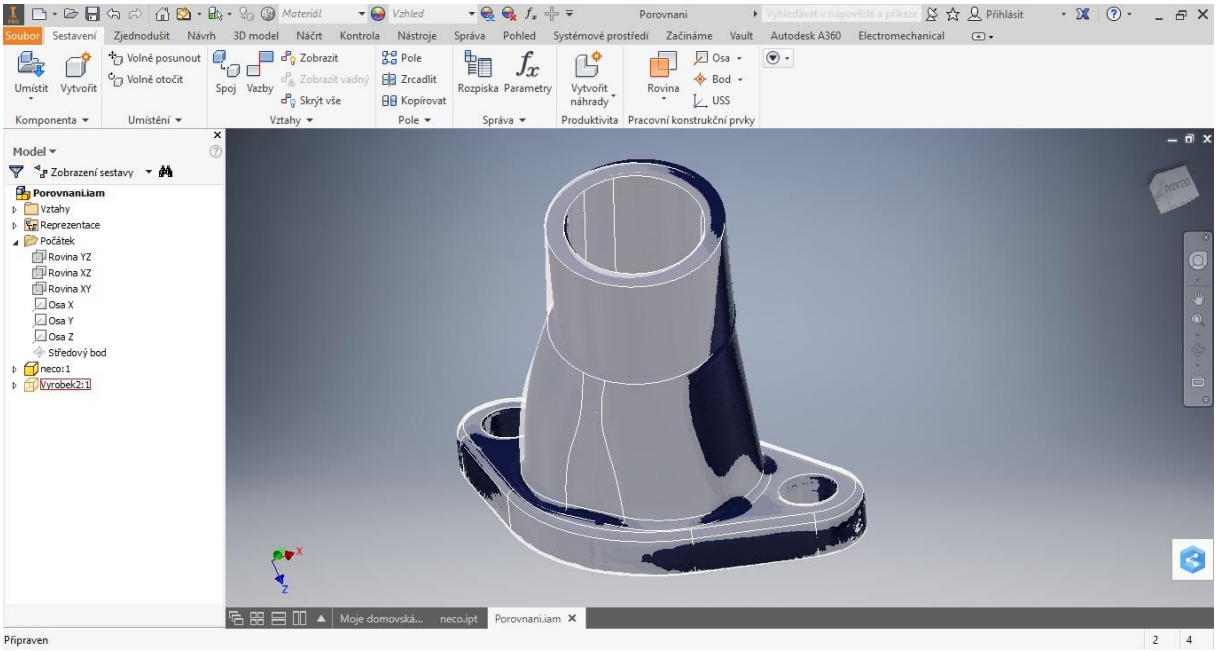
Námi provedený 3D sken byl vyexportován ve formátu .stl, následně otevřen a porovnáván v programu Autodesk Inventor 2017 (viz. obrázek 2.15).



Obr. 2.15 Detailní 3D sken zapůjčeného dílu.

2.3.3 Porovnání zkonstruovaného modelu a 3D skenu

Porovnáním zkonstruovaného modelu a 3D skenu originálního dílu bylo ověřeno, že model je zkonstruován správně a bude jej tedy možné použít jako výchozí pro 3D tisk (viz. obrázek 2.16).



Obr. 2.16 Porovnání 3D skenu a zkonstruovaného modelu.

3 VÝROBA SOUČÁSTI POMOCÍ RŮZNÝCH TECHNOLOGIÍ

Pro výrobu modelu součásti „sací hrdlo“ byly použity čtyři rozdílné typy technologií 3D tisku. Jedná se o metodu Fused Deposition Modeling – FDM, Stereolitografie – SLA, PolyJet Matrix - PJM a Selective Laser Melting – SLM.

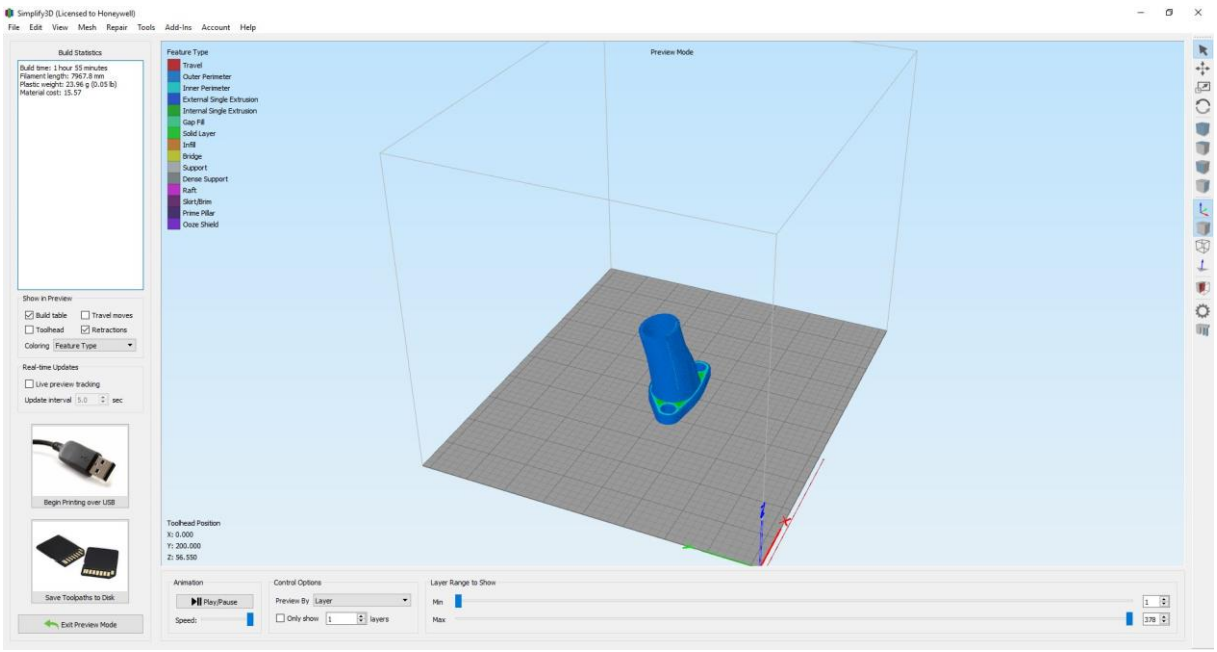
3.1 Fused Deposition Modeling – FDM

První výtisk modelu byl vyroben na tiskárně využívající metodiku FDM tisku od firmy Prusa Research s.r.o.. Jednalo se o typ tiskárny Original Prusa 3D i3 MK2 (viz. obrázek 3.2), (viz. obrázek 3.3).

Příprava virtuálního modelu pro výrobu fyzické součásti byla provedena v programu Simplify3D, který je u tohoto typu tiskáren využíván (viz. obrázek 3.1).

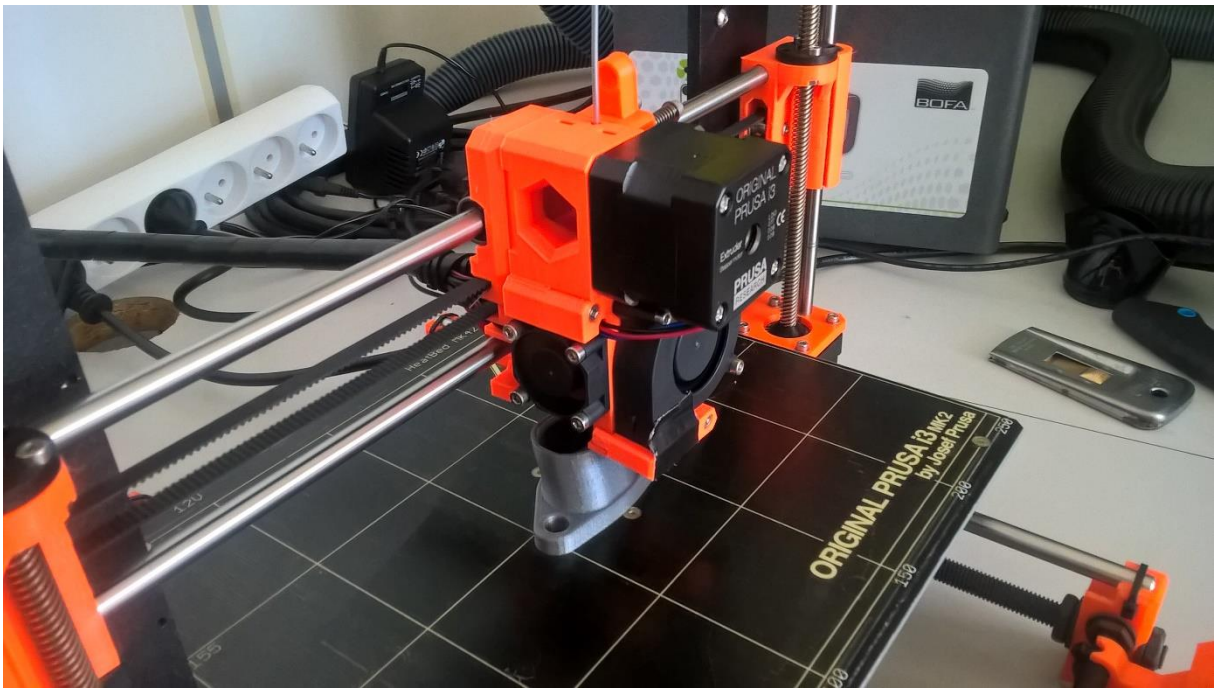
K tisku byl použit materiál PLA (Polylactic acid).

Tato metoda byla použita pro první výtisk z důvodu její nízké ceny. V případě zjištění konstrukčních nedostatků a nutnosti opakovaného tisku by tak nedošlo k velkým finančním ztrátám.



Obr. 3.1 Příprava modelu v programu Simplify3D.

Obr. 3.2 Tiskárna Original Prusa 3D i3 MK2 [4].



Obr. 3.3 Výroba modelu na tiskárně Original Prusa i3 MK2.

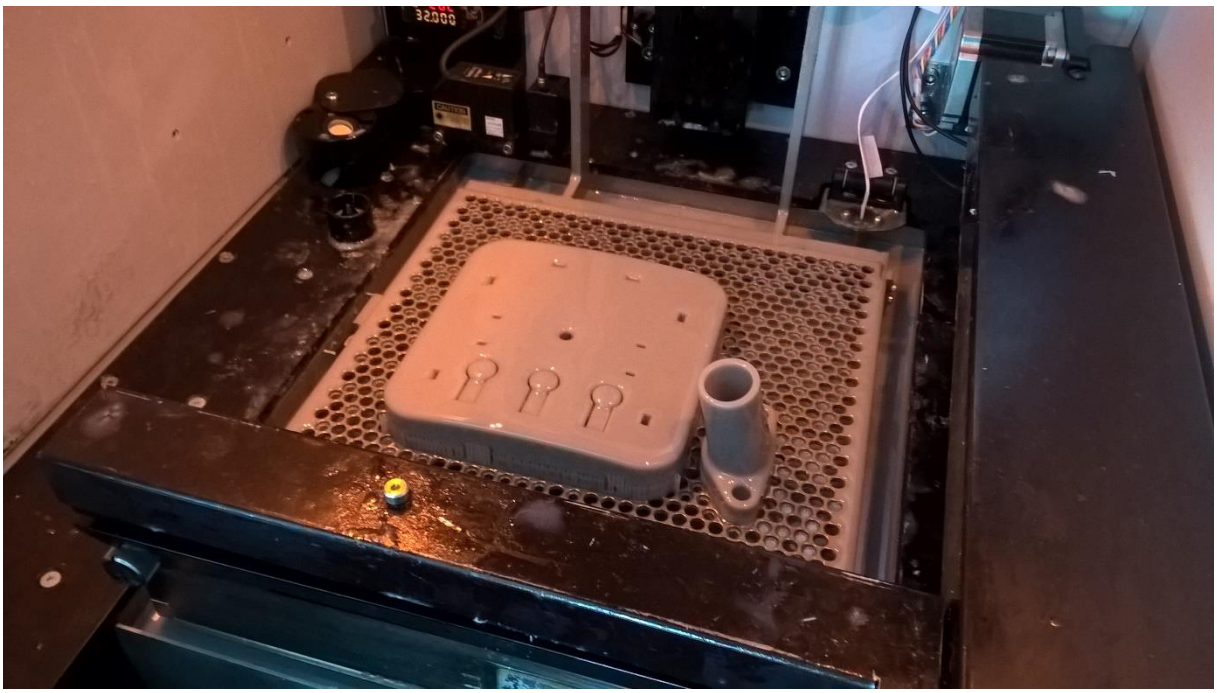
3.2 Stereolitografie – SLA

Další zvolenou metodou tisku byla technologie SLA. Pro výrobu součásti pomocí této metody byla použita tiskárna ProJet 6000 HD (viz. obrázek 3.4) a součást byla připravena v programu 3DXpert od firmy 3D Systems.

Použitým materiálem pro tisk byl VisiJet SL Tough.

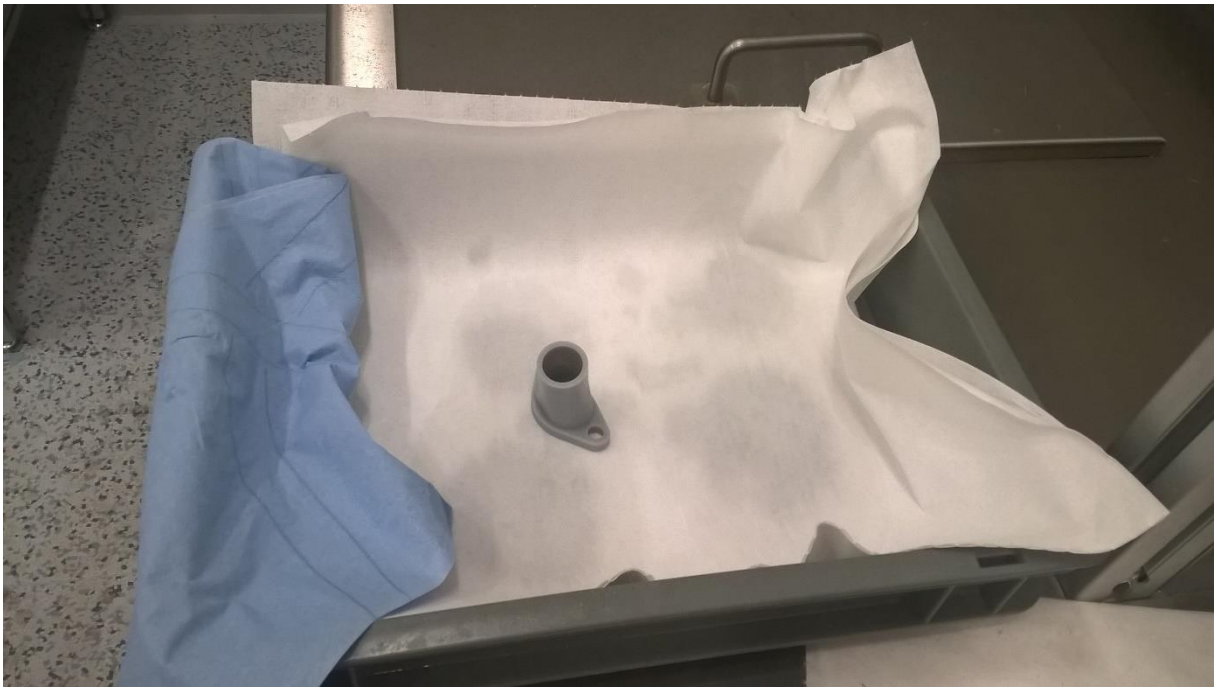
Obr. 3.4 Tiskárna ProJet 6000 HD [30].

Součást byla tištěna společně s dalším výrobkem z důvodu vytíženosti tiskárny a efektivity tisku (viz. obrázek 3.5).



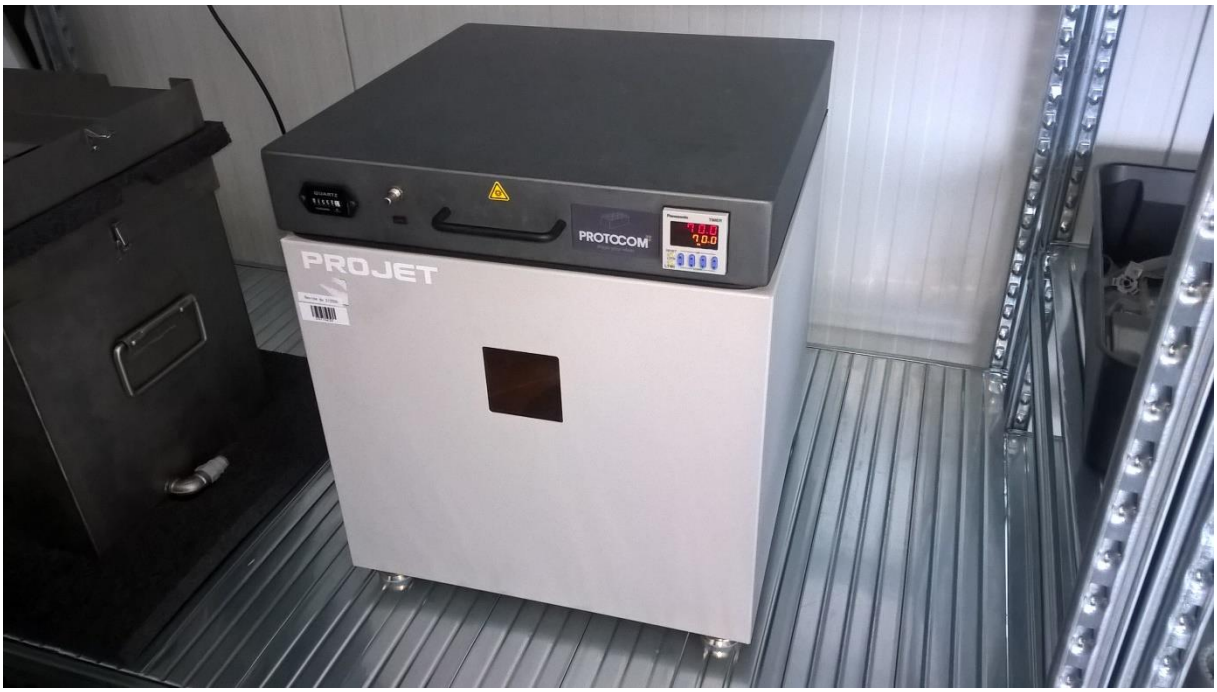
Obr. 3.5 Součást v tiskárně bezprostředně po skončení tisku.

Po ukončení tisku bylo nutné model nejdříve chemicky omýt v isopropylalkoholu a usušit (viz. obrázek 3.6).



Obr. 3.6 Chemicky omytý model.

Poslední dokončovací operací bylo vytvrzení výrobku pomocí UV záření v UV komoře (viz. obrázek 3.7).



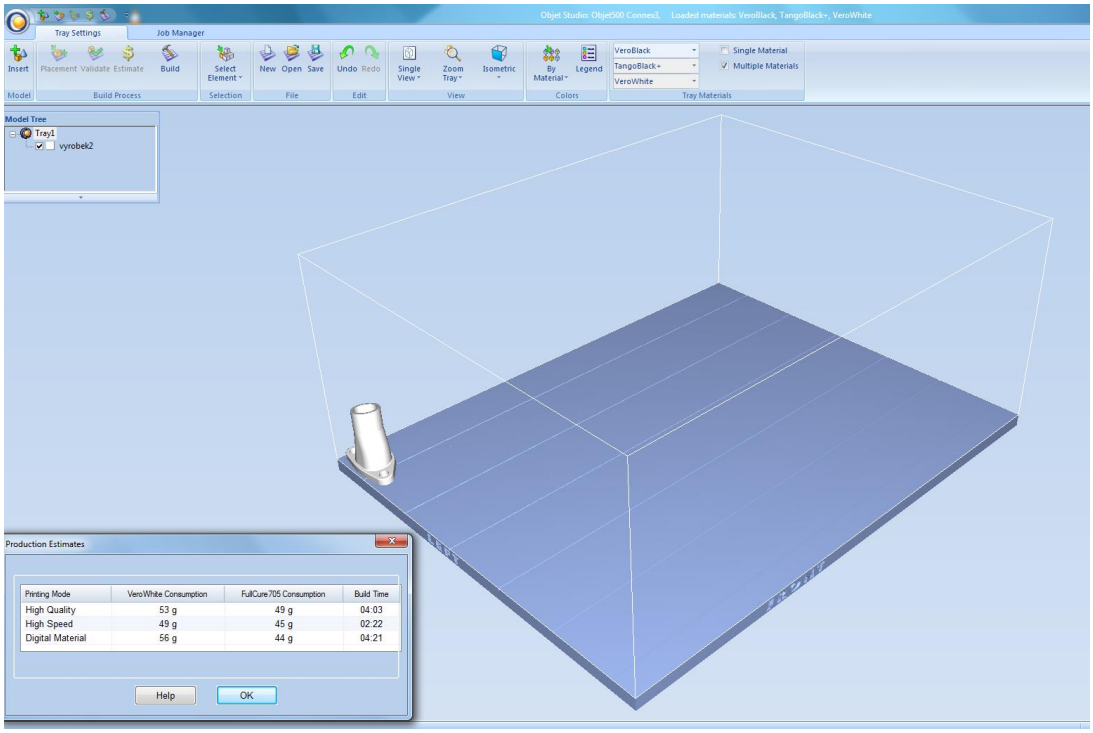
Obr. 3.7 UV komora PROJET.

3.3 PolyJet Matrix

Třetí model byl vyroben pomocí technologie PolyJet Matrix na tiskárně Objet 500 Connex3 od firmy Stratasys (viz. obrázek 3.9), (viz. obrázek 3.10).

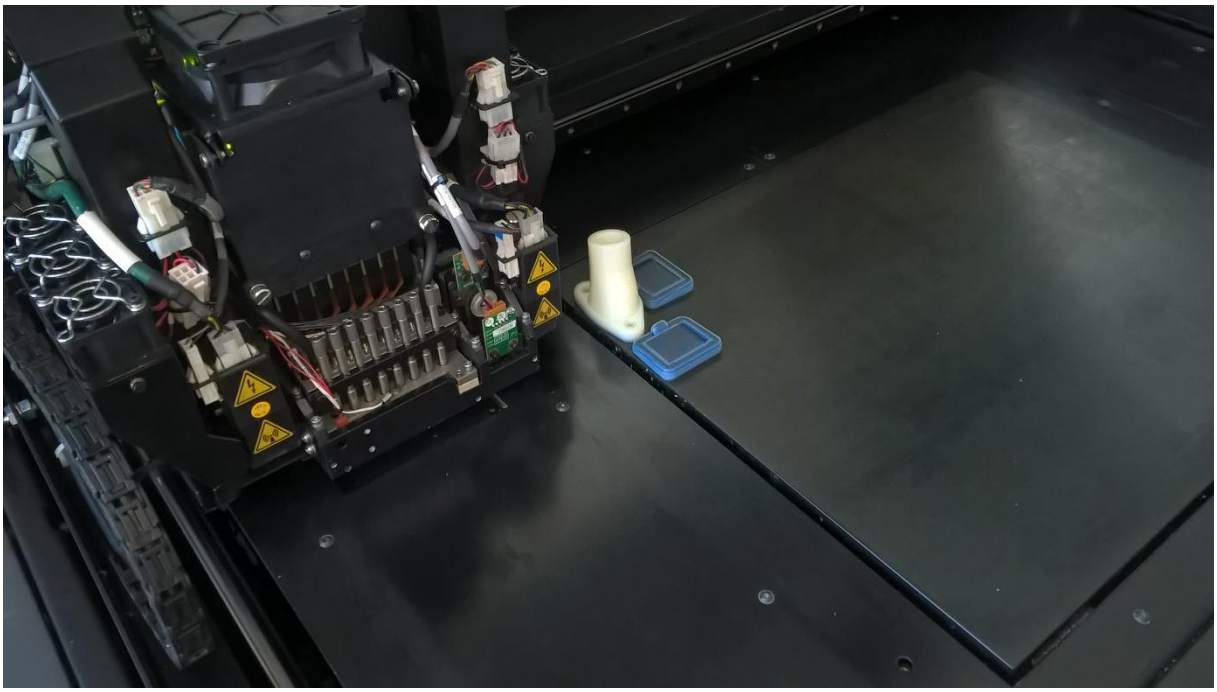
Jako stavební materiál byl použit fotopolymer s označením VeroWhitePlus RGD 835.

Součást byla pro 3D tisk připravena v programu Objet studio (viz. obrázek 3.8).



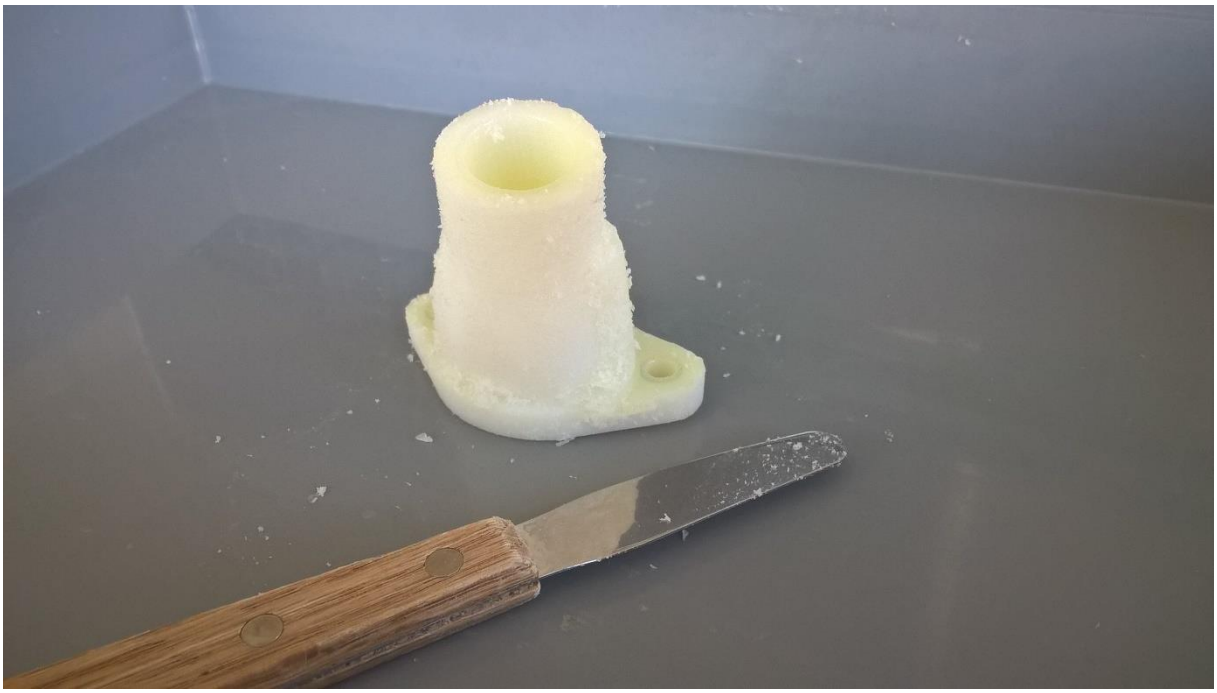
Obr. 3.8 Příprava modelu v programu Objet studio.

Obr. 3.9 Tiskárna Objet 500 Connex3 [31].



Obr. 3.10 Umístění modelu v tiskárně.

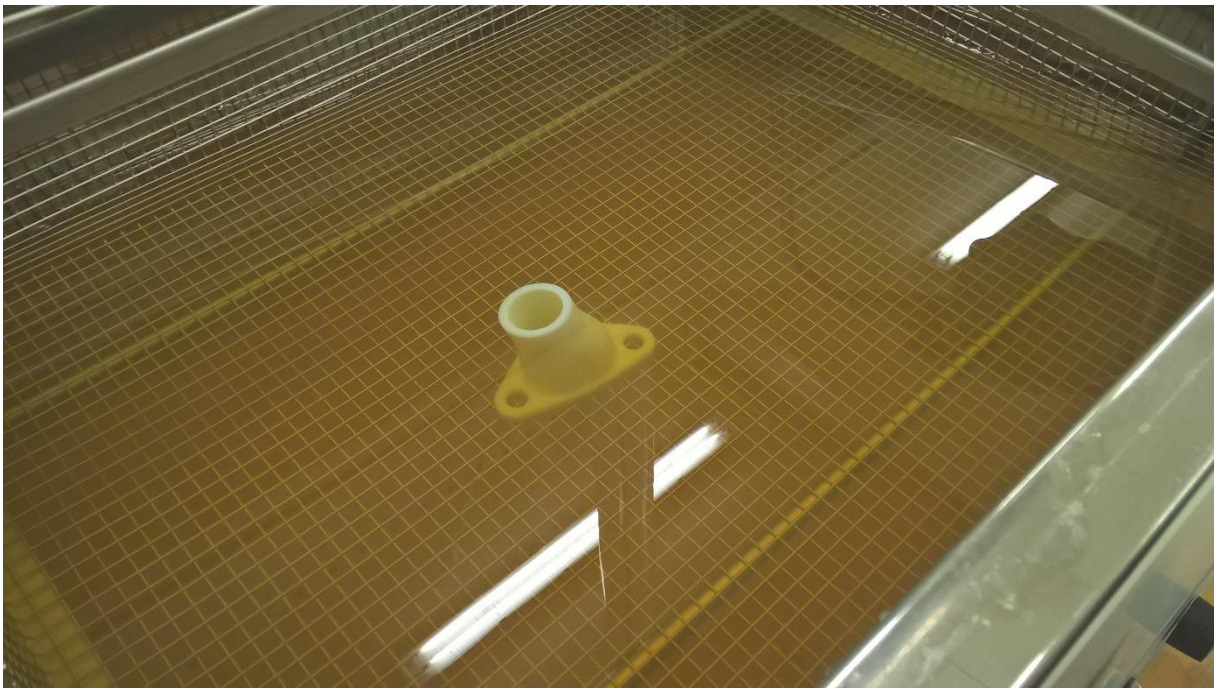
Z modelu je po vytažení z tiskárny nejdříve nutné odstranit podpory. Po odstranění podpor zůstanou na modelu otřepy (viz. obrázek 3.11), které je nutno odstranit. K odstranění těchto otřepů byly použity speciální nástroje (viz. obrázek 3.12), které k tomuto účelu slouží.



Obr. 3.11 Model před finálními úpravami.

Obr. 3.12 Nástroje pro úpravu součásti.

Poté co byl model mechanicky očištěn od otřepů následovalo chemické čištění v lázni 2% hydroxidu sodného (viz. obrázek 3.13). Při tomto čištění byly odstraněny jemnější zbytky podpůrného materiálu. Po skončení této operace byl výrobek hotov.



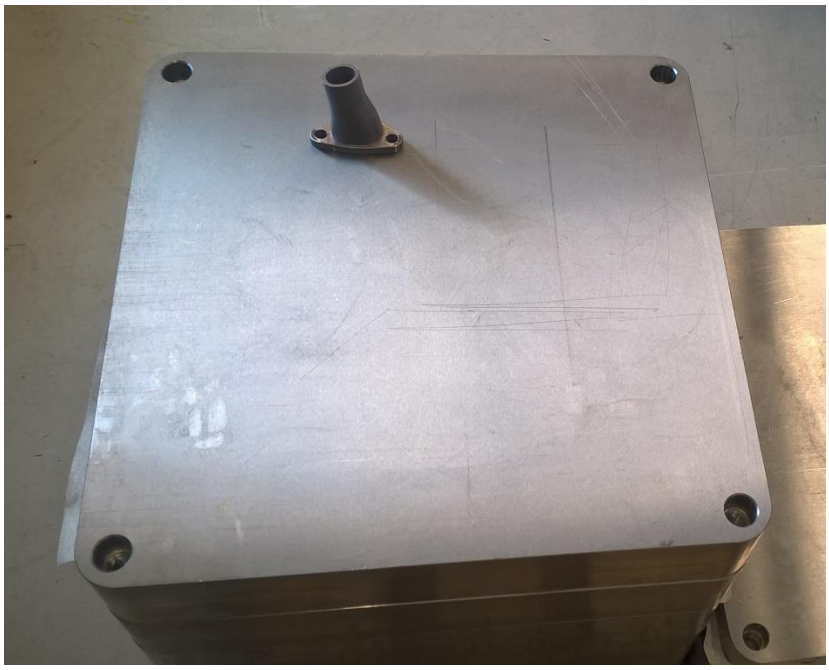
Obr. 3.13 Výrobek při chemickém čištění.

3.4 Selective Laser Melting – SLM

Poslední, čtvrtý výtisk byl zhotoven metodou SLM (viz. obrázek 3.15). Tato metoda je téměř totožná s metodami SLS a DMLS. Model byl vyroben tiskárnou SLM280 od firmy SLM Solutions (viz. obrázek 3.14).

Tento výtisk se od ostatních modelů podstatně liší použitým materiálem, kterým je tentokrát kov. Jako materiál pro tisk byl použit AlSi10Mg. Příprava počítačového modelu pro 3D tisk byla provedena v programu Materialise Magics.

Obr. 3.14 Tiskárna SLM280 [32].



Obr. 3.15 Vytištěný model přiložený na tiskové podložce.

4 POROVNÁNÍ VYTIŠTĚNÝCH 3D MODELŮ

Porovnávány byly výtisky součásti „sací hrdlo“, které byly vyrobeny použitím technologií Fused Deposition Modeling – FDM, Stereolitografie – SLA, PolyJet Matrix - PJM a Selective Laser Melting – SLM.

Výrobky byly porovnávány z hlediska přesnosti rozměrů, jakosti, hmotnosti, doby tisku a ceny.

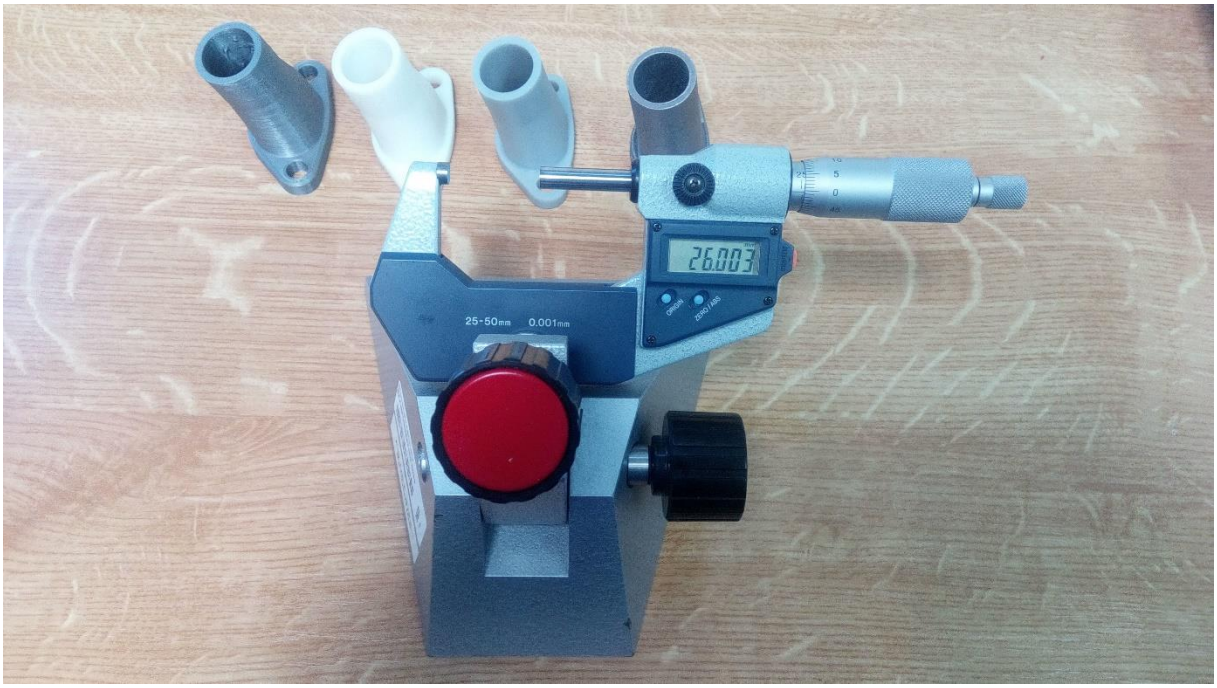
4.1 Měření rozměrové přesnosti

Prvním typem měření bylo měření rozměrové přesnosti vytištěných modelů. Na modelech byly experimentálně měřeny čtyři různé prvky. Tři z těchto prvků byly kruhové průměry a čtvrtým byla rozteč kruhových otvorů.

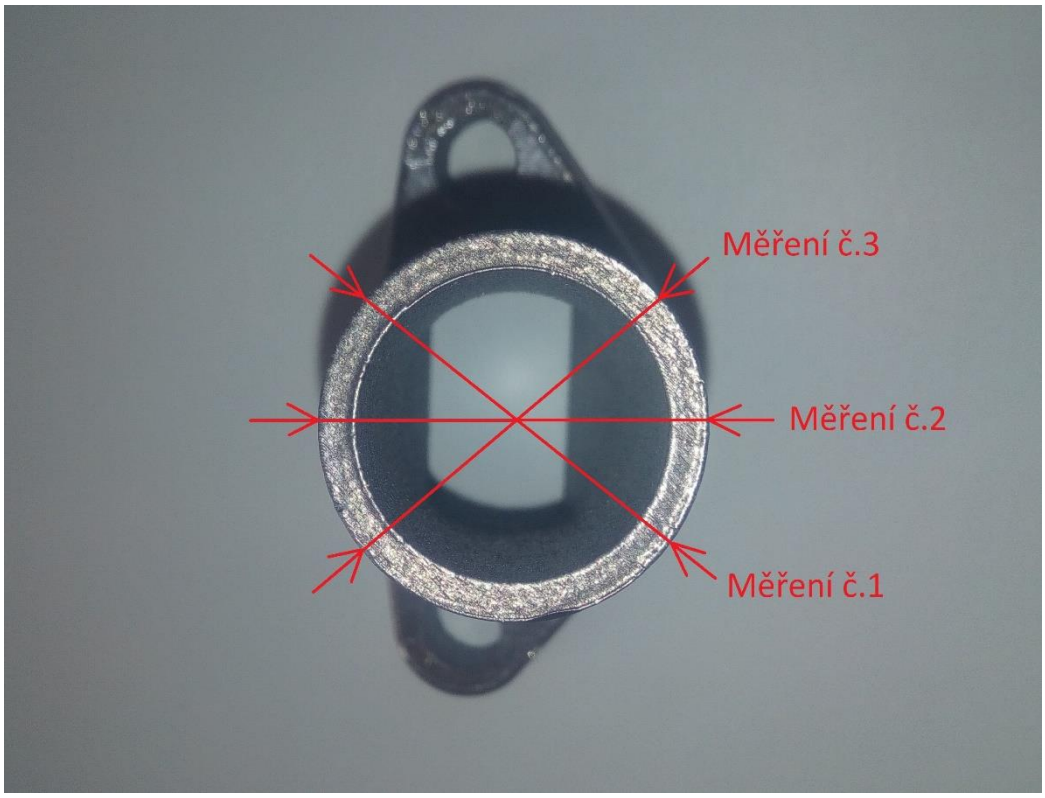
Každé měření bylo provedeno celkem 3x na různých místech daného prvku, poté byla vypočtena průměrná hodnota.

4.1.1 Měření vnějšího průměru připojovací části

Měření připojovací části bylo provedeno pomocí mikrometru, který byl upnut ve stojánku (viz. obrázek 4.1). Průměr byl u všech součástí měřen na třech různých místech (viz. obrázek 4.2). Data byla zaznamenána do tabulky a po naměření všech hodnot byla vypočtena hodnota průměrná (viz. tabulka 4.1).



Obr. 4.1 Upnutí mikrometru ve stojánku při měření průměru připojovací části.



Obr. 4.2 Znázornění jednotlivých měření vnější připojovací částí.

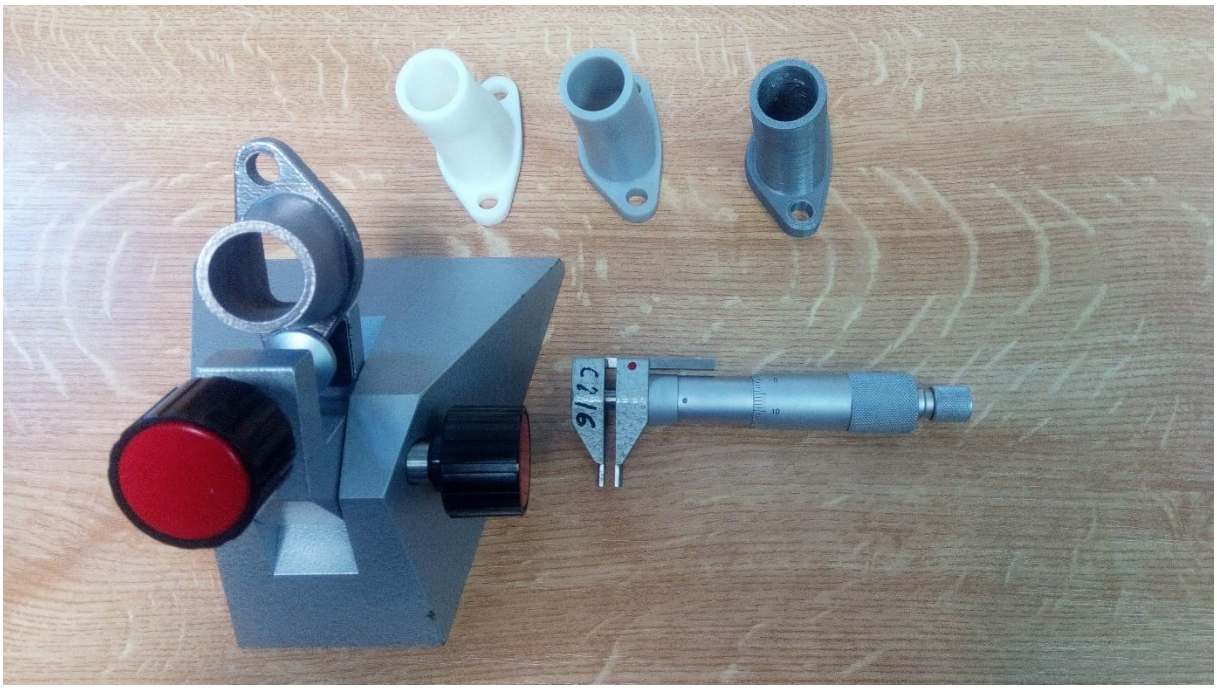
Tab. 4.1 Naměřené a průměrné hodnoty vnější připojovací části.

Metoda	**FDM**	**SLA**	**PJM**	**SLM**
Měření č.1 [mm]	25,493	25,401	25,731	25,394
Měření č.2 [mm]	25,578	25,353	25,690	25,413
Měření č.3 [mm]	25,543	25,425	25,773	25,358
Průměr [mm]	25,538	25,393	25,731	25,388

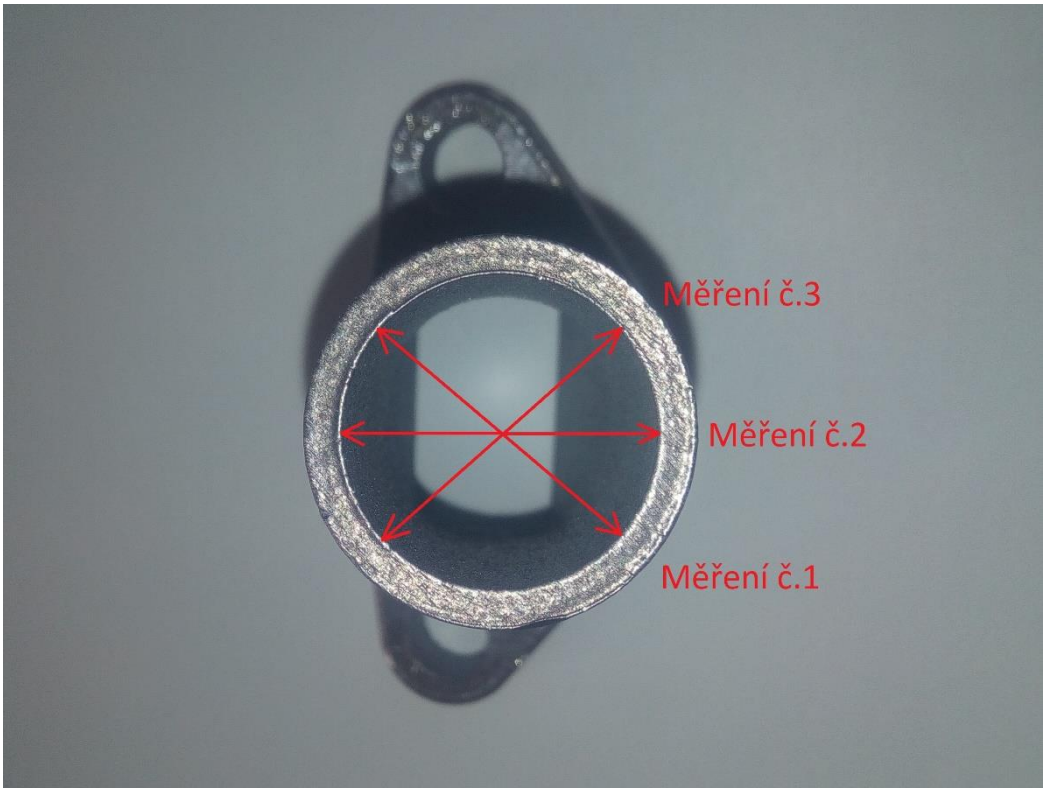
Dle počítačového modelu byla zadaná hodnota 25,4 mm. Z měření vyplývá, že rozměry jednotlivých modelů jsou rozdílné. Nejblíže zadané hodnotě byly modely vyrobené technologiemi SLA a SLM.

4.1.2 Měření vnitřního průměru připojovací části

Dalším měřením bylo měření rozměrové přesnosti vnitřního průměru připojovací části. Při tomto měření byla pro snazší manipulaci součást upnuta ve stojánku a měřena pomocí vnitřního mikrometru (viz. obrázek 4.3). Měření probíhalo na třech různých místech (viz. obrázek 4.4) a naměřená data společně s vypočítaným průměrem byla zapsána do tabulky (viz. tabulka 4.2).



Obr. 4.3 Upnutí součásti ve stojánku a vnitřní mikrometr.



Obr. 4.4 Znázornění jednotlivých měření vnitřní připojovací části.

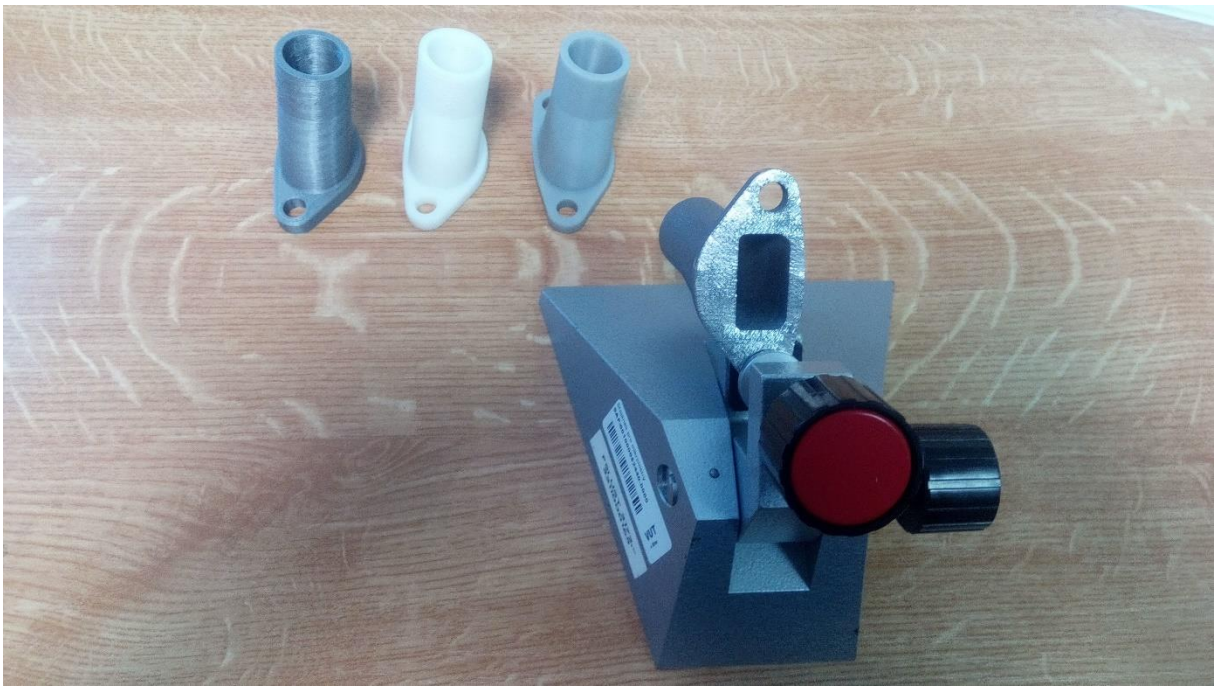
Tab. 4.2 Naměřené a průměrné hodnoty vnitřní připojovací části.

Metoda	FDM	SLA	PJM	SLM
Měření č.1 [mm]	19,55	19,77	19,58	19,91
Měření č.2 [mm]	19,77	20,04	19,82	20,06
Měření č.3 [mm]	19,54	19,82	19,63	20,01
Průměr [mm]	19,62	19,88	19,68	19,99

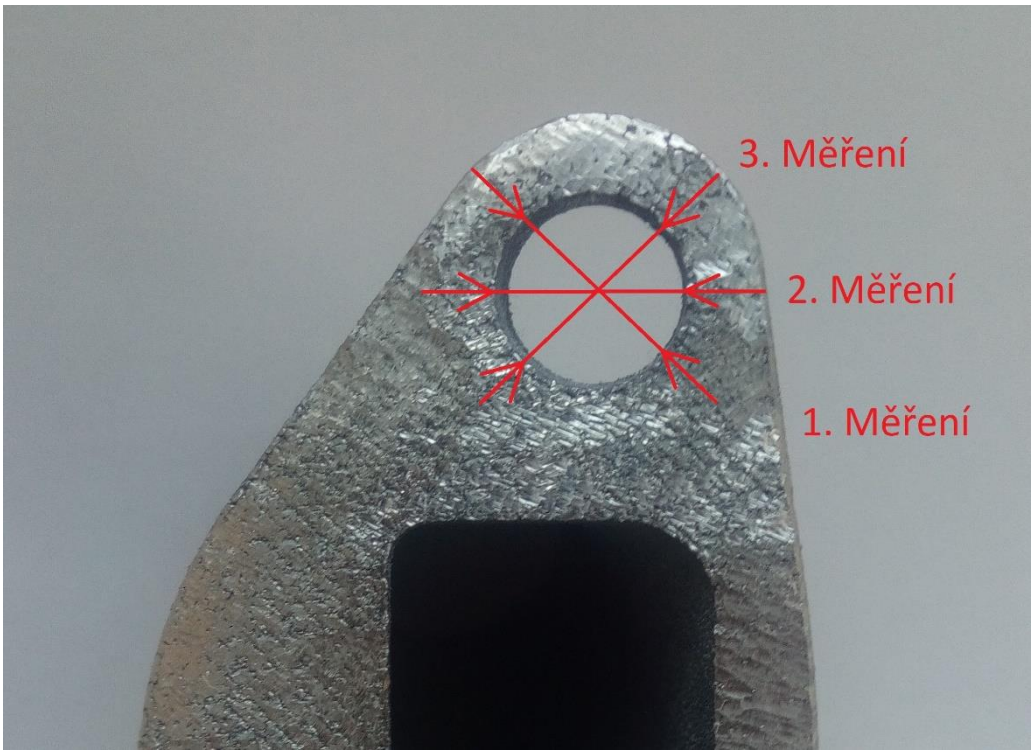
Velikost průměru byla dle počítačového modelu stanovená na 20 mm. Z naměřených hodnot vyplývá, že velikost otvoru byla u jednotlivých metod rozdílná. U metod FDM, SLA a PJM byl otvor menší než zadaná hodnota. U metody SLM byla velikost přibližně stejná jako zadaná hodnota.

4.1.3 Měření průměru otvoru pro šroub

Třetím prvkem, který byl měřen byl jeden ze dvou otvorů pro šrouby. Obrobek byl při tomto měření upnut ve stojánku (viz. obrázek 4.5). Měření bylo provedeno pomocí vnitřního mikrometru. Průměr otvoru byl měřen na třech různých místech (viz. obrázek 4.6). Naměřené hodnoty byly zaznamenány a následně vypočítán jejich průměr (viz. tabulka 4.3).



Obr. 4.5 Upnutí součásti ve stojánku.



Obr. 4.6 Znázornění jednotlivých měření otvoru pro šroub.

Tab. 4.3 Naměřené a průměrné hodnoty otvoru pro šrouby.

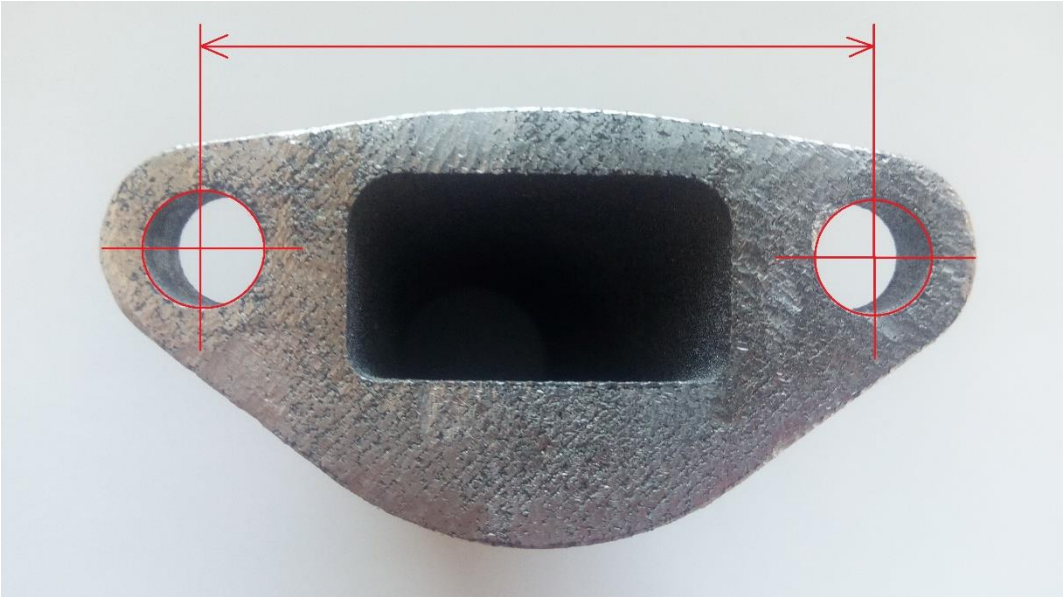
Metoda	**FDM**	**SLA**	**PJM**	**SLM**
Měření č.1 [mm]	8,27	8,32	8,17	8,39
Měření č.2 [mm]	8,17	8,34	8,22	8,31
Měření č.3 [mm]	8,28	8,21	8,18	8,28
Průměr [mm]	8,24	8,29	8,19	8,33

V počítačovém modelu byla zadána velikost průměru 8,5 mm. Z výsledků měření můžeme vidět, že u všech modelů byla velikost otvoru menší než zadaná hodnota. Nejblíže hodnotě zadané v počítačovém modelu je model vyrobený pomocí technologie SLM. Nejdále pak výrobek vytištění technologií PJM.

4.1.4 Měření rozteče otvorů pro šrouby

Posledním měřeným prvkem byla rozteč otvorů pro šrouby (viz. obrázek 4.8). Výrobek při tomto měření nebyl kvůli lepší manipulaci upnut a měření bylo provedeno digitálním posuvným měřítkem (viz. obrázek 4.7). Měření bylo u každého modelu opakováno celkem třikrát a poté byla vypočtena průměrná hodnota. Tyto hodnoty byly zaznamenány do tabulky (viz. tabulka 4.4)

Obr. 4.7 Modely a použité digitální měřidlo pro měření rozteče otvorů pro šrouby.



Obr. 4.8 Znázornění měření rozteče.

Tab. 4.4 Naměřené a průměrné hodnoty rozteče otvorů pro šrouby.

Metoda	**FDM**	**SLA**	**PJM**	**SLM**
Měření č.1 [mm]	48,84	48,85	49,01	48,93
Měření č.2 [mm]	48,93	48,87	48,98	48,90
Měření č.3 [mm]	48,81	48,88	48,96	48,92
Průměr [mm]	48,86	48,87	48,98	48,92

Zadanou roztečí v digitálním modelu byla hodnota 48,9 mm. Z výsledků je patrné, že u všech modelů bylo dosaženo přibližně požadované hodnoty. Nejpřesnější však byl model vyrobený technologií SLM.

4.2 Měření drsnosti

Druhým měřením za účelem posouzení vlastností bylo měření drsnosti povrchu Ra a Rz. Měření drsnosti bylo provedeno pomocí drsnoměru s modelovým označením „TR100 Surface Roughness Tester“ (viz. obrázek 4.9).

Obr. 4.9 Drsnoměr TR100 Surface Roughness Tester [33].

Měření drsnosti každého modelu bylo provedeno vždy celkem třikrát na třech různých místech výrobku (viz. obrázek 4.10). Naměřené hodnoty byly zaznamenány a na jejich základě byla vypočtena průměrná hodnota. Výsledné hodnoty byly zapsány do tabulek (viz. tabulka 4.5 a tabulka 4.6).

Tab. 4.5 Naměřené hodnoty drsnosti Ra.

Metoda	**FDM**	**SLA**	**PJM**	**SLM**
Měření č.1 [µm]	7,12	2,01	9,71	3,12
Měření č.2 [µm]	7,42	2,19	9,48	2,94
Měření č.3 [µm]	7,26	2,32	9,94	3,25
Průměr [µm]	7,27	2,17	9,71	3,10

Tab. 4.6 Naměřené hodnoty drsnosti Rz.

Metoda	**FDM**	**SLA**	**PJM**	**SLM**
Měření č.1 [µm]	40,4	11,1	52,1	18,4
Měření č.2 [µm]	39,2	9,7	53,3	20,0
Měření č.3 [µm]	41,3	12,6	49,5	22,5
Průměr [µm]	40,3	11,1	51,6	20,3

Z výsledků měření vyplývá, že výrobkem s nejkvalitnějším povrchem je model vyrobený technologií SLA, u kterého byla stanovena průměrná drsnost Ra = 2,17 a Rz = 11,1. Nejhorší povrch byl zjištěn u modelu vyrobeného pomocí technologie PJM s průměrnými hodnotami drsnosti Ra = 9,71 a Rz = 51,6.

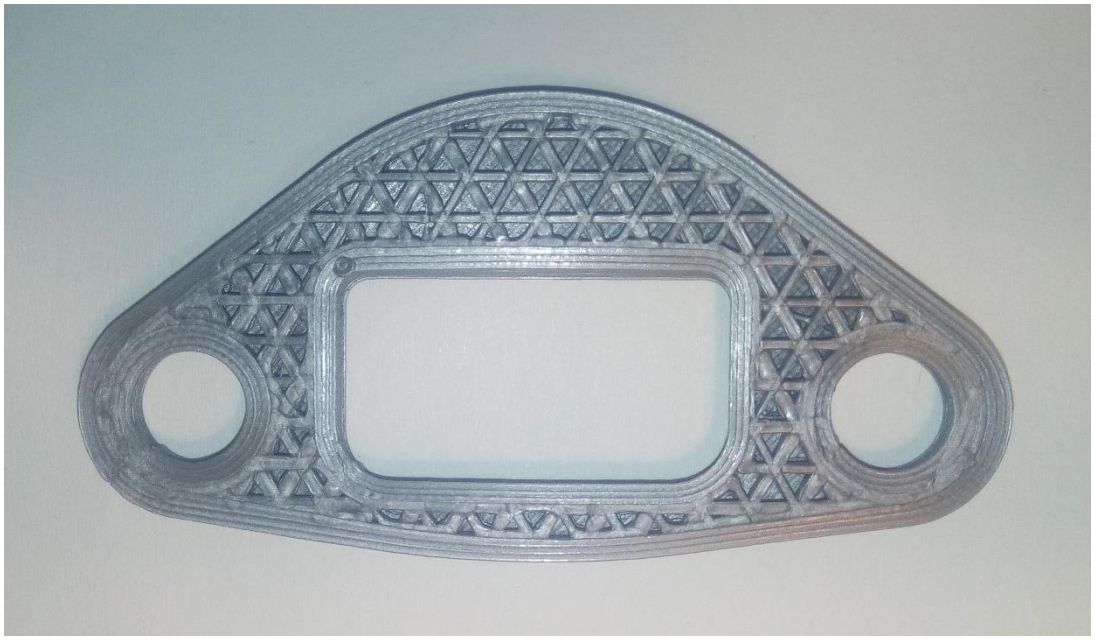
4.3 Měření hmotnosti

Dalším porovnáním fyzických vlastností vytištěných modelů byla hmotnost. Vzhledem k tomu, že hmotnost není v našem případě zcela důležitou vlastností, tak její měření nevyžadovalo zcela přesnou metodiku. Hmotnost byla tedy měřena pouze orientačně pomocí potravinářské váhy. Výsledky měření byly zaznamenány do tabulky (viz. tabulka 4.7).

Tab. 4.7 Hmotnost modelů.

Metoda	**FDM**	**SLA**	**PJM**	**SLM**
Hmotnost [g]	21	25	26	54

Zcela nejtěžším je model vyrobený pomocí technologie SLS, který je více než 2x těžší než ostatní výrobky. Je tomu tak, protože je jako jediný vyroben z kovu, na rozdíl od ostatních modelů, které jsou plastové. Naopak nejlehčí je model vyrobený technologií FDM. U tohoto modelu oproti modelům vyrobených technologiemi SLA a PJM tvoří váhový rozdíl struktura výrobku, která není zcela vyplněná materiálem (viz. obrázek 4.10).



Obr. 4.10 Struktura modelu vytvořená FDM tiskem.

4.4 Srovnání časů tisku

U jednotlivých metod se výrazně lišil čas tisku. Srovnání z tohoto hlediska bylo zaznamenáno do tabulky (viz. tabulka 4.8). Vzhledem k tomu, že se jednotlivé modely tiskly zároveň s dalšími výrobky, je uváděný čas tisku pouze orientační.

Tab. 4.8 Časy tisku.

Metoda	**FDM**	**SLA**	**PJM**	**SLM**
Čas [hod]	2	5	4	6

Nejrychlejší technologií je dle výsledku FDM, jedná se ovšem o nejméně kvalitní výrobek. Je zde také velká pravděpodobnost, že se výtisk nezdaří na první pokus. Nejdéle trvající technologií byla SLM.

4.5 Srovnání ceny

Posledním porovnávaným kritériem byly materiálové výrobní náklady jednotlivých modelů. V této kategorii byly zaznamenány nejvýraznější rozdíly (viz. tabulka 4.9). Jedná se o nekomerční ceny.

Tab. 4.9 Cena tisku.

Metoda	**FDM**	**SLA**	**PJM**	**SLM**
Cena [Kč]	16	326	460	5500

Výrazně nejlevnějším výrobkem byl model vyrobený technologií FDM. Cena materiálu byla stanovena na 16 Kč. Nejdražším výrobkem byl model zhotovený pomocí technologie SLM. Materiál výrobku byl stanoven na cenu 5500 Kč.

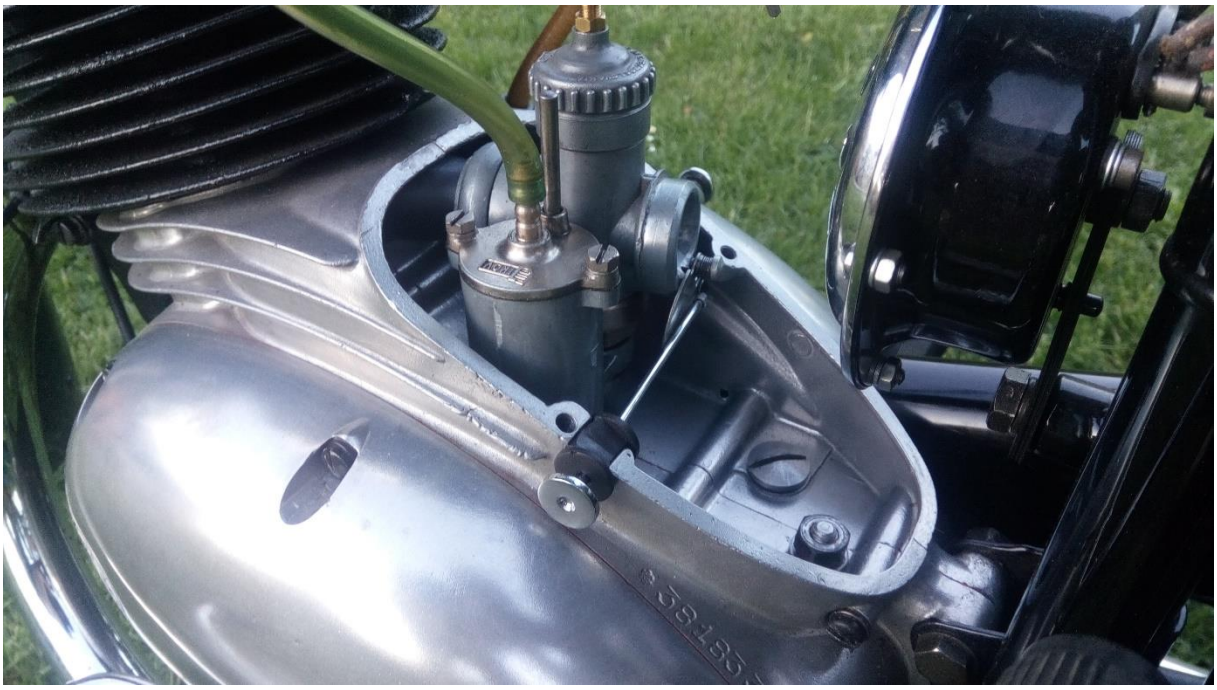
4.6 Zkouška vytištěného modelu na motocyklu

Na závěr bylo vyzkoušeno, zda výrobek součásti „sací hrdlo“ zajistí správnou funkčnost na samotném motocyklu (viz. obrázek 4.11).

Poté, co výrobek správně dosedl na válec motoru, byl nasazen karburátor (viz. obrázek 4.12). Karburátor byl připojen správně a tím byla prakticky ověřena rozměrová přesnost spodní dosedací a připojovací části.

Posledním krokem bylo vyzkoušet, zda bude zajištěna správná poloha karburátoru vůči krytu (viz. obrázek 4.13).

Obr. 4.11 Vytištění model sacího hrdla nasazený na motocyklu (FDM).



Obr. 4.12 Vytištěný model sacího hrdla s nasazeným karburátorem.

Obr. 4.13 Motocykl ČZ 125 C po nasazení víka motoru.

Součást „sací hrdlo“ správně dosedla na všechna požadovaná místa a tím byla ověřena její správná konstrukce a výroba.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo porovnání technologií 3D tisku a následná výroba zvolené součásti. Zvolena byla součást „sací hrdlo“, která je součástí motoru motocyklu ČZ 125 C z roku 1952. Původní součást na motocyklu byla zničena a vzhledem k tomu, že přesná výkresová dokumentace není dostupná, bylo třeba tuto součást znovu zkonstruovat. Cílem bylo navrhnout tuto součást a následně pomocí technologií 3D tisku vyrobit její funkční repliku, která by mohla být použita k výrobě skořepinové formy a následnému odlití nové součásti pomocí technologie přesného lití.

V první části práce je popsána podstata 3D tisku, historie jeho vzniku a způsoby jeho využití. Jsou zde uvedeny a rozebrány jednotlivé metody 3D tisku.

Druhá část je věnována konstrukci reálné součásti. Ke konstrukci byl použit program Autodesk Inventor 2017. Prvním krokem byla konstrukce dosedací části, dále pak těla sacího hrdla, připojovací části a nakonec otvoru pro průchod palivové směsi. Při konstrukci bylo využíváno funkce šablonování. K porovnání rozměrů zkonstruované součásti a zapůjčeného originálního dílu byla použita technologie 3D skenování.

Třetí část práce je zaměřena na vlastní výrobu součásti pomocí čtyřech různých 3D technologií. Výtisky byly vyrobeny metodou Fused Deposition Modeling, metodou Stereolitografie, metodou PolyJet Matrix a metodou Selective Laser Melting.

Čtvrtá část se zabývá porovnáním vytištěných 3D modelů. Výtisky byly porovnávány z hlediska přesnosti rozměrů a jakosti. Měřena byla rozměrová přesnost vnějšího a vnitřního průměru připojovací části, průměru otvoru pro šroub a rozteče otvorů pro šrouby. Byla měřena drsnost povrchu jednotlivých modelů, orientačně byla porovnána i jejich hmotnost. Dále pak byl srovnáván čas tisku a v neposlední řadě i cena výtisků.

Závěrem můžeme říci, že z hlediska rozměrové přesnosti bylo nejlepších výsledků dosaženo metodou Selective Laser Melting. Nejkvalitnější povrch měl model vyrobený metodou Stereolitografie. Na výrobu časově nejnáročnějším a také nejdražším modelem byl model vyrobený metodou Selective Laser Melting, jehož velkou výhodou je ale použitelnost v reálném provozu, neboť odpovídá finálnímu výrobku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.

[2] SEDLÁK, Josef. *Aditivní technologie – metody Rapid Prototyping* [online]. Brno: UST, 2017 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf

[3] PK MODEL, *Technologie 3D tisku* [online]. Praha, ČR, 2006 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://www.3dsystems.com/our-story

[4] JOSEF PRŮŠA, *O 3D Tisku* [online]. Praha, ČR [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://josefprusa.cz/o-3d-tisku/

[5] CONRAD, *Historie 3D tisku* [online]. Praha, ČR [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://www.conrad.cz/3d-novinky-co-je-to-3d-tisk-predstaveni-3d-tiskarny-k8200.t81

[6] 3D SYSTEMS, *Our story* [online]. USA, 2018 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://www.3dsystems.com/our-story

[7] PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. *ZÁKLADY 3D TISKU* [online]. Praha, ČR, 2014 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf

[8] 3D FACTORY, *Historie 3D tisku* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://3dfactory.cz/2017/10/27/historie/

[9] WIKIPEDIA, *RepRap project* [online]. USA, 2018 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/RepRap_project

[10] HAPTIC, *Additive manufacturing lets aerospace and defense companies do more with less* [online]. ROMANIA, 2017 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://www.haptic.ro/additive-manufacturing-lets-aerospace-defense-companies-less/

[11] DE ZEEN, *Cortex 3D-printed cast* [online]. London, UK, 2013 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://www.dezeen.com/2013/06/28/cortex-3d-printed-cast-for-bone-fractures-jake-evill/

[12] 3D TISK, *Fused Deposition Modeling* [online]. Brno, ČR, 2013 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://www.3d-tisk.cz/fused-deposition-modeling/

[13] INVENTOR BLOG, *FDM technologie* [online]. Zlín, ČR, 2016 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://www.inventor3dblog.cz/fdm-technologie/

[14] ŚWIAT DRUKU 3D, *Fused Deposition Modeling* [online]. PL, 2013 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://swiatdruku3d.pl/fdm-fused-deposition-modeling/

[15] FUTUR3D, *Materiály pro 3D tisk* [online]. Praha, ČR [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://www.futur3d.net/materialy-pro-3d-tisk

[16] CUSTOM PART NET, *Laminated Object Manufacturing* [online]. USA, 2008 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing

[17] *Konstruktér*. Brno: Vydavatelství Nová média, 2014- . ISSN 1805-8590.

[18] ENGATECH*: The Difference Between FDM And Polyjet Technology In 3D Printing* [online]. USA [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://engatech.com/difference-fdm-polyjet-3d-printing/

[19] *Seznam náhradních součástí pro motocykl ČZ 125c, 150c.* Strakonice: Česká Zbrojovka. 1951.

[20] *Svět motorů*. Praha: Dobrovolný svaz lidového motorismu, 1953. ISSN 1213-8991.

[21] ZEISS, *Kompakter 3D sensor* [online]. DE [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://optotechnik.zeiss.com/produkte/3d-digitalisierung/comet-l3d

[22] VOŠALÍK, Jan a Dušan ŠEBEK. *Katalog motocyklů ČZ: 1930-1997*. Praha: F&Š VC, 2014. ISBN 978-80-260-6769-6.

[23] MARČÍK, Libor. *Naše motocykly*. Jinočany: Libor Marčík, 2005. ISBN 80-239-5268-4

[24] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem.* Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.

[25] 3D TISK, *Stereolitografie* [online]. Brno, ČR, 2013 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://optotechnik.zeiss.com/produkte/3d-digitalisierung/comet-l3d

[26] CUSTOM PART NET, *Stereolithography* [online]. USA, 2008 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography

[27] CUSTOM PART NET, *Selective Laser Sintering* [online]. USA, 2008 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering

[28] CUSTOM PART NET, *Direct Metal Laser Sintering* [online]. USA, 2008 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering

[29] ANDROID TIP, *PRUSA I3 MK2* [online]. ČR, 2016 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://www.androidtip.cz/prusa-i3-mk2-ceska-3d-tiskarna-svetovych-parametru/

[30] 3D SYSTEMS, *PROJET 6000 HD* [online]. USA, 2018 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://www.3dsystems.com/3d-printers/projet-6000-hd

[31] STRATASYS, *CONNEX3 OBJET500 AND OBJET350* [online]. USA, 2018 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://www.3dsystems.com/3d-printers/projet-6000-hd

[32] SLM SOLUTIONS*: SLM 280* [online]. GE [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://slm-solutions.com/products/machines/selective-laser-melting-machine-slmr280-20

[33] RP ELECTRONICS, *Surface Roughness Tester* [online]. Canada, 2017 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://www.rpelectronics.com/tr100-surface-roughness-tester.html

[34] 3D TISK, *Selective laser sintering* [online]. Brno, ČR, 2013 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: https://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/

[35] KONSTRUKTER, *Direct Metal Laser Sintering* [online]. Brno, ČR, 2014 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: https://www.konstrukter.cz/2015/03/09/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/

[36] KATEDRA VÝROBNÍCH SYSTÉMŮ, *Technologie Rapid Prototyping Polyjet Matrix* [online]. Liberec, ČR, 2011 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/objet-connex500

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

3D	trojrozměrný
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
CAD	Computer Aided Drafting
ČZ	Česká Zbrojovka
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
LOM	Laminated Object Manufacturing
PC	Polykarbonát
PET	Polyethylentereftalát
PJM	PolyJet Matrix
PLA	Polylactid acid
SLA, SL	Stereolitografie
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
TPU	Thermoplastic polyurethane
UV	ultrafialový

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Model tělesa s mezi plášťovým chlazením vyrobený pomocí 3D tisku od firmy 3D Systems.	11
1.2	První 3D výtisk, který vytvořil Charles Hull v roce 1984 pomocí Stereolithographie [6].	11
1.3	Dr. Adrian Bowyer a Vik Oliver s první replikovanou tiskárnou [7,9].	12
1.4	Ortéza vyrobená přesně na míru za použití aditivních technologií [11].	13
1.5	Konzoly křídel vyrobené pomocí technologie 3D tisku u letadel Airbus [10].	14
1.6	Nanášení jednotlivých vrstev materiálu pomocí technologie FDM [13].	15
1.7	Princip metody FDM [14].	16
1.8	Princip metody LOM [16].	17
1.9	Princip metody SLA [26].	19
1.10	Princip metody PJM [18].	20
1.11	Princip technologie SLS [27].	21
1.12	Princip metody DMLS [28].	22
2.1	Motocykl ČZ 125 C, rok výroby 1952.	23
2.2	Schématické znázornění jednošoupátkového karburátoru [20].	24
2.3	Zobrazení jednotlivých dílů motoru [19].	25
2.4	Pohled na motor ČZ 125 C bez víka a karburátoru.	26
2.5	Pohled do karburátorového prostoru na vstupní otvor palivové směsi do motoru.	26
2.6	Náčrt dosedací části sacího hrdla.	27
2.7	Dosedací část sacího hrdla.	27
2.8	Konstrukce těla sacího hrdla pomocí funkce šablonování.	28
2.9	Dosedací část a tělo sacího hrdla.	28
2.10	Konstrukce připojovací části.	29
2.11	Sací hrdlo s připojovací částí a zaoblením požadovaných hran.	29
2.12	Konstrukce otvoru pro průchod palivové směsi pomocí funkce šablonování.	30
2.13	Výrobek ve finální podobě připravený k výrobě.	30
2.14	3D skener COMET LƎD [21].	31
2.15	Detailní 3D sken zapůjčeného dílu.	32
2.16	Porovnání 3D skenu a zkonstruovaného modelu.	32

3.1	Příprava modelu v programu Simplify3D.	33
3.2	Tiskárna Original Prusa 3D i3 MK2 [7].	34
3.3	Výroba modelu na tiskárně Original Prusa i3 MK2.	34
3.4	Tiskárna ProJet 6000 HD [30].	35
3.5	Součást v tiskárně bezprostředně po skončení tisku.	35
3.6	Chemicky omytý model.	36
3.7	UV komora PROJET.	36
3.8	Příprava modelu v programu Objet studio.	37
3.9	Tiskárna Objet 500 Connex3 [31].	37
3.10	Umístění modelu v tiskárně.	38
3.11	Model před finálními úpravami.	38
3.12	Nástroje pro úpravu součásti.	39
3.13	Výrobek při chemickém čištění.	39
3.14	Tiskárna SLM280 [32].	40
3.15	Vytištěný model přiložený na tiskové podložce.	40
4.1	Upnutí mikrometru ve stojánku při měření průměru připojovací části.	41
4.2	Znázornění jednotlivých měření vnější připojovací částí.	42
4.3	Upnutí součásti ve stojánku a vnitřní mikrometr.	43
4.4	Znázornění jednotlivých měření vnitřní připojovací části.	43
4.5	Upnutí součásti ve stojánku.	44
4.6	Znázornění jednotlivých měření otvoru pro šroub.	45
4.7	Modely a použité digitální měřidlo pro měření rozteče otvorů pro šrouby.	46
4.8	Znázornění měření rozteče.	46
4.9	Drsnoměr TR100 Surface Roughness Tester [33].	47
4.10	Struktura modelu vytvořená FDM tiskem.	48
4.11	Vytištění model „sacího hrdla“ nasazený na motocyklu (FDM).	50
4.12	Vytištěný model „sacího hrdla“ s nasazeným karburátorem.	50
4.13	Motocykl ČZ 125 C po nasazení víka motoru.	51

SEZNAM TABULEK

1.1	Přehled technologií 3D tisku [1,2,3].	15
4.1	Naměřené a průměrné hodnoty vnější připojovací části.	42
4.2	Naměřené a průměrné hodnoty vnitřní připojovací části.	44
4.3	Naměřené a průměrné hodnoty otvoru pro šrouby.	45
4.4	Naměřené a průměrné hodnoty rozteče otvorů pro šrouby.	46
4.5	Naměřené hodnoty drsnosti Ra.	47
4.6	Naměřené hodnoty drsnosti Rz.	47
4.7	Hmotnost modelů.	48
4.8	Časy tisku.	49
4.9	Cena tisku.	49