



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# SESTAVENÍ A OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI DOMÁCÍ 3D TISKÁRNY

ASSEMBLING AND FUNCTIONAL VERIFICATION OF A HOME 3D PRINTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Jaroslav TESAŘ

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Josef SEDLÁK, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/14

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jaroslav Tesař

který/která studuje v magisterském studijním programu

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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:

### **Sestavení a ověření funkčnosti domácí 3D tiskárny**

v anglickém jazyce:

### **Assembling and Functional Verification of a Home 3D Printer**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Popis aditivní technologie Rapid Prototyping
3. Možnosti využití aditivních technologií v praxi
4. Experimentální část
5. Technicko-ekonomické zhodnocení
6. Závěr

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce bude sestavení a ověření funkčnosti domácí 3D tiskárny. Tiskárna bude vymodelována pomocí parametrického programu SolidWorks a poté sestavena ze zakoupených či vytisknutých dílů. Součástí práce budou návrhy a nastavení jednotlivých parametrů 3D tisku tak, aby tisk odpovídal kladeným a reálným požadavkům na výrobu funkčních modelů. V práci bude proveden návrh technických úprav 3D tiskárny pro dosažení kvalitnějšího tisku. Domácí tiskárna bude rovněž porovnána s profesionální tiskárnou uPrint, která pracuje na stejném principu a se stejným vstupním materiálem (ABS a ABSplus plast). Práce bude ukončena technicko-ekonomickým zhodnocením včetně doporučení a použitelnosti domácí 3D tiskárny v praxi.

Seznam odborné literatury:

1. PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1. vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-214-4025.
2. GEBHARDT, A. Rapid Prototyping. Munich: Hanser Publishers, 2003. ISBN 3-446-21259-0.
3. SLOTA, J., MANTIČ, M., GAJDOŠ, I. Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve. Košice: Edícia študijnej literatúry, 2010. ISBN 978-80-553-0548-6.
4. PÍŠA, Z., KEJDA, P., 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.
5. SEDLÁK, J., PÍŠA, Z. Rapid Prototyping master modelu pomocí CAD/CAM systému. In Mezinárodní vědecká konference 2005. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 07.09.2005-09.09.2005. 30 s. ISBN: 80-248-0895-1.
6. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society): Rapid Prototyping of Materials. The Minerals, Metals & Materials Society. 2002. pp. 615. ISBN 0873395301.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 21.11.2013



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

**ABSTRAKT**

Práce byla vypracována jako diplomový projekt na FSI VUT v Brně. V teoretické části práce byla představena aditivní technologie Rapid Prototyping a její nejrozšířenější metody. Dále byly posouzeny výhody a nevýhody této nové technologie a možnosti využití v nejrůznějších oborech lidské činnosti. V experimentální části práce byla sestavena domácí 3D tiskárna a poté provedeno nastavení parametrů tisku. Následně byly vytisknuty porovnávací modely na domácí 3D tiskárně a na profesionální tiskárně Dimension  $\mu$ Print. Po vytisknutí bylo provedeno srovnání přesnosti obou 3D tiskáren. Na konci práce bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení.

**Klíčová slova**

Reverzní Inženýrství, Rapid Prototyping, Fused Deposition Modeling, 3D tisk, Domácí 3D tiskárna.

**ABSTRACT**

This thesis was created as a bachelor project in the Faculty of Mechanical Engineering at VUT in Brno. In the theoretical part, the additive technology Rapid Prototyping is introduced together with the most common methods, followed by the assessment of advantages and disadvantages of the new technology and its possible uses in various fields of human activity. In the experimental part of the diploma thesis was assembled and the printing parameters were set. Consequently the comparison models were printed on the 3D home printer and on professional printer Dimension  $\mu$ Print. The accuracy of the printers is compared. The thesis concludes with the analysis of technical and economical parameters.

**Keywords**

Reverse Engineering, Rapid Prototyping, Fused Deposition Modeling, 3D printing, 3D Home Printer.

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

TESAŘ, Jaroslav. *Sestavení a ověření funkčnosti domácí 3D tiskárny*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 78 s. 6 příloh. Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

### **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Sestavení a ověření funkčnosti domácí 3D tiskárny** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
Bc. Jaroslav Tesař

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Velké poděkování patří zejména mým rodičům za umožnění studia na vysoké škole a podporu během studia.

## OBSAH

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ.....	7
1. Popis aditivní technologie rapid prototyping.....	11
1.1 Historie a vývoj technologie RP .....	12
1.2 Princip technologie RP .....	13
1.3 Srovnání technologií a výhody zavádění technologie RP .....	14
1.4 Možnosti získání dat pro technologii RP .....	16
1.4.1 Využití CAD systémů.....	17
1.4.2 Využití technologie Reverse Engineering .....	18
1.5 Dostupné metody Rapid Prototyping.....	25
1.5.1 Fused Deposition Modeling FDM.....	26
2. Možnosti využití aditivních technologií v praxi .....	28
2.1 Využití aditivní technologie v průmyslu .....	28
2.1.1 Využití aditivní technologie v automobilovém průmyslu .....	29
2.1.2 Využití aditivní technologie v leteckém průmyslu.....	29
2.1.3 Využití aditivní technologie k výrobě funkčních součástí .....	30
2.2 Využití aditivní technologie ve stavebnictví .....	31
2.3 Využití aditivní technologie ve vesmíru.....	33
2.4. Využití aditivní technologie v potravinářství .....	34
2.5 Využití aditivní technologie v architektuře .....	35
2.6 Využití aditivních technologií ve zdravotnictví .....	36
3. Experimentální část.....	38
3.1 Představení domácí 3D tiskárny .....	38
3.2 Tvorba digitálního modelu domácí 3D tiskárny .....	39
3.3 Sestavení domácí 3D tiskárny .....	40
3.3.1 Použitý materiál .....	40
3.3.2 Kompletace domácí 3D tiskárny .....	45
3.3 Nastavení parametrů tisku domácí 3D tiskárny .....	46
3.4 Zkušební tisk prototypu .....	52
3.5 Porovnání dosažených vlastností tisku .....	55
3.5.1 Tisk součástí na profesionální 3D tiskárně Dimension $\mu$ Print. ....	55
3.5.2 Tisk součástí domácí 3D tiskárnou.....	59
3.5.3 Měření a vyhodnocení srovnávacích dílů .....	60

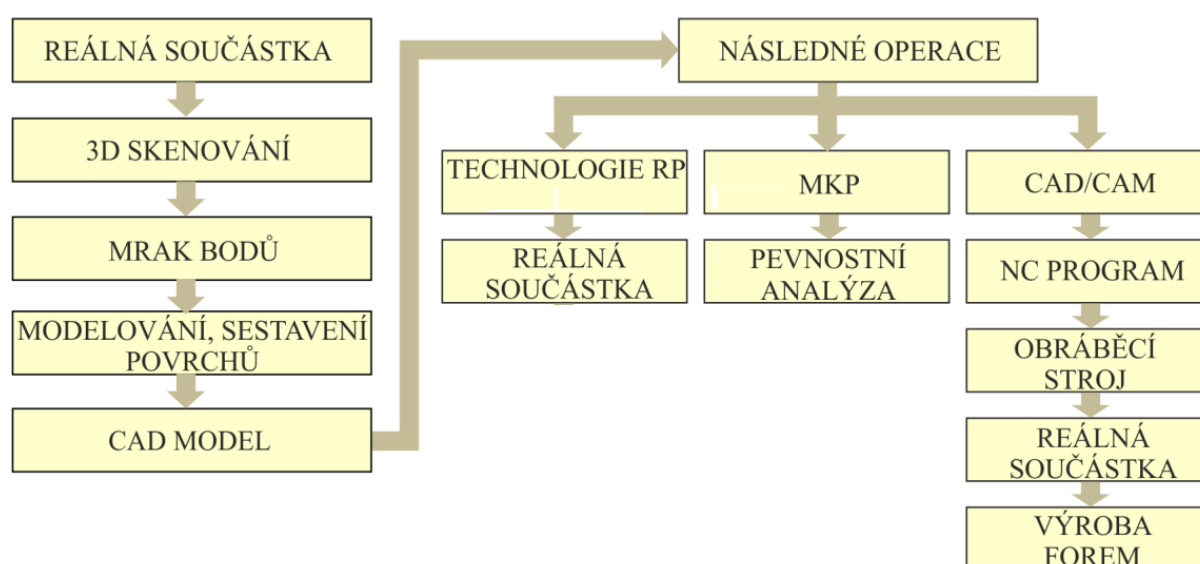
3.6 Návrh tisku dutých modelů.....	62
3.7 Návrhy na konstrukční úpravu tiskárny.....	63
4. Technicko-ekonomické zhodnocení .....	64
4.1 Materiálové náklady .....	64
4.2 Srovnání ceny tisku.....	65
4.3 Návratnost 3D tiskárny .....	66
4.3 Využití domácí 3D tiskárny.....	69
5. Diskuse.....	71
5.1 Sestavení a seřízení domácí 3D tiskárny. ....	71
5.2 Zhodnocení výsledků tisku .....	71
5.3 Zhodnocení úprav a využití domácí 3D tiskárny.....	71
6. Závěr .....	72
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	73
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	76
SEZNAM PŘÍLOH.....	78

## ÚVOD

Vývoj nových technologií zaznamenal v posledních letech či desetiletích obrovský vzestup. Lidé začali využívat stále nové materiály a nové metody na jejich opracování. Vznikly tedy nové nástroje, které jsou schopny pracovat v těžkých podmínkách a velice efektivně obrábět materiál. Technologie obrábění zejména díky číslicově řízeným CNC obráběcím strojům umožňuje obrobít nejrůznější tvarové součásti. Opačnou cestou se začala ubírat aditivní technologie *Rapid Prototyping*. Součást vzniká postupným přidáváním materiálu a nikoliv jeho odebráním. Výroba prototypu tímto postupem umožňuje tvorbu součástí jakékoliv tvarové složitosti, ale také dílů s kanálky či duté prototypy. V mnoha případech by si s takto náročnými součástmi konvenční technologie neporadili, nebo by cena výroby byla nepřiměřeně vysoká. V těchto případech je na místě použít aditivní technologii pro tvorbu součástí. Tato nová technologie výroby dílů poskytuje řadu výhod, ale i nevýhod. Nicméně velice rychle vyplnila místo na trhu v tvorbě zejména prototypových součástí a nejen jich. Aditivní technologie umožnila splnit vysoké nároky na rychlost výroby, dostatečnou přesnost a také širokou škálu použitelných materiálů, jako je kov, plast či vosk. Jedním z hlavních požadavků dnešní doby je design, který pracuje se stále složitějšími tvary součástí a tím klade vysoké nároky na výrobu, se kterou ovšem technologie *Rapid Prototyping* nemá větší problém. Důležité je také propojení aditivní technologie s ostatními moderními technologiemi jako je *Reverse Engineering* nebo 3D modelování v CAD systémech, které jsou využívány zejména k návrhům a úpravám modelů. Jako navazující technologii lze uvést výrobu např. silikonových forem. S aditivní technologií pracuje mnoho zařízení, zejména však 3D tiskárny. Jde o zařízení, která jsou schopna vytvořit přidáváním materiálu reálnou součást. 3D tiskárny pracují na mnoha principech, jako např. použití laseru k tavení kovu nebo UV světla k vytvrzení pryskyřice. Nejrozšířenější metodou výroby je tavení plastu, který je nanášen na vznikající součást. Jedná se o jednoduchou metodu a snadno použitelnou pro tvorbu prototypu. 3D tiskárny zažily v posledních několika letech obrovský vzestup, který umožnil jejich rozšíření a rozvoj. Ceny profesionálních tiskáren jsou však stále poměrně vysoké a proto se začalo rozvíjet odvětví domácích 3D tiskáren pro běžnou potřebu. Aditivní technologie i domácí 3D tiskárna byly v práci popsány, přičemž byla ověřena možnost sestavení a funkčnost domácí 3D tiskárny. Následně byly provedeny srovnávací testy a popsány možnosti tisku. Náklady, možnosti využití a případná návratnost byly uvedeny v technicko-ekonomickém zhodnocení.

## 1. POPIS ADITIVNÍ TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

Technologie *Rapid Prototyping* (RP) je moderní a rychle se rozvíjející technologií dnešní doby. Tato technologie je využívána zejména při tvorbě prototypových modelů či součástí, na kterých se ověřuje funkčnost, výrobitelnost nebo umístění v jednotlivých sestavách. Jako další možné využití těchto prototypů lze uvést jejich měření, kontrola rozměrů nebo odchylek od skutečných součástí, či je lze využít jako pouhou vizualizaci jak produktů, tak i komerčně využívaných objektů, jako např. budovy či mosty. Technologie RP zaznamenala obrovský vzestup díky konkurenci na trhu, kdy se firmy snaží přijít co nejdříve s hotovým výrobkem. Tomuto předchází zejména vývoj výrobku, testování, měření, různé zkoušky či analýzy. Všechny tyto operace je nutné zvládnout v co nejkratším čase. Mezi hlavní výhody technologie RP lze zařadit rychlost tvorby součástí, která je podstatně vyšší než při tvorbě součástí běžnými konvenčními technologiemi. Běžně využívané technologie vyžadují zdlohouvavou přípravu a mnohdy i velice nákladná zařízení nebo nástroje. Hlavním důvodem náročnosti výroby součástí běžnými technologiemi je např. výroba zápusťky u kování nebo vstřikovací formy pro výrobu plastů. U obrábění je nutné vytvoření CNC programu pro obrobení dílu počítačově řízeným CNC strojem. Přesnost vyrobených součástí obráběním je několikanásobně vyšší než u technologií RP, ale doba výroby a výrobní náklady jsou u aditivních technologií podstatně nižší, což je mnohdy hlavní požadavek kladený na prototyp. Technologie RP je provázána s řadou dalších navazujících technologií. Nejvíce využívané jsou *Hard Tooling* a *Soft Tooling*, kterými je vytvářena ve většině případů vstřikovací forma. Další cesty mohou vést k ověření funkčnosti či vizualizaci dílu nebo také k posouzení estetičnosti tvaru součástí. Cest pro získání virtuálního 3D modelu je několik. Jako první způsob získání dat lze uvést využití technologie *Reverse Engineering* (RE), kdy je tvar modelu získán pomocí 3D skenerů. Postup RE a následné využití dat je zobrazeno na **obr. 1.1**. Další možnost je vytvořit požadovaný model v běžném 3D modelářském programu [1, 2, 3, 7,].



Obr. 1.1 Proces vzniku reálné součásti [34].

## 1.1 Historie a vývoj technologie RP

Historie a vývoj technologie RP jsou pevně spjaty s vývojem elektroniky, zejména pak počítačů. Dostupnost počítačů se v posledních letech výrazně změnila a umožnila vývoj nejrůznějších průmyslových aplikací, jako jsou CAD/CAM systémy nebo CNC řídicí systémy. Technologie RP je s těmito systémy spjata a bez jejich vývoje a pokroku by nebylo možné dosáhnout dnešní úrovně. V **tab. 1.1** je prezentován vývoj technologií, které vedly k prvnímu systému technologie RP [3].

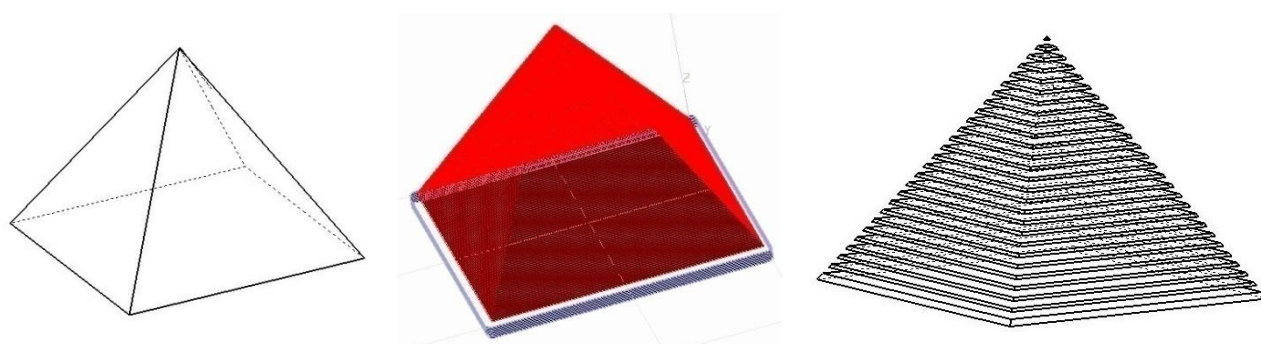
Tab. 1.1 Vývoj technologií [3].

Rok vzniku	Technologie
1770	Mechanizace
1946	První počítač
1952	První NC stroj
1960	První komerčně dostupný laser
1961	První komerční robot
1963	První interaktivní grafický systém (CAD)
1988	První komerčně dostupný RP systém

Historie technologie RP lze vysledovat až do konce šedesátých let minulého století. V těchto letech se profesor Herbert Voelcker zajímal o možnost řízení výrobních strojů pomocí počítačů a možnostech jejich programování. Profesor Voelcker se snažil najít způsob zejména automatizace výrobních strojů v továrnách, což posléze vedlo k výraznému zvýšení produktivity výroby. V sedmdesátých letech se profesoru Voelckerovi podařilo vyvinout několik základních matematických nástrojů. Tyto nástroje vyústily k teorii prvních algoritmů a matematických teorií, které umožnily modelování těles pomocí počítače. Stejně algoritmy dnes tvoří základ moderních počítačových programů. Za pomoci těchto programů je dnes umožněno modelování nejrůznějších mechanických či nemechanických modelů libovolné tvarové složitosti a velikosti. Nicméně v osmdesátých letech, konkrétně roku 1987, představil Carl Deckard revoluční myšlenku, která spočívala v tvorbě modelu vrstvu po vrstvě. Tato myšlenka je dnes základem výroby prototypů pomocí technologie RP. První metoda tvorby modelu spočívala ve využití laserového světla ke spékání prášku, který byl nanášen na model po vrstvách. Výsledky nové technologie byly slibné a technologie RP se začala výrazně rozvíjet. Vývoj této nové technologie dal impuls k jejímu zdokonalení a modifikacím, což posléze vedlo ke vzniku nového odvětví tvorby prototypů. V následujících letech prožila technologie RP obrovský vzestup. Patent na výrobu 3D objektů pomocí metody RP získal Charles Hull, který je dnes uznáván jako otec technologie RP. Nicméně trvalo dalších několik let, než tato technologie mohla být plně využita pro výrobu prototypů a funkčních součástí, jak je známe dnes [3, 8, 9, 14].

## 1.2 Princip technologie RP

Technologie RP pracuje na principu nanášení materiálu po vrstvách na vznikající díl. K tvorbě prototypu je nutný 3D CAD model požadované součásti. Tento model příslušný software elektronicky rozřeže na jednotlivé vrstvy o definované výšce. Tvar součásti je tedy určen přímo těmito vrstvami modelu. Jednotlivé vrstvy a veškeré nezbytné informace o jejich tvaru, tloušťce a poloze jsou přeneseny do prototypového zařízení, které tyto informace vyhodnotí a následně díky nim automaticky řídí samotnou tvorbu modelu. Vrstvy modelu musejí mít konstantní tloušťku, aby bylo možné rovnoměrně a přesně vytvořit součást. Prototyp tedy vzniká aditivní metodou, která spočívá v postupném přidávání materiálu, ze kterého je postupně vytvořen požadovaný prototyp viz **obr 1.2**. Proces nanášení materiálu a samotná tvorba dílu je plně automatizovaná, což umožňuje tvorbu součásti zcela bez lidského zásahu. Tato skutečnost přináší nejen vysokou efektivitu, ale i přesnost výroby prototypu. Samotné vytváření prototypu je umožněno pomocí mnoha metod technologie RP. Technologie RP představuje technologii opačnou od běžných metod rozšířených ve strojírenství, jako je např. obrábění. Metody, u kterých je materiál naopak odebírán se nazývají subtraktivní. Na začátku procesu je polotovaz, který má vždy větší rozměr než hotový výrobek. Výsledný tvar výrobku pak vzniká odebíráním materiálu z polotovaru. Tento proces u technologie RP nefiguruje, což umožňuje dosáhnout zejména vyšší úspory materiálu. Materiály, se kterými technologie RP pracuje, jsou na bázi pryskyřic či vosků. Modely lze také vytvářet z termoplastů nebo dokonce z kovových prášků. Záleží především na požadavcích kladených na součást a hlavně použité metodě RP. Rychlost tvorby prototypu a široká škála použitých materiálů dělá z této nové technologie efektivní a stále častěji využívaný způsob tvorby jak prototypových modelů, tak i plně funkčních součástí [1, 2, 3, 5, 7].



Tvar vyrobené součásti.

Tvary jednotlivých vrstev  
vypočítané softwarem.

Proces tvorby součásti, schéma.

Obr. 1.2 Obecný princip technologie RP [7].

### 1.3 Srovnání technologií a výhody zavádění technologie RP

Prototypové součásti mohou být vytvořeny několika způsoby. Nejrozšířenější technologie, jako např. obrábění, tváření a odlévání jsou nyní nahrazovány mnohem modernějšími technologiemi, které vedou k urychlení tvorby součástí. Moderní společnosti a nejen ty, začaly postupně zavádět technologii RP, která nahrazuje staré konvenční metody tvorby prototypu. Tyto technologie již nejsou tak efektivní a mnohdy nesplňují požadavky kladené na prototyp. Vývoj 3D tiskáren byl v posledních letech natolik progresivní, že dnešní metody tvorby součástí jsou již na velmi vysoké úrovni. Moderní technologie mohou zcela jistě konkurovat běžným technologiím a do budoucna je i v některých oblastech zcela nahradit. Konvenční technologie, jako např. obrábění, mají své nesporné výhody, které technologie RP zatím postrádá [1, 2, 5, 7].

Výhody konvenční technologie obrábění:

- relativně nízké náklady na samotné zařízení,
- široká škála materiálů, které jsou totožné s budoucí výrobou,
- vyráběný prototyp má mechanické vlastnosti blízké budoucímu výrobku,
- zachování vláken v součásti,
- vysoká kvalita povrchu,
- cena materiálu,
- možnost výroby i velkých dílů [1, 2, 5, 7].

Výhody obrábění jsou nezanedbatelné a je nutno s nimi kalkulovat při rozhodování o tvorbě prototypové součásti. Nicméně technologie obrábění sebou nese několik nevýhod, které mohou být rozhodující při tvorbě součásti. Jedná se zejména o omezenou tvarovou složitost součásti, kterou je technologie obrábění schopna vytvořit. Tato nevýhoda je způsobena zejména nástrojem a jeho velikostí, přičemž se mnohdy není možné dostat do některých míst složitého prototypu a tím pádem tyto místa nelze obrobit. Velkou nevýhodou obrábění je také delší čas, který je nutný na samotnou výrobu prototypu. Proces obrábění se totiž skládá z několika operací, které je nutno provést. Jde zejména o vytvoření programu pro CNC stroj. Čas, který je nutný na tuto operaci, závisí zejména na zkušenostech pracovníka, který samotný program vytváří. Hlavním aspektem při tvorbě programu je pak velikost a tvarová složitost požadovaného prototypu. Vytvoření samotného programu může mnohdy trvat až několik hodin. Jakmile je program vytvořen, je nutné obstarat polotovary a následně probíhá samotné opracování a výroba prototypu. Obrábění součásti je ve srovnání s přípravou výroby mnohdy podstatně kratší. Ve většině případů jde o desítky minut či maximálně několik hodin. Další podstatnou nevýhodou obrábění je také pořízení nástrojů, kterými je díl obroben. Mnohdy je zapotřebí využít i několik nástrojů na výrobu jedné součásti. Pořizovací cena nástrojů bývá poměrně vysoká, záleží zejména na materiálu, tvarové složitosti a trvanlivosti. Nicméně jejich cenu je nutno také zahrnout do nákladů. Technologie obrábění je rovněž subtraktivní technologií, což znamená, že při jejím využití je materiál postupně odebírán z polotovaru. Při této výrobě vzniká velké množství odpadu, zejména ve formě třísek viz **obr. 1.3**. Tato skutečnost má vliv na celkové využití materiálu. Všechny tyto aspekty pak tvoří cenu součásti, která je mnohdy velmi vysoká [3, 4, 6, 7].



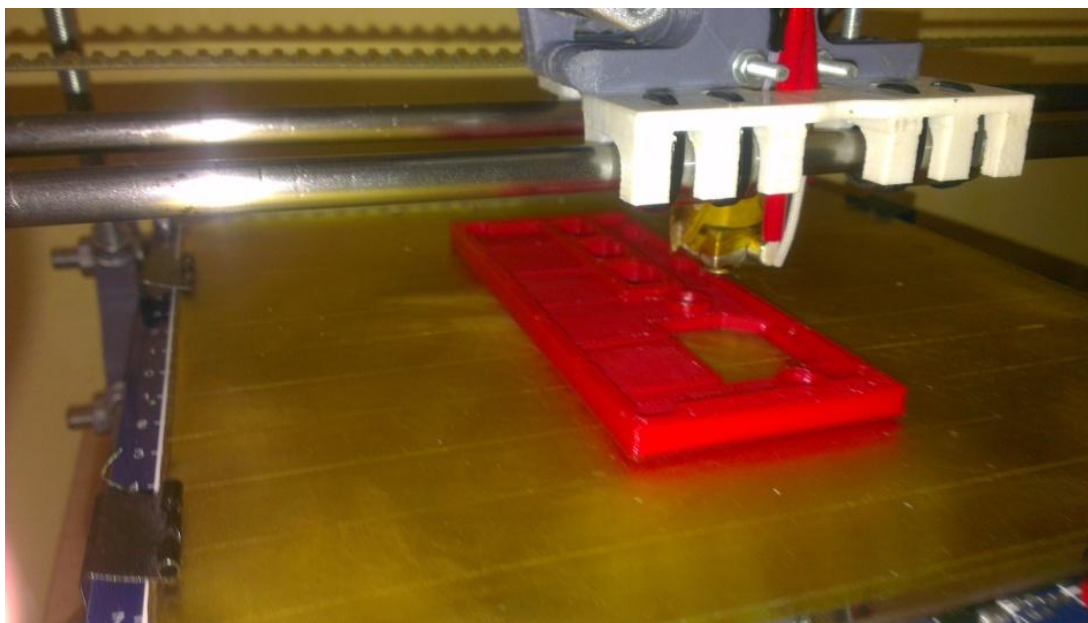
Obr. 1.3 Subtraktivní metoda výroby – obrábění [10].

Technologie RP má oproti obrábění výhodou v tom, že není omezena geometrií modelu a samotná příprava programu pro tvorbu prototypu zabere maximálně několik minut. Dnešní zařízení jsou plně automatická a 3D tiskárna může vyrobit funkční prototyp v poměrně krátkém čase. Prototypy takto vyrobené vyžadují minimum úprav, splňují pevnostní požadavky vyžadované zákazníky a mají i dostatečnou kvalitu povrchu. Takto vyrobená součást se blíží svou kvalitou i svými vlastnostmi finálnímu produktu. Největší výhodou aditivních technologií je tedy jejich rychlost tvorby prototypu, která je mnohdy otázkou pouze několika hodin. Tato výhoda rovněž zkracuje celý vývoj produktu. Prototyp lze rychle testovat, ověřovat vlastnosti a funkčnost, proměřovat či upravovat. Tímto se podstatně zrychlí vývoj součástí či zařízení, čímž je splněn hlavní požadavek kladený na tuto technologii. Aditivní technologie mají další obrovskou výhodu v tom, že není zapotřebí využívat drahých nástrojů při tvorbě součástí. Úspora v tomto směru je značná a je promítnuta i do následné ceny prototypu. Další nezanedbatelnou výhodou je, že technologie RP pracuje v podstatě bezodpadově. Využití materiálů je v tomto případě velmi vysoké, což vede k efektivnější tvorbě součástí [3, 5, 7].

Výhody aditivní technologie RP:

- libovolná geometrie součástí,
- vysoké procento využití materiálu,
- výrazné zkrácení času pro výrobu prototypu,
- není nutné zakoupení drahých nástrojů,
- poměrně velké množství využívaných materiálů,
- nízké náklady na výrobu prototypu [3, 7].

Aditivní technologie RP, která je znázorněna na **obr. 1.4** prošla za posledních 20 let obrovským vývojem, který vedl ke zdokonalení všech metod 3D tisku. Nicméně technologie RP má i několik základních nevýhod. Jednou z hlavních nevýhod jsou pořizovací náklady 3D tiskáren. Díky vývoji a růstu zájmu o toto odvětví výroby prototypových součástí se však staly 3D tiskárny poměrně rozšířenými a dostupnými. Dnes jsou již 3D tiskárny vyvíjeny a vyráběny mnoha firmami, které si navzájem konkurují, což vede k výraznému snížení pořizovací ceny tohoto zařízení. Další nevýhodou se mohou zdát vysoké náklady na materiál, se kterým zařízení pracuje. Tyto náklady jsou však částečně kompenzovány efektivitou 3D tiskárny a vysokým využitím materiálu, ze kterého je součást tvořena. Vytvořený model je často nutné následně upravit, aby odpovídal požadavkům zákazníka. U některých dílů je nezbytné manuální odstranění podpor, čištění součástí a dokončovací operace. Nejčastěji je vhodné u očištěného prototypu upravit jeho povrch či mechanicky opracovat funkční plochy. Tento proces se nazývá *postprocessing*. Úpravy součásti je nutné provádět s velkou opatrností, aby prototyp nebyl nijak poškozen či znehodnocen. *Postprocessing* se provádí dle požadavků kladených na prototyp a zejména dle metody RP, kterou byl model vytvořen. Jakmile je dokončena fáze *postprocessingu*, součást je plně připravena k použití [3, 7, 11].



Obr. 1.4 Aditivní metoda tvorby součásti.

#### 1.4 Možnosti získání dat pro technologii RP

Možností získání dat, respektive 3D digitálního modelu pro práci s technologií RP je několik. Všechny metody však využívají moderní technologie a jsou podporovány počítačovými systémy. Výsledkem je vždy 3D digitální model, který musí nést určité vlastnosti a informace. Tento model je následně přenesen do systému 3D tiskárny. Díky správným datům je systém schopen digitální 3D model zpracovat a řídit stavbu samotného prototypu [3, 7].

### 1.4.1 Využití CAD systémů

Základním podkladem pro tvorbu prototypové součásti pomocí technologie RP je 3D digitální model součásti, která má být vytvořena. Technologie RP vyžaduje, aby byl model plně uzavřen. Digitální model tedy musí být ohraničen a uzavřen plochami, které na sebe plynule navazují. Objemový model poskytuje informace o celém objemu tělesa, na rozdíl od modelů plošných nebo drátových. Z těchto dat lze nadále získat o mnoho více informací jak o vnějším, tak vnitřním prostoru modelu. Nejrozšířenější a nejjednodušší metodou získání 3D modelů je využití CAD systémů. CAD systémy jsou nástroje nejčastěji používané v počátečních etapách procesu výroby. Jedná se zejména o konstrukci, vývoj a technologii výroby. Počítačové nástroje vyjadřují účelné a efektivní využití výpočetní techniky. Tyto nástroje podporují tvořivost pracovníka a umožňují mu rychle a efektivně řešit úlohy související s procesem výroby.

CAD systémy tvoří tři základní třídy:

- nízké,
- střední,
- vysoké.

Rozdělení CAD systémů do jednotlivých skupin je prováděno dle následujících kritérií:

- vybavenost kreslicími a modelovacími nástroji,
- pořizovací cena,
- podpora ze strany výrobce a dodavatele softwaru [3, 7, 12].

Systémy patřící do nižší třídy:

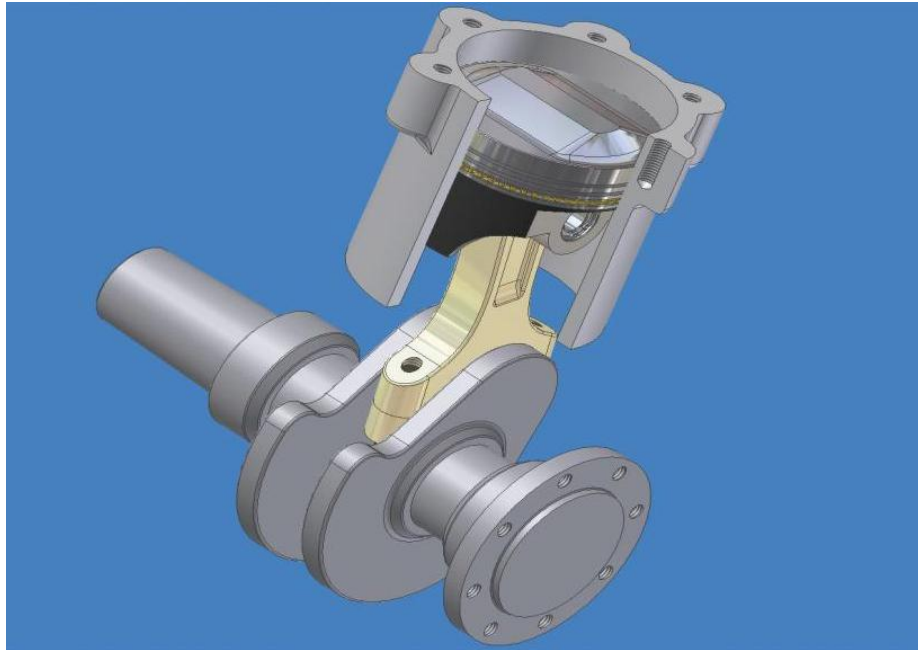
Skupina nižší třídy obsahuje základní konstruktérské systémy jako je AutoCAD LT, TurboCAD Delux a další. Jde o systémy podporující zejména tvorbu dvojrozměrných objektů. Lze je využít především k vytváření výkresové dokumentace. Trojrozměrné konstrukce lze vytvářet díky některým systémům pouze pomocí drátového modelu. Systémy jsou uživatelsky nenáročné a jejich hlavní výhodou je jejich dostupnost. K využití v technologii RP jsou však nevhodné, protože tato technologie vyžaduje plnohodnotný 3D model.

Systémy patřící do střední třídy:

Do této skupiny jsou zařazeny systémy jako AutoCAD, Microstation, TurboCAD Professional a další. Výhodou všech těchto systémů je, že obsahují nástroje, kterými je umožněno 3D modelování. Těmito programy lze vytvářet především výkresovou dokumentaci výrobků, přičemž efektivita je daleko vyšší než u systémů nižší třídy. Využití tyto systémy nacházejí také v marketingu, kde jsou použity trojrozměrné modely k vizualizacím výrobků či jednotlivých sestav. Další výhodou je jednoduchá modifikace výrobku, což je umožněno díky otevřené architektuře modelu.

Systémy patřící do vysoké třídy:

Všechny tyto systémy jsou trojrozměrné, což znamená, že mohou pracovat s trojrozměrným modelem. Z tohoto modelu je možno následně vytvořit výkresovou dokumentaci či zkompletovat sestavu viz **obr. 1.5**. Výhodou CAD systémů je jejich plná parametrizace a asociace. V praxi to znamená, že model je provázaný s výkresem a ve většině případů i sestavou. Změny provedené na modelu se tedy následně projeví na výkrese a také v sestavě. Nejvýznamnějšími zástupci systémů vysoké třídy jsou CATIA, NX, Inventor, SolidWorks a Pro/Engineer [3, 7, 12].



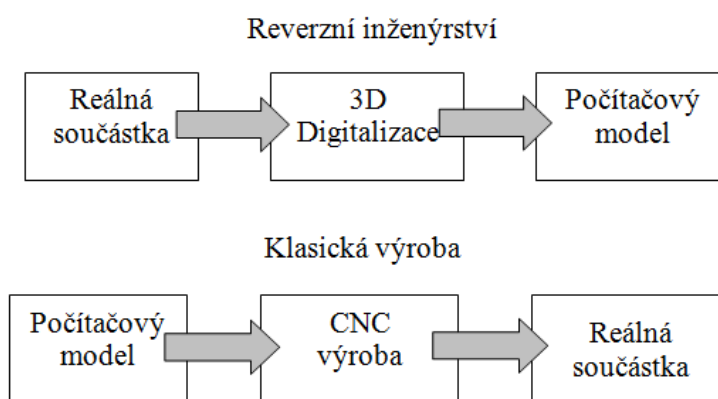
Obr. 1.5 3D Sestava vytvořená v programu Autodesk Inventor [12].

Množství datových formátů, které lze generovat CAD systémy je poměrně široké. Praxe je taková, že každý výrobce systému má vlastní formát dat. Tyto formáty však zabraňují výměně dat mezi uživateli systémů od různých výrobců. Řešení lze nalézt v dohodě firem o použití stejného formátu dat. Ukládání dat lze provést v jednom systému do formátu dat systému jiného. Další možností je využití standardizovaných formátů dat (STEP, IGES, STL, apod.). Tyto formáty umožňují otevřít datový model v různých systémech, avšak nejsou schopny přenést vnitřní strukturu modelu, jako jsou fyzikální vlastnosti nebo parametry. Při práci s technologií RP jsou však tyto univerzální formáty plně dostačující a běžně využitelné v technické praxi [3, 12].

#### 1.4.2 Využití technologie Reverse Engineering

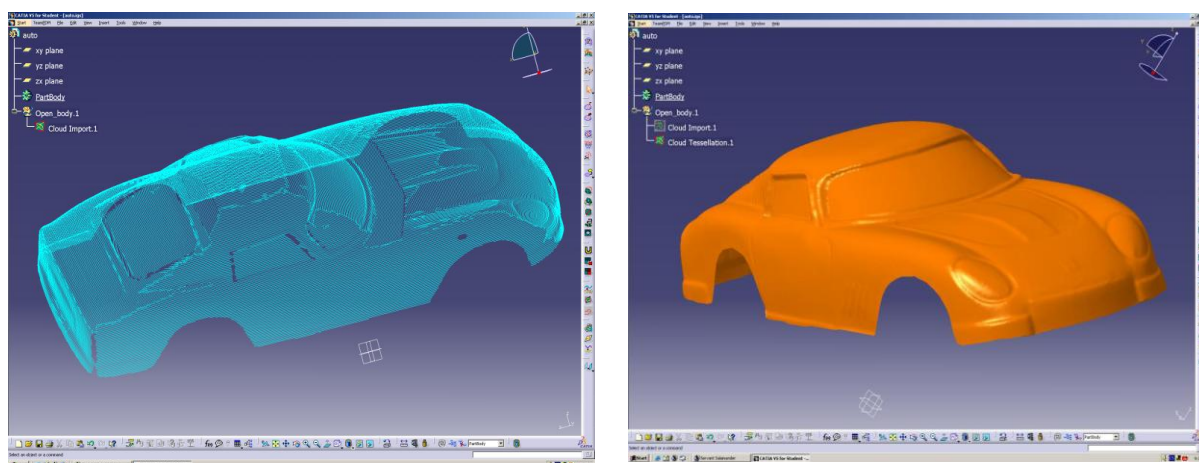
*Reverse Engineering* je metoda získávání 3D digitálních modelů ze stávajících součástí. Technologie RE je využívána pro digitalizaci většinou tvarově složitých součástí, nebo např. u dílů, kde došlo ke ztrátě technické dokumentace a je nutné zachytit jejich přesný tvar a rozměry. Tato metoda nahrazuje vytváření modelů v 3D modelářských systémech. Jde zejména o nahrazení této metody v případech, kdy není možné přesně odměřit model díky

jeho rozměrům či tvarové složitosti. Vytváření 3D modelů takto náročných tvarů by bylo velice zdlouhavé a nepřesné. V těchto situacích proniká do praxe stále častěji technologie RE. V posledních letech se stala technologie RE stále více dostupnou a oblíbenou metodou získávání 3D dat z již existujícího dílu. Využití si technologie RE našla v mnoha technických oborech jako strojírenství či stavebnictví, ale také v mnoha jiných veřejných oborech jako např. archeologie či architektura. Získání dat 3D modelu probíhá opačným sledem operací, než u klasické výroby viz **Obr. 1.6**. Běžně rozšířenou praxí je nejdříve získat digitální 3D model, který je vytvořen v počítačovém systému. Tento model slouží jako podklad k výrobě součástí běžnými technologiemi. Technologie RE pracuje s opačným postupem, kdy na počátku procesu je skutečná součást, která je převedena na virtuální 3D model. Takto získaný digitální 3D model je nadále využíván k nejrůznějším účelům, jako např. použití v technologii RP [5, 7, 13].



Obr. 1.6 Proces získání dat 3D modelu a proces výroby [7].

Digitalizace modelu probíhá na principu snímání jednotlivých bodů na digitalizovaném objektu. Body takto získané tvoří celek nazývaný jako „mrak bodů“ viz **obr. 1.7**. Tento „mrak bodů“ je nutno následně upravit pomocí speciálních systémů na plošný nebo objemový model. Úprava dat je náročná a závisí na zručnosti a zkušenosti obsluhy, zejména pak na kvalitě získaných dat. Všechny tyto aspekty ostatně ovlivňují i vlastnosti a přesnost získaného 3D modelu. Mezi další faktory patří zejména velikost digitalizovaného objektu, tvarová složitost a použitá metoda digitalizace. Pro práci s naskenovanými daty je využíváno mnoha speciálních programů. Jako vstupní informace do systému jsou použita data ve formátu STL. Tento formát tvoří jednotlivé entity (body). Z těchto entit je možné nadefinovat křivky, ze kterých lze následně vytvořit plochu. Z takto vytvořených ploch vzniká finální model naskenované součásti. Upravený model je možno následně vyexportovat ve výstupních formátech jako např. IGES, STEP, nebo STL. S modelem lze poté zacházet jako by byl vytvořen v běžném 3D modelářském systému. Využití může digitální model poté nacházet jako podklad pro vytvoření výkresové dokumentace nebo jej můžeme vložit do sestavy výrobku. Dále lze digitální model použít k získání CNC programu a následně výrobě shodných součástí technologií obrábění. Nevýhodou takto získaného modelu je však absence historie vzniku, což komplikuje následnou úpravu tvaru modelu [5, 7, 13].



Obr. 1.7 Vlevo jsou znázorněna data získaná 3D skenováním, vpravo vyhlazený finální model [7].

Digitalizaci dat je možno rozdělit do dvou následujících skupin:

- 2D digitalizace,
- 3D digitalizace.

#### 2D digitalizace

Výstup z 2D digitalizace může být ve formě fotografií digitalizovaných součástí či může sloužit jako technická dokumentace. Využití těchto výstupů je možno spatřit v doplnění chybějících informací o dílu či mohou také sloužit pouze jako vizualizace součástí. Data mohou být dále využita k tvorbě animací a k prezentačním účelům. Pomocí speciálních softwarů lze z 2D digitalizovaných dat získat 3D model. Jde o metodu podobnou převádění fotografie z 2D do 3D prostoru. Tato metoda je však velice náročná a nevhodná [3, 7].

#### 3D digitalizace

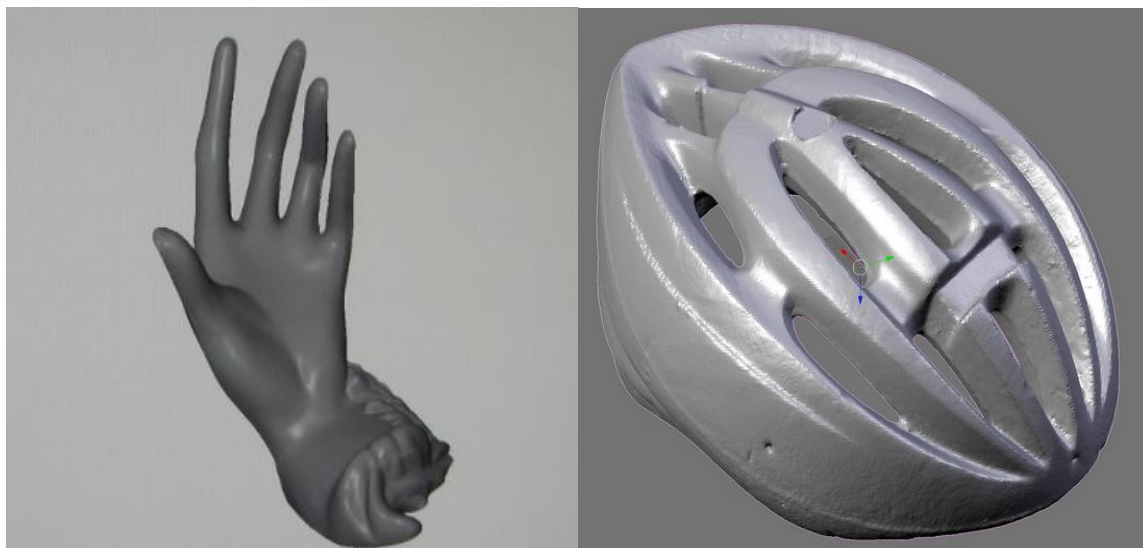
Převod skutečné součásti do 3D digitální podoby se nazývá 3D digitalizace. V praxi je tato metoda známá spíše pod pojmem 3D skenování. Zařízení, kterými je 3D digitalizace prováděna se nazývají 3D skenery nebo 3D měřicí zařízení. Výstupní počítačový model může být v následujících podobách:

- mrak bodů,
- mrak bodů – řezy v požadovaných místech,
- 3D křivky v požadovaných místech,
- polygonový model,
- plošný model – *Rapid Surfaces* (Rychlé povrchy),
- plošný model – *Technical Surface* (Technické povrchy),
- plošný model – *High-Quality Surface* (Vysoce kvalitní povrchy) [3, 7].

Plošné modely se od sebe liší díky několika parametrům:

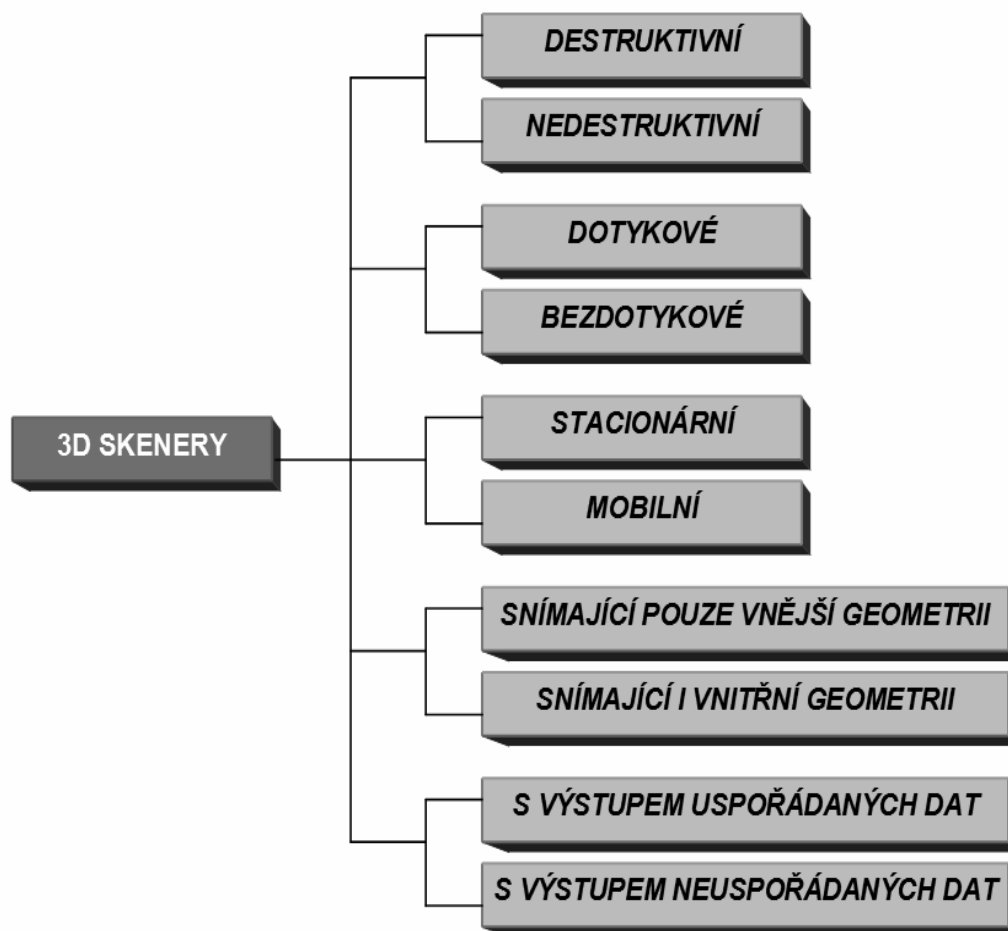
- přesnost,
- hladkost,
- napojení ploch [3, 7].

Nejvíce požadované a využívané v praxi jsou polygonové a plošné modely. Plošné modely jsou nejčastěji požadovány v kvalitě *Technical Surfaces*. Tato kvalita zabezpečuje tangenciální napojení a odchylka se pohybuje kolem 0,15 mm. Jednotlivé výstupy jsou také různě časově náročné. U „mraku bodů“ je časová náročnost minimální, protože tato data poskytuje rovnou skenovací zařízení. U plošného modelu s *High Quality Surfaces* je časová náročnost úpravy dat několikanásobně větší. Výstup 3D digitalizace je tedy ve většině případů prostorový 3D model viz **obr. 1.8**. Tento model lze využít v dalších navazujících procesech jako např. technologii RP, posouzení designu, měření rozměrů či vkládání do sestav. Úpravu modelu komplikuje skutečnost, že jde o „mrtvý model“, což znamená, že model je bez historie vzniku. Úprava takto vytvořeného modelu je pak velice náročná. Vyžaduje speciální systémy a značnou odbornost pracovníka [3, 7].



Obr. 1.8 Digitální modely ve formátu STL po úpravě dat [7, 15].

Hlavním nástrojem technologie RE jsou 3D skenery. Rozdělení skenerů jako na **obr. 1.9**, lze provést dle několika kritérií, mezi které patří zejména vztah ke skenované součásti. Tento vztah udává zejména míru poškození součásti během skenování. Dalším významným kritériem je přesnost 3D skeneru. Přesnost závisí zejména na technologii, se kterou 3D skener pracuje. Významný vliv na přesnost má také velikost a tvarová složitost dílu a neméně podstatná je i zkušenost a zručnost obsluhy. Obsluha 3D skeneru ovlivňuje kvalitu dat, zejména pak zvolenou strategií skenování, což je podstatný aspekt především u tvarových a rozměrných předmětů. 3D skenery se liší ještě v několika dalších aspektech, jako je barevné snímání či snímání pohyblivých předmětů. Důležitá je také vhodná volba 3D skeneru pro jednotlivé účely a oblasti skenování. Všechny tyto vlastnosti mají vliv na výslednou kvalitu dat, ale také hlavně na cenu 3D skenerů. Pořizovací cena 3D skenerů závisí zejména na požadavcích, které musí zařízení splňovat. Nejmodernější skenery se tedy mohou vyšplhat až na cenu několika milionů korun [7].



Obr. 1.9 Rozdělení 3D skenerů [7].

### Destruktivní 3D skenery

Destruktivní skenery jsou využívány zejména u modelů se složitou vnitřní strukturou. Tento typ 3D skenerů umožňuje tedy zachytit i vnitřní geometrii objektu, jako jsou kanálky či vnitřní dutiny, které jsou těžko zachytitelné jinými druhy 3D skenerů. Nevýhodou destruktivních 3D skenerů je, že při procesu skenování je díl nevratně poškozen. Metoda je založena na postupném odfrézování malých vrstev materiálu. Tyto vrstvy se pohybují v desetinách či dokonce v setinách milimetru. Záleží však na velikosti modelu a zejména na požadované přesnosti. Čím menší je ořezovaná vrstva, tím je model přesnější. Na opracovaném modelu následně vzniká kontura, která je snímána optickým skenerem. Vytvořené snímky tvoří jednotlivé hladiny modelu, které příslušný software převede na konečný 3D model. Destruktivní 3D skenery dosahují přesnosti až několika setin milimetru. Skenování součásti však trvá několik hodin, záleží zejména na velikosti součásti, velikosti hladin a rozlišení.

### Nedestruktivní 3D skenery

V praxi je však požadováno co nejmenší poškození skenované součásti. V těchto situacích se tedy používají skenery nedestruktivní, viz **obr. 1.10**. Tyto skenery umožňují snímat povrch bez jakéhokoliv poškození.

Skenování povrchu probíhá:

- dotykově (kontaktně),
- bezdotykově (nekontaktně) [7, 15].

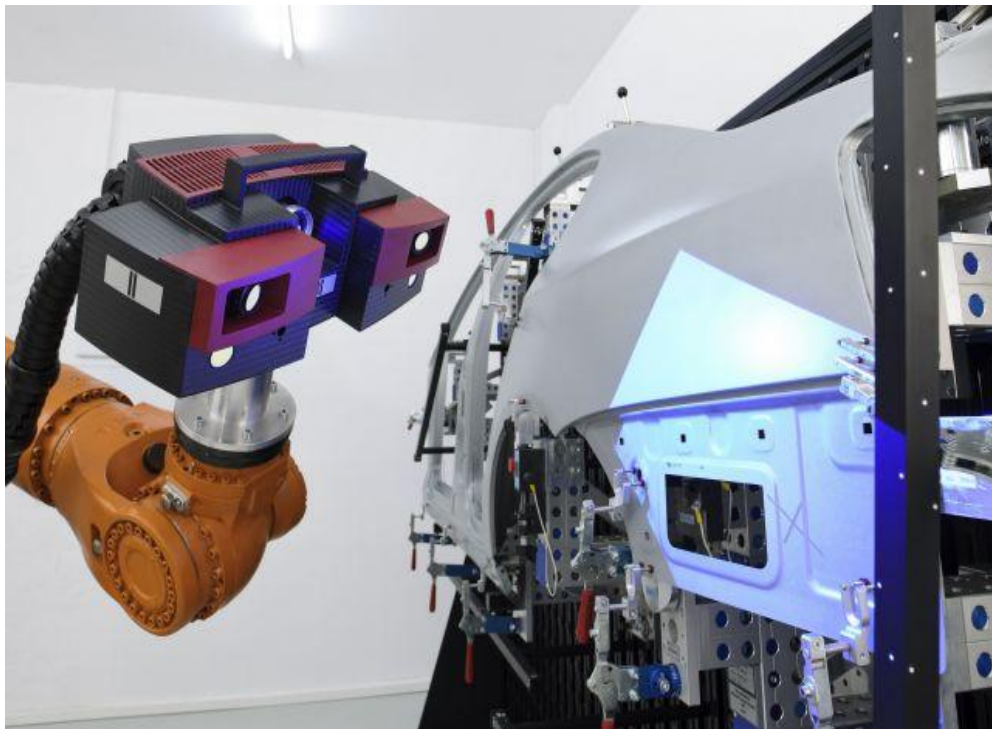


Obr. 1.10 Sloupový dvouramenný měřicí 3D skener Dimension [7].

Snímání prostorových bodů na povrchu součásti probíhá za pomoci dotykových 3D skenerů. Tyto zařízení jsou vybaveny většinou pohyblivým ramenem, na jehož konci je sonda. Jakmile se sonda dotkne povrchu součásti, zaznamená jeho polohu do počítače. Tímto způsobem je možno získat neomezené množství bodů na povrchu součásti a následnou úpravou získaných dat i celý model skenovaného tělesa. U dotykových 3D skenerů je příprava skenování jednou z nejdůležitějších částí procesu. Na tělese musí být vytvořena síť bodů, které budeme dotykovým 3D skenerem snímat. Zaznamenání dostatečného počtu bodů je značně pomalé a náročné vůči ostatním typům 3D skenerů, tudíž je často využíváno CNC pohyblivých ramen či automatických CNC řízených systémů, které tento proces značně urychlují [3, 7, 15].

### Optické 3D skenery

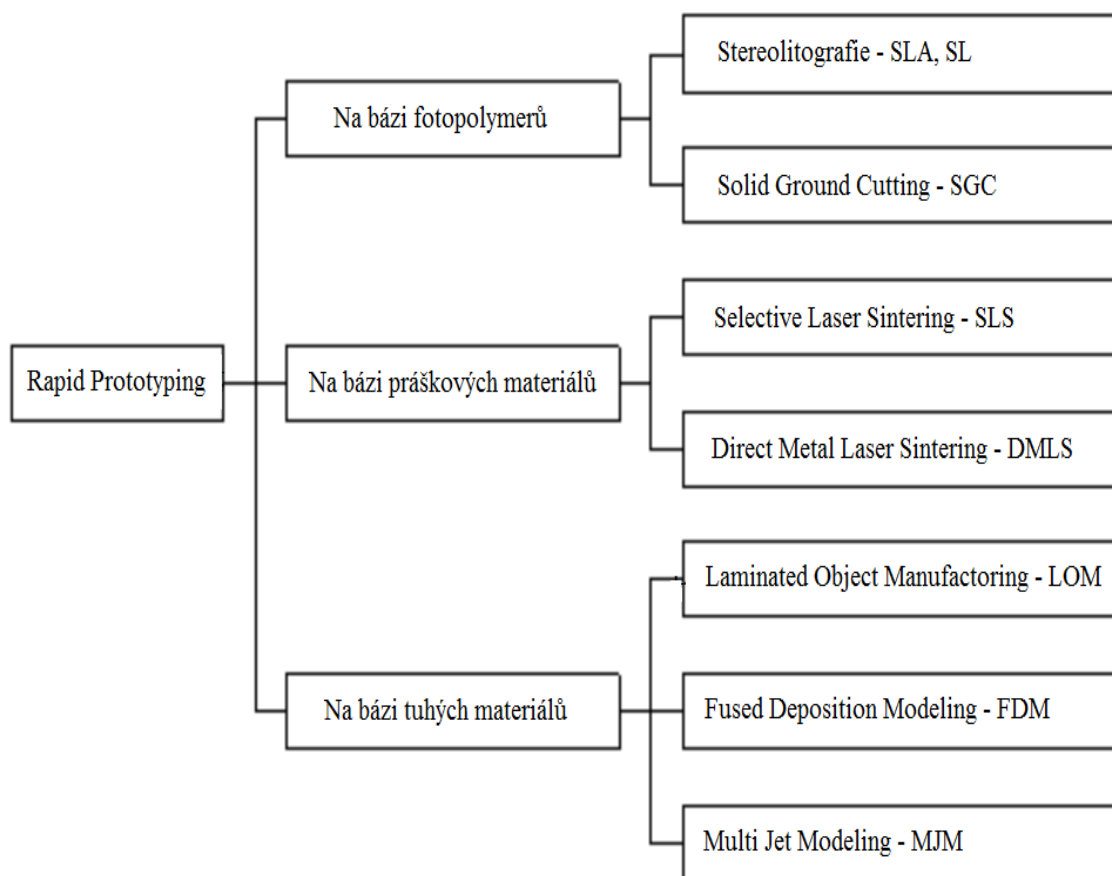
Optické 3D skenery snímají povrch součásti bezdotykovou metodou. Během tohoto snímání není skener a skenovaný model v přímém kontaktu, což zabraňuje poškození zejména skenovaného povrchu. Princip funkce optického 3D skeneru je snímání tělesa pomocí optického zařízení. Těleso je takto nasnímáno z několika úhlů pohledu tak, aby byl co možná nejlépe zachycen celý povrch dílu. Jakmile je provedeno získání potřebných dat, jsou tyto data následně odeslána do počítače, kde probíhá digitalizace. Optické 3D skenery mohou být jak pohyblivé, tak stacionární. Pro větší efektivitu snímání lze využít i pohyblivých ramen jako např. na **obr. 1.11**. Tímto způsobem dosáhneme jak vyšší rychlosti snímání, tak i kvality dat. Před samotným skenováním je nutno provést také přípravu součásti, která spočívá v nalepení měřicích bodů na povrch tělesa. Tyto body pak umožňují lepší sestavení snímků. V případě, že jde o čirý nebo lesklý model, je nutno nanést na povrch tenkou vrstvu prášku, aby docházelo k lepšímu odrazu světla. Optické skenery jsou využívány zejména k zachycení složitých tvarových ploch. Mezi hlavní výhody patří mobilita zařízení, které je možné libovolně přenášet. Další výhodou je rozsah skenování. Optickými skenery lze snímat jak předměty o velikosti několika milimetrů, tak i objekty o velikosti několika metrů, jako letadla, auta, sochy či budovy [3, 7, 16].



Obr. 1.11 Automatizované skenování s optickým 3D skenerem ATOS [16].

### 1.5 Dostupné metody Rapid Prototyping

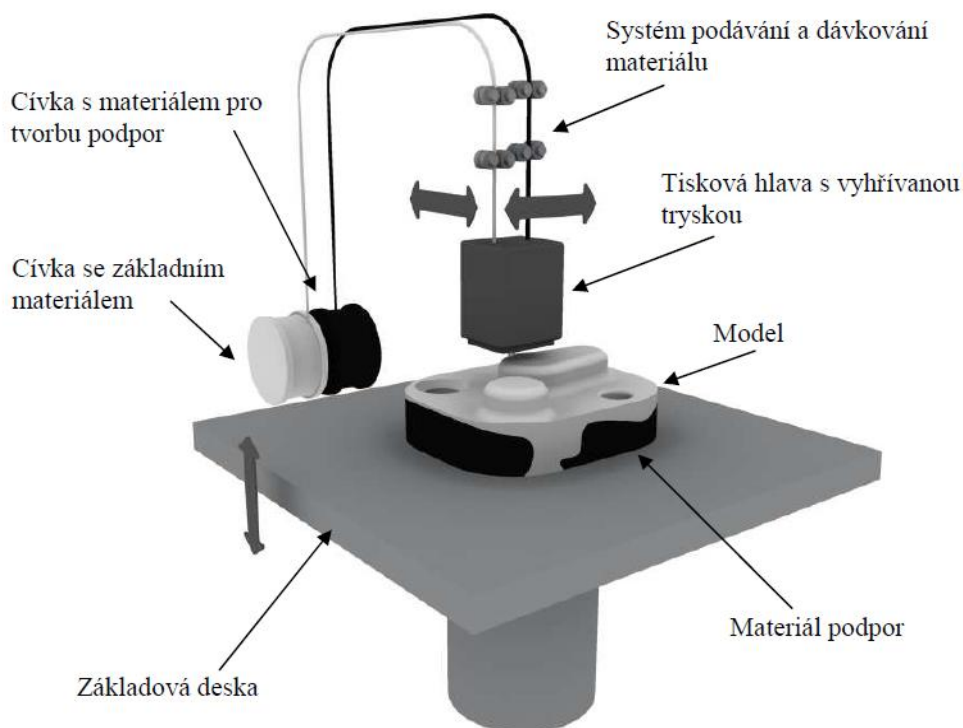
Veškeré metody aditivní technologie RP vytváří požadovaný díl stejným postupem, který je založen na nanášení vrstev materiálu na vznikající model. Metody se dělí zejména podle procesu přidávání materiálu. Natavení materiálu je umožněno díky energii laseru nebo elektricky vyhřívané tiskové hlavě. Další princip je založen na využití UV světla, které umožní vytvrzení pryskyřice. Dělení metod technologie RP lze provést také dle materiálů, se kterými tyto metody pracují. Škála materiálů, které technologie RP využívá je velmi široká. Jedná se především o plasty, kovy či pryskyřice. Technologie RP pracuje ale také s méně typickými materiály jako je např. keramika. Nejvyužívanější metody technologie RP a jejich rozdělení dle principu funkce a využitých materiálů k tvorbě dílů jsou zobrazeny na **obr. 1.12** [3, 7, 16].



Obr. 1.12 Rozdělení hlavních metod Rapid Prototyping [7].

### 1.5.1 Fused Deposition Modeling FDM

Jedná se o poměrně mladou, avšak v dnešní době již velmi často používanou metodu sloužící k výrobě prototypových součástí. Princip stavby dílu spočívá v postupném nanášení jednotlivých vrstev nataveného termoplastického materiálu, který je vytlačován pomocí kladek přes vyhřívanou trysku, jak je možné vidět na **obr. 1.13**. Natavený materiál tvrdne okamžitě po vytlačení a připojení na model. Po nanesení první vrstvy pracovní plocha klesne o výšku jedné vrstvy a celý proces se opakuje. Významný vliv na pevnost vyrobené součásti má orientace součásti na podložce. Technologie FDM využívá dva druhy materiálu. První materiál je stavební, použitý ke stavbě samotného prototypu. Druhý materiál je podpurný, který slouží k tvorbě podpor a zabraňuje případnému zborcení součásti. Podpurný materiál po vytvoření součásti lze odstranit mechanicky nebo rozpustit ve speciálním aktivním roztoku. Materiály používané k samotné stavbě modelu u metody FDM jsou vyrobeny především z termoplastu ABS nebo *ABSplus*. Mezi další používané materiály patří např. PC, PLA a další. Teplotní odolnost těchto materiálů je do 89 °C a jejich pevnost v tahu je od 22 do 72 MPa. U některých materiálů je nabízena široká škála barev. Součásti vyrobené metodou FDM viz **obr. 1.14**, mohou sloužit např. k ověření sestavení jednotlivých výrobků, k testování funkčnosti, k vizualizaci a prezentacím jednotlivých modelů nebo také k výrobě silikonových forem. Jako hlavní nedostatek těchto modelů lze uvést schodkový efekt. Schodkový efekt vzniká při postupném nanášení jednotlivých vrstev materiálu. Výška jednoho schodku je přitom rovna výšce vrstvy přidaného materiálu. Součást je tedy nutné dále povrchově upravit. Nejčastěji se k úpravě využívá tmelení, broušení, barvení, lakování nebo pokovování [2, 3, 7].



Obr. 1.13 Princip metody FDM [7].

**Výhody:**

- výroba funkčních prototypů z materiálů podobných běžně využívaných plastů,
- vysoké využití materiálu (odpad pouze podpory),
- snadné odstranění podpor v porovnání s ostatními technologiemi RP,
- velké množství použitých materiálů,
- nízké provozní náklady zařízení,
- nízkoteplotní proces,
- netoxická výroba,
- zařízení nevyžaduje náročnou údržbu,
- výroba je plně automatizována.

**Nevýhody:**

- nižší přesnost prototypu,
- dochází ke smršťování materiálu,
- čas výroby závisí především na velikosti prototypu,
- omezená pevnost především ve směru vrstev,
- pomalý proces výroby [2, 3, 7].

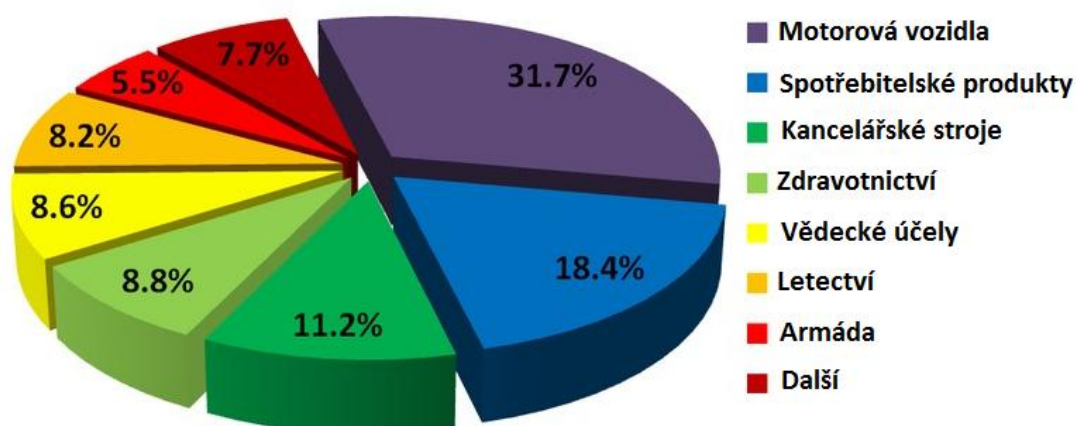


Obr. 1.14 Prototypové díly vyrobené technologií FDM [17].

Další metody technologie Rapid Prototyping jsou uvedeny v P1 až P6.

## 2. MOŽNOSTI VYUŽITÍ ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ V PRAXI

Aditivní technologie je dnes využívána v mnoha oborech lidské činnosti viz **obr. 2.1**. Za poslední desetiletí zažila obrovský rozmach díky vývoji elektroniky, zejména počítačové technologie. Tento vývoj jí dovolil zdokonalit se a splnit nejrůznější požadavky zákazníků. Poté, co se začala rozvíjet především ve strojírenství, rozšířila se tato nová moderní technologie do mnoha dalších oblastí. Neustálý vývoj a zejména použití mnoha nových materiálů, jejichž použití bylo ještě před pár lety nemyslitelné, dovolilo této technologii nahrazovat tradiční metody výroby. Jelikož jak firmy, tak i jiné organizace kladou velký důraz na vývoj a inovační technologie, které jsou pro rozvoj jejich činnosti podstatné, bude aditivní technologie zažívat i v budoucnu nejméně takový rozvoj, jaký zažívala do dnešní doby. Budoucnost aditivních technologií je dnes již nezpochybnitelná a za několik let se stane zcela jistě běžnou součástí mnoha oblastí lidské činnosti [3, 18].



Obr. 2.1 Oblasti využití aditivních technologií [18].

### 2.1 Využití aditivní technologie v průmyslu

Díly vytvořené aditivní technologií se začaly nejvíce uplatňovat v průmyslu. Rozvoj aditivní technologie v této oblasti je zdůvodněn nároky kladenými na prototypy. Zařazení aditivní technologie do procesu vývoje umožnilo značné zrychlení celého procesu a tím pádem i zvýšení efektivity a konkurenceschopnosti společností, které ji využívají. Součásti vytvořené touto technologií mohou sloužit zákazníkům např. k posouzení designu nebo mohou být vloženy do sestav. Takto může být ověřena jejich funkčnost a použitelnost. V průmyslu jsou často využívány prototypy k testům jak mechanických, tak i dynamických vlastností součástí. Modely vyrobené technologií RP však nejsou v průmyslu vhodné pro sériovou výrobu. Většinou jde pouze o jednotky kusů. Velikost modelu je plně závislá na velikosti základny daného zařízení a také na metodě aditivní technologie, kterou je díl vytvořen. V průmyslu je tato technologie používána k mnoha dalším účelům a funkcím, které jen potvrzují široké spektrum využití této technologie v praxi [19].

### 2.1.1 Využití aditivní technologie v automobilovém průmyslu

Největší využití aditivní technologie našla v oblasti automobilového průmyslu. Toto odvětví zaznamenalo v posledních několika letech či desetiletích stejně jako aditivní technologie obrovský vzestup. 3D modely jsou v automobilovém průmyslu používány v podstatě ve všech fázích procesu od návrhu konceptu automobilu či jeho komponent viz **obr 2.2**, až po realizaci výroby. Důsledek zařazení aditivní technologie do procesu umožní konstruktérům zrychlit a zlepšit proces vývoje. Konstruktéři a techničtí pracovníci jsou schopni provádět funkční zkoušky na prototypch a tím pádem je i zpětně upravovat a zdokonalovat. Automobilový průmysl používá aditivní technologii RP jako nedílný nástroj procesu navrhování již poměrně dlouhou dobu. Rychlé návrhové cykly v automobilovém průmyslu umožní i rychlou tvorbu funkčních prototypů, které mohou být bezprostředně otestovány. Výrobek lze poté daleko rychleji uvést na trh. Rychlost je podstatný faktor při vývoji zejména proto, že je požadováno předstížení konkurence vyvíjející podobné výrobky. Využití této technologie tedy přináší jak časové, tak i materiálové úspory, které se mohou projevit v ceně finálního produktu [20].



Obr. 2.2 Využití aditivní technologie v automobilovém průmyslu [20].

### 2.1.2 Využití aditivní technologie v leteckém průmyslu

Letecký průmysl je průmyslové odvětví, ve kterém je aditivní technologie RP hojně využívána. Produkty jsou používány zejména na zkrácení času od návrhu až po konstrukci samotné součásti. Jedná se zejména o kontrolu 3D modelu a posouzení jeho designu a funkčnosti v daném zařízení. Velice často je technologie RP používána pro tvorbu jak komponent, tak i zmenšenin celých letadel v daném měřítku jako na **obr. 2.3**. Následně lze provést testy ve větrném tunelu a posoudit odpor vzduchu jednotlivých komponent, nebo i celého letadla. Výsledky lze vyhodnotit a provést úpravy vedoucí ke zlepšení designu, či tvaru prototypu. Takto provedené zkoušky mají jako hlavní cíl vyhodnotit tvar navrhované součásti nebo i celého letadla. Správně provedené zkoušky a návrh optimálního tvaru zmenší kladený odpor vzduchu a tím lze snížit i náklady na palivo letadla. Tyto náklady bývají v letectví velmi vysoké, proto je nutné nalézt co nejlepší tvar součásti či letadla jako celku. Modely vytvářené k těmto účelům jsou ve většině případů plastové. Plasty poskytují dostatečnou tuhost pro prováděné testy a jsou i velice lehké, což je v leteckém průmyslu vyžadováno. Prototypové modely mají po vytvoření ovšem nízkou kvalitu povrchu. Modely se tedy musejí před uvedením do zkušebního provozu povrchově upravit. Nejčastěji prováděnými úpravami jsou broušení, leštění a následné lakování. Součásti vyrobené

technologie RP se nepoužívají v leteckém průmyslu výhradně k testování. Stále častěji tyto součásti nahrazují klasické díly, ze kterých je běžně letadlo složeno. Technologie RP umožňuje výrobu dutých objemových součástí. Jedná se především o díly, které se skládají ze skořepiny nebo dutého prostoru uvnitř součásti. Tento prostor je možno vyplnit mnoha malými žebry o velikosti několika milimetrů a zvolenou hustotou výplně. Takto vyrobená součást je velice pevná, ovšem má oproti ostatním součástem velice nízkou hmotnost, což je v leteckém průmyslu hlavní nárok kladený na součásti. Použitím takto vyrobených součástí lze snížit hmotnost celého letadla a tím pádem i náklady na jeho provoz. Výrobu součástí s těmito vlastnostmi není možné provést žádnou jinou technologií. Jako nevýhoda se může jevit stále ještě pomalá výroba těchto součástí. Urychlením a zefektivněním technologie RP by však mohlo být dosaženo i sériové výroby některých součástí, které budou letadla obsahovat [21].



Obr. 2.3 Vlevo odlehčená součást pro letecký průmysl, vpravo zmenšený model letadla [21, 22].

### 2.1.3 Využití aditivní technologie k výrobě funkčních součástí

Aditivní technologie RP umožňuje také tisk plně funkčních prototypů, jak je možno vidět na **obr. 2.4**. Tyto díly však vyžadují vysokou přesnost a zejména pevnost. Tisk je tedy prováděn pomocí kvalitních termoplastů, jako jsou např. ABS a PC. Lze také tisknout funkční prototypy z ocelových prášků či jiných materiálů, které aditivní technologie využívají. Tyto součásti musejí být odolné proti různým faktorům, kterým bude prototyp vystaven při jeho plném provozu. Nejčastěji jde o mechanické namáhání, nebo musí také poskytovat dostatečnou chemickou, ale i tepelnou odolnost. Rychlost vytváření takto vyrobených součástí však není vysoká. Efektivita tisku je zatím malá a cena některých typů materiálů je značná. Jako příklad lze uvést výrobu řídicí páky k ovládní pohybu stroje. Tato páka je poměrně tvarově komplikovaná a vyrobena z plastového materiálu. Výroba této součásti by vyžadovala vytvoření kovové vstřikovací formy, která slouží zejména pro velké série výroby a jejíž cena je vysoká. Využitím moderních technologií lze poměrně rychle získat digitální model díky použití 3D modelářského programu či využitím technologie RE. Následně může být prototyp vytvořen na 3D tiskárně z požadovaného materiálu. Čas vytvoření součásti tímto postupem a moderními technologiemi je velice krátký, pohybuje se v řádech hodin či maximálně několika dnů. V porovnání s klasickou metodou je tedy úspora zejména času a finančních prostředků značná. Uplatnění aditivní technologie nachází u součástí, jejichž výroba klasickými technologiemi by byla složitá a zákazníkovi by se nevyplatila. Jedná se zejména o kusovou výrobu nových prototypů či náhradu starých poškozených dílů [21].

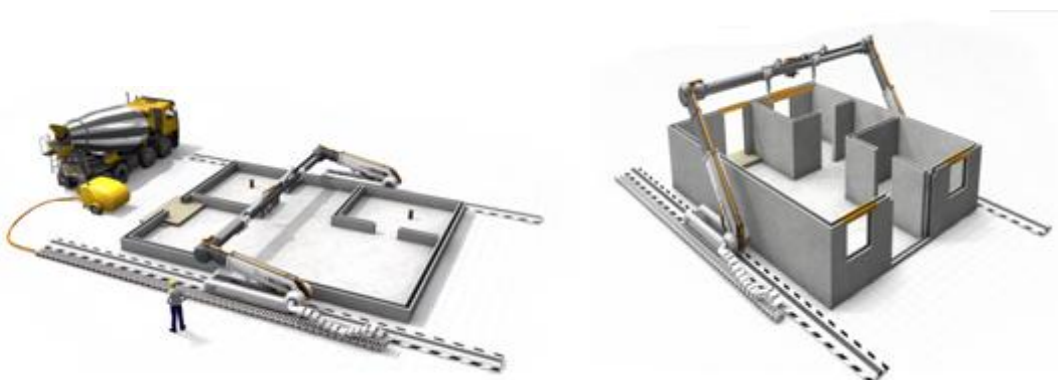


Obr. 2.4 Vyrobený funkčních prototyp [23].

## 2.2 Využití aditivní technologie ve stavebnictví

Aditivní technologie RP není využitelná výhradně ve strojírenském průmyslu. Uplatnění nachází i v mnoha jiných oborech. Tato technologie je technologií budoucnosti a není divu, že se s ní počítá také ve stavebnictví. Dnes žije na zeměkouli necelých 7 miliard obyvatel. Nárůst osob je každoročně kolem několik desítek milionů. Za 25 let nás bude tedy na této planetě skoro 9 miliard, což je obrovské číslo. Všem těmto lidem bude muset být umožněno bydlení v adekvátních podmínkách. Vzhledem k tomu, že stavba domu je velice zdlouhavá a pracná, zaměřují se stavební inženýři na využití moderní technologie 3D tisku. Tato snaha má umožnit maximální efektivitu výstavby domů a tím pokrýt poptávku, která bude vyvolána rostoucím počtem obyvatel. Vědci uvádějí, že touto technologií budou moci být tisknuty i vícepodlažní budovy. Výstavbu budov umožní zařízení, které se podobají obrovským 3D tiskárnám. V podstatě jde o 3D tisk v několikanásobném měřítku. Tato technologie získala ocenění od Národní síně slávy vynálezců a zájem o ni projevila i NASA. Pracnost výstavby domů je značná a většinou se jedná o převážně manuální práce. 3D tiskárna by měla nahradit klasické způsoby budování domů a zkrátit čas výstavby na méně než 24 hodin. Běžná výstavba rodinného domu se běžně pohybuje v řádech měsíců či let. Úspora času a zejména lidské práce je několikanásobná, což tuto metodu řadí mezi stavební technologie budoucnosti. Metoda pracuje na stejném principu jako tradiční 3D tiskárny. Dům je vytvářen odléváním materiálu po vrstvách. První jsou odlity spodní části domu, jako jsou základy a podlahy. Poté je dům stavěn do výšky, jak je možno spatřit na **obr. 2.5**. Jakmile je dům hotov, je dovybaven okny, topením a vnitřním zařízením. Po dokončení všech operací procesu je dům plně obyvatelný viz **obr. 2.6**. Stavební tiskárna pracuje na dvou kolejnicích umístěných na obou stranách domu. Velikost a výška domu je závislá pouze na konstrukci 3D tiskárny, která dům vytváří. Umístění 3D tiskárny na kolejnicích po stranách budov má obrovskou výhodu v tom, že je možno tisknout bloky domů či budov a to v podstatě najednou. Design, velikost a tvar domu je možno také měnit a to pouhou softwarovou změnou

řídícího systému. Další výhodou 3D tisku budov je možnost tisku v podstatě jakéhokoli tvaru stěn budovy. Je možno volit výplň jak celistvou, tak i dutou či vyplněnou žebrováním. Volba výplně stěn je závislá na požadavcích na pevnost domu, využití materiálu a také na izolačních vlastnostech domu, které je možno touto volbou ovlivnit. 3D tiskárna je schopna vytvořit do stěn dutiny na odpady či vodu a také automaticky tato místa vyplnit vhodným materiálem. Výroba domů je tedy plně automatická a je zapotřebí minimální lidské obsluhy. Využití této technologie může nacházet zejména v rozvojových zemích, kde je tlak na výstavbu nových domů největší. Další možné využití nalezne v oblastech postižených živelnou pohromou. Zde je možnost vytvořit mnoho mobilních domů ve velice krátkém čase a tím napomoci k obnově postižených oblastí. Tato technologie je však ještě na začátku vývoje, ale její výhody a možnosti jsou natolik podstatné, že nepochybně nalezne své využití nejen ve stavbě domů či budov [24].



Obr. 2.5 Průběh výstavby domu [24].



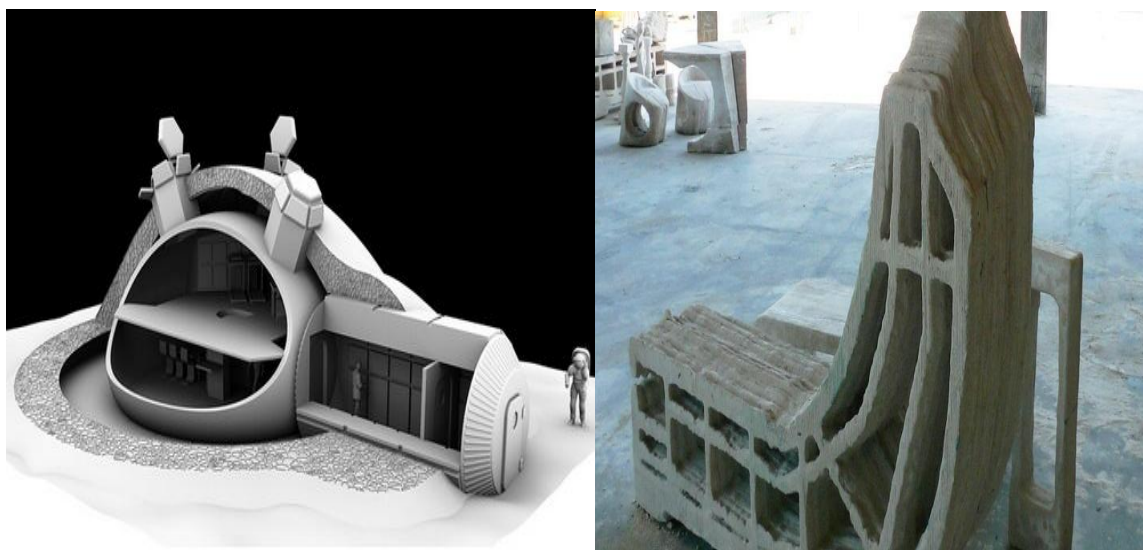
Obr. 2.6 Dům vytvořený pomocí aditivní technologie [24].

### 2.3 Využití aditivní technologie ve vesmíru

Vesmírný průmysl je obor, který využívá jen nejmodernější dostupné technologie současnosti. Není tedy divu, že i do tohoto oboru vstoupily moderní aditivní technologie a brzy zde našly své uplatnění. Kosmický průmysl však nezažívá tak obrovský vývoj jak tomu bylo dříve, ovšem plány na obnovení mnoha vesmírných programů jsou velké a aditivní technologie by k jejich realizaci měly přispět velkým dílem. Zhruba za 10 let má lidstvo v plánu vyslat na Mars první obyvatele a v budoucnu jej trvale osídlit. Dalším plánem je vybudování trvalé vesmírné základny přímo na Měsíci. Evropská vesmírná agentura a NASA proto spolupracují na vývoji zařízení, které by mělo za cíl vystavět na Měsíci lunární moduly, které by sloužily k trvalému osídlení lidmi, jak je možno spatřit na **obr. 2.7**. Jako hlavní úkol je tedy navrhnout a zrealizovat na Měsíci základnu, která bude splňovat následující požadavky:

- odolnost vůči meteoritům,
- ochrana před gama zářením,
- ochrana před vysokými teplotními výkyvy,
- dostatečný prostor pro posádku,
- využití materiálu přímo z Měsíce [25].

Základy budovy by měly být zhotoveny z trubkového profilu, který bude dopraven na Měsíc raketou. Ochranná skořepina bude vybudována pomocí robota, který bude fungovat na principu 3D tiskárny. Struktura stěn by měla být buněčná. Tato struktura bude velice odolná vůči vnějším vlivům panujícím na Měsíci. V rámci testování již proběhla výstavba kusu budovy o hmotnosti 1,5 tuny a také bylo provedeno testování funkčnosti 3D tiskárny ve vakuu. Projekt je zaměřen hlavně na využití materiálu dostupném na Měsíci, který se nazývá regolit, což je druh měsíční půdy. Realizace projektů je zatím poměrně vzdálená, je ale zřejmé, že s technologií 3D tisku se v budoucnu počítá i mimo naši planetu [25].



Obr. 2.7 Vlevo plánovaná základna na Měsíci, vpravo pokusný tisk stěny budovy [25].

Další možností využití aditivních technologií ve vesmíru je tisk samotných součástí přímo na vesmírné základně dle požadavků posádky. Při pobytu na vesmírné lodi nebo vesmírné stanici posádka pracuje s velkým množstvím součástek či nářadí. Jakmile dojde k poškození jakékoliv součásti nebo nářadí, nastává velký problém jak tuto situaci vyřešit. Vědci proto představili myšlenku, že by si astronauti mohli tisknout veškeré potřebné součásti či komponenty na speciální 3D tiskárně viz **obr. 2.8**. Hlavní výhodou je, že si může posádka vytisknout jakýkoliv tvarový model dle vlastní potřeby během několika hodin. Velká výhoda je, že lze vytvořit sestavy s pohyblivými částmi, jako jsou závity či ozubená kolečka. 3D tisk by měl umožnit astronautům vytisknout téměř vše, co bude v dané situaci zapotřebí. Vytvořené výrobky mají dostatečně vysokou kvalitu i tuhost, aby splnily většinu požadavků [26].



Obr. 2.8 Tisk nářadí pomocí aditivní technologie [27].

#### 2.4. Využití aditivní technologie v potravinářství

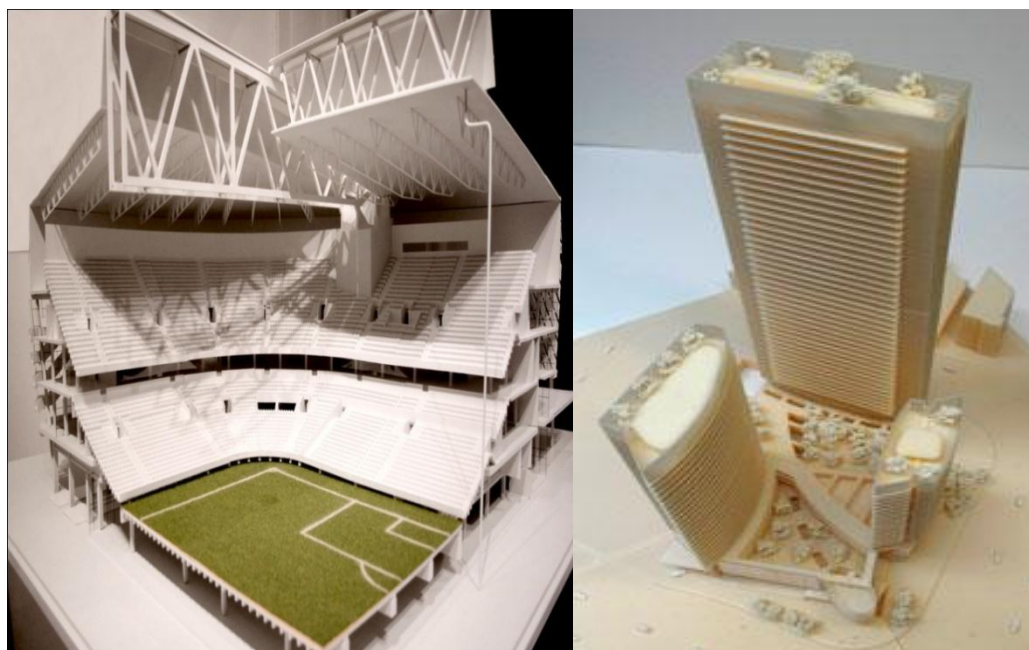
Další oblastí, do které aditivní technologie pronikla je oblast potravinářství. Rozšíření této technologie je zapříčiněno zejména širokou škálou různorodých materiálů, které je schopna využít. Podstata práce 3D tiskárny je podobná jako u ostatních aditivních technologií. Namísto roztaveného plastu či kovu jsou zde použity materiály z potravinářského průmyslu. Podobně jako u ostatních inovačních technologií se touto metodou jako první začala zabývat vesmírná agentura NASA. 3D tisk potravin by měl být v budoucnu využit pro výrobu potravin ve vesmíru, zejména pak při dlouhém trvání vesmírných misí. Jestliže lidé budou stále hlouběji pronikat do vesmíru, budou se muset zaměřit na zlepšení podpory života i mimo naši planetu. NASA má zájem rozvinout metody výroby potravin, které budou splňovat bezpečnost, rozmanitost a nutriční požadavky kladené na potraviny během dlouhých misí. Při průzkumu je kladen důraz na stabilitu živin v průběhu dlouhé mise. NASA se inovativními technologiemi zabývá dlouhodobě a získávání poznatků a schopností povede zcela jistě k úspěšné aplikaci této technologie do jejich vesmírných programů. Uplatnění našla aditivní technologie i v komerčním potravinářství. Mnoho firem se začalo možností tisku potravin zabývat a dnes přicházejí na trh s nejrůznějšími 3D potravinovými tiskárnami. Domácí potravinové 3D tiskárny jsou schopny pracovat s celou řadou materiálů jako cukry, krémy nebo např. těstoviny. Tvary potravin jsou v tomto případě neomezené a velice rozmanité, jak je možno vidět na **obr. 2.9**, což je jeden z důvodů, proč se 3D potravinové tiskárny stávají stále častěji populárnější u veřejnosti [28].



Obr. 2.9 Vlevo vytvořené různorodé tvary z cukru, vpravo z těstovin [29].

## 2.5 Využití aditivní technologie v architektuře

Aditivní technologie RP umožňuje výrobu předmětů s takřka neomezenými tvary. Schopnost rychle převést model z digitální podoby do podoby reálné, vedlo k tomu, že tato nová technologie se hojně začala využívat i v architektuře. Spojením umění, designu a moderní technologie je možno vytvářet předměty zajímavých tvarů. V architektuře se využívá 3D technologie RP především k tvorbě předmětů, které slouží k vizualizacím jednotlivých projektů či staveb, jako na **obr. 2.10**. Jedná se o několikanásobné zmenšeniny, které však díky technologii RP umožňují zobrazení i nejmenších detailů, které bude projekt obsahovat. Modely jsou vytvářeny především z plastu nebo vosku některou z metod RP. Velikost projektu je taktéž neomezená, lze vytvářet miniaturní stavby či postavičky v řádech několika milimetrů, ale také budovy, jejichž zmenšenina dosahuje výšky dospělého člověka. Při práci s takto velkými předměty není vytvářen model naráz, ale jsou vytisknuty jednotlivé komponenty, které jsou následně sestaveny a slepeny. Dříve se projekty připravovaly pomocí lepenky a papíru. Vyhotovení těchto modelů bylo velice časově náročné a zdaleka tyto modely nedosahovaly kvality detailu vytvořených technologií RP. Trvanlivost těchto prezentačních sestav byla rovněž značně nízká. Proto se dnes tradiční metody stále častěji nahrazují inovativním řešením tvorby modelů. Při návrhu projektů je dnes velmi důležitá prezentace. Jestliže se firma uchází o významnou zakázku, je velmi důležité se co nejvíce připravit a zajistit co nejvíce podkladů. Nestačí mít tedy jen zpracovaný projekt na papíře. Je nutné často zhotovit prezentační model budovy či celého komplexu. Vyhotovení 3D modelu je významné zejména k posouzení tvaru a struktury projektu. Tvorba modelu je velice rychlá, velmi často trvá tisk řádově několik hodin, nikoli však dnů či týdnů, jak tomu dosud bývalo při použití tradičních metod [30].



Obr. 2.10 Využití aditivní technologie k vizualizaci architektonických projektů [30, 31].

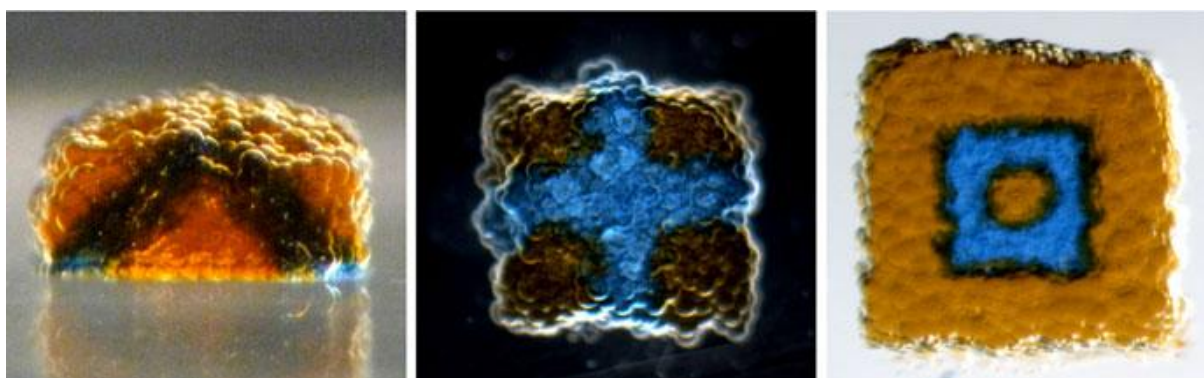
## 2.6 Využití aditivních technologií ve zdravotnictví

Moderní aditivní technologie a její nesporné výhody našly uplatnění v několika zdravotnických oborech. Jedním z oborů využívající tuto technologii je stomatologie. Stomatologické laboratoře, využívající 3D tiskárny, zrychlují výrobu dílů a zároveň zlepšují kvalitu a přesnost výrobků. Efektivita 3D tiskárny a digitálního návrhu se projeví až po fázi výroby. Kombinací několika procesů, jako je ústní skenování, design, CAD/CAM a 3D tisk, může stomatologická laboratoř rychle a přesně vyrobit zubní korunku, zubní můstek a řadu dalších ortodontických aparátů viz **obr. 2.11**. Použitím 3D tiskárny odpadá zubním laborantům náročné ruční modelování. K 3D tisku se v laboratořích používá např. Objet30 OrthoDesk. Tento přístroj byl speciálně navržen pro malé až středně velké stomatologické laboratoře a kliniky. Je cenově dostupný, kompaktní a jeho použití je snadné. Objet30 OrthoDesk je první tiskárnou svého druhu, která je schopna využít plně technologii 3D tisku ve stomatologii, zejména pak při výrobě modelů malých rozměrů. Přístroj obsahuje speciální zubní tiskové materiály uzavřené ve vhodných kazetách. Díky tomuto přístroji je možné přímo na pracovní ploše vytvořit modely rovnátek nebo například ortodontických aparátů. Vzhledem k možnosti ukládání všech modelů digitálně odpadá laboratořím ukládání objemných reálných modelů [7, 32].

Dále je možné využít 3D tiskárnu ve zdravotnictví k produkci syntetické tkáně, jako na **obr. 2.12**. Vědci sestavili nový typ 3D tiskárny, která vytváří materiál tkáně. Tuto tkáň tvoří vodní lipidové molekuly. Výsledný materiál se skládá ze sítě kapiček. Vytvořená síť by mohla jednoho dne nahradit poškozenou tkáň pacienta. Snaha vědců nespočívá v tom, aby byl vyvinut materiál věrně se podobající tkáni, ale spíše struktura, která by mohla vykonávat funkce tkání. Kapky mohou být potištěny proteinovými póry, které vytvoří cesty a mohou tak napodobit nervy. Každá kapka má průměr asi 0,05 mm. V současné době je trvanlivost materiálu po dobu dvou týdnů. Další příklad využití ve zdravotnictví představují vědci z USA, kteří se pokusili vytisknout přesnou kopii lidské žíly. K tisku sloužil biologický inkoust, který byl nanášen na speciální papír. Tento papír se poté vstřebává během zasychání inkoustu. Výsledkem byl válec ve tvaru lidské žíly. V budoucnu by podobnými metodami mohli být vytvářeny celé orgány či jejich části. Nicméně samotné použití 3D tiskáren v tomto odvětví zdravotnictví je stále v začátcích [7, 32].



Obr. 2.11 Modely dentálních náhrad vytvořené aditivní technologií [33].



Obr. 2.12 Síť z kapiček tkáně [32].

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

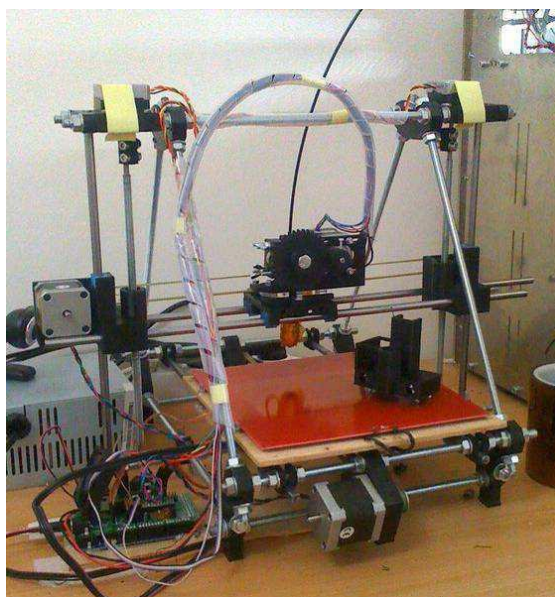
V této kapitole je popsán postup sestavení domácí 3D tiskárny. Podrobně je zde také přiblíženo nastavení parametrů tisku. Dále jsou zde zhodnoceny tiskové zkoušky a provedeno porovnání domácí 3D tiskárny s komerčně využívanou 3D tiskárnou Dimension *uPrint*. Je zde také popsán návrh tisku dutých součástí a úprava konstrukce tak, aby se domácí 3D tiskárna co nejvíce přiblížila komerčně dostupným zařízením, zejména pak v kvalitě tisku.

#### 3.1 Představení domácí 3D tiskárny

Domácí 3D tiskárny se postupem času staly čím dál více dostupnými široké veřejnosti. Jejich vývojem a zdokonalováním se začalo zabývat stále více lidí, čímž se vytvořila komunita, která se podílí na sdílení veškerých informací týkajících se 3D tiskáren. Informace o stavbě zařízení jsou dostupné na internetu, čímž bylo umožněno její rychlé rozšíření takřka do celého světa. Tiskárnu je možno zakoupit jako celek nebo ji složit z nakoupených komponent. Existuje mnoho variant a typů domácích 3D tiskáren, které se liší zejména svojí konstrukcí či vybavením. Hlavní výhodou domácích 3D tiskáren je jejich cena. Pořizovací náklady jsou několikanásobně nižší než u běžně dostupných komerčních zařízení. Domácí 3D tiskárnu lze pořídit již za několik tisíc korun. Cena profesionálních 3D tiskáren se však může pohybovat v řádech stovek tisíc či dokonce milionů korun. Domácí 3D tiskárna představuje spíše alternativu profesionálním 3D tiskárnám využívanou zejména k vlastním domácím účelům. Určitou nevýhodou oproti profesionálním 3D tiskárnám je pak kvalita dosahovaného tisku, která zatím nedosahuje kvality tisku profesionálních zařízení. Domácí tiskárna je složena z mnoha malých dílů a komponent. Podstatná část z těchto součástí může být vytvořena jinou domácí 3D tiskárnou. Tento proces se nazývá seberekopie. Domácí 3D tiskárna tedy umožňuje vytvoření dílů pro stavbu další 3D tiskárny a tím její rychlé rozšíření mezi veřejnost. Využití domácí 3D tiskárny nacházejí spíše při tvorbě menších a tvarově jednoduchých dílů. Projekt RepRap (*replicating rapid prototyper*) je mezinárodní projekt, který se zabývá vývojem domácích 3D tiskáren. Jako první byl vyvinut model Darwin. Jednalo se o první typ domácí 3D tiskárny, která se byla schopna částečně replikovat. Na tento model navazoval typ Mendel. Tento typ už byl dokonalejší a neobsahoval chyby původní 3D tiskárny Darwin. Z původního designu Mendel bylo vyvinuto několik dalších modifikací, které se liší zejména konstrukcí, elektronikou či dalšími komponenty. Nejrozšířenější a užitelsky nejoblíbenější se stal model Prusa Mendel, který je možno vidět na **obr. 3.1**. Výhoda tohoto zařízení je zejména v jednoduchosti konstrukce. Tento model byl vyvinut pro domácího uživatele, který je díky designu schopen sám doma sestavit a provozovat domácí 3D tiskárnu. Technické parametry tiskárny Prusa Mendel jsou shrnuty v **tab. 3.1** [7, 35].

Tab. 3.1 Technické parametry 3D tiskárny Prusa Mendel [7].

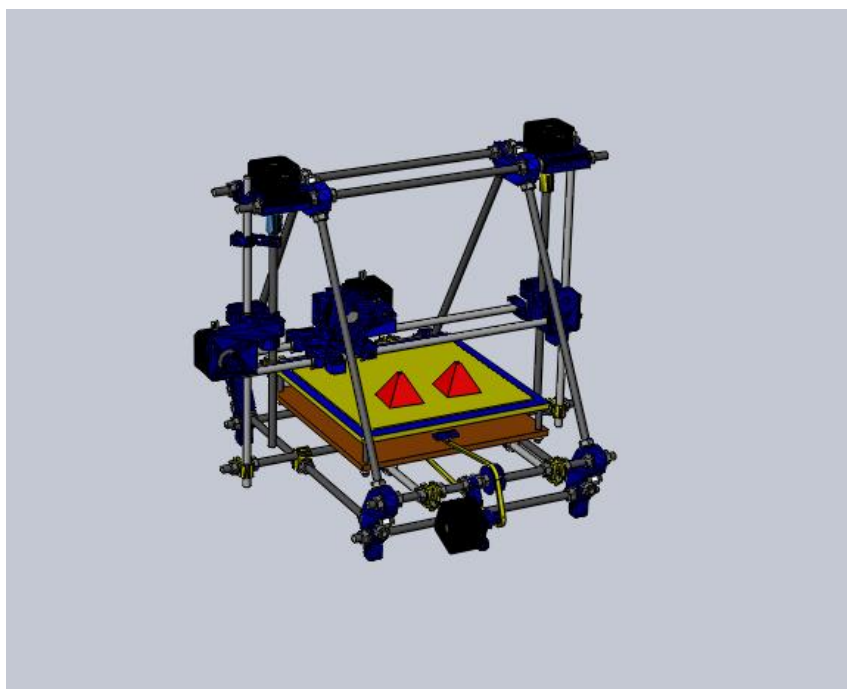
<b>Technologie tisku</b>	Výroba tavením vláken / Termoplastické vytlačování
<b>Oblast tisku</b>	200 mm délka x 200 mm šířka x 140 mm výška
<b>Tisknutelné materiály</b>	ABS, PLA, a další
<b>Rychlost tisku</b>	15 až 19 cm <sup>3</sup> za hodinu
<b>Přesnost</b>	Přesnost tiskové hlavy 0,1 mm, šířka tisknuté vrstvy 0,4 mm
<b>Hmotnost</b>	7 Kg
<b>Cena součástek a materiálu</b>	10 000 až 12 000 Kč



Obr. 3.1 Domáci 3D tiskárna Prusa Mendel [35].

### 3.2 Tvorba digitálního modelu domácí 3D tiskárny

Digitální model domácí 3D tiskárny, který lze vidět na **obr. 3.2** byl postupně sestaven v parametrickém programu SolidWorks. Tento program je 3D modelářský systém, využívaný zejména ke konstrukčním účelům. Kompletace sestavy probíhala postupně od základní kostry až po celkovou sestavu zařízení. Digitální modely jsou dostupné na internetových serverech zabývajících se domácími 3D tiskárnami. Tyto 3D modely jsou zde umístěny hlavně pro tisk dílů určených ke stavbě další domácí 3D tiskárny. Těchto digitálních modelů bylo využito k vytvoření 3D sestavy tiskárny. Ostatní díly, jako vodící tyče či základní deska byly vymodelovány. Spojovací materiál, zejména pak šrouby, podložky a matice byly vygenerovány z knihovny systému SolidWorks. Vytvoření 3D modelu domácí tiskárny mělo několik významů. Jedním z důvodů vytvoření digitálního modelu bylo ověření kompletace celku a kontrola možných kolizí, ke kterým by mohlo při sestavení nebo použití docházet. Jako hlavní důvod vytvoření digitální podoby domácí 3D tiskárny však byla možnost následné úpravy designu tak, aby došlo ke zkvalitnění tisku a tím přispět k vývoji tohoto zařízení.



Obr. 3.2 Digitální model domácí 3D tiskárny [41].

### 3.3 Sestavení domácí 3D tiskárny

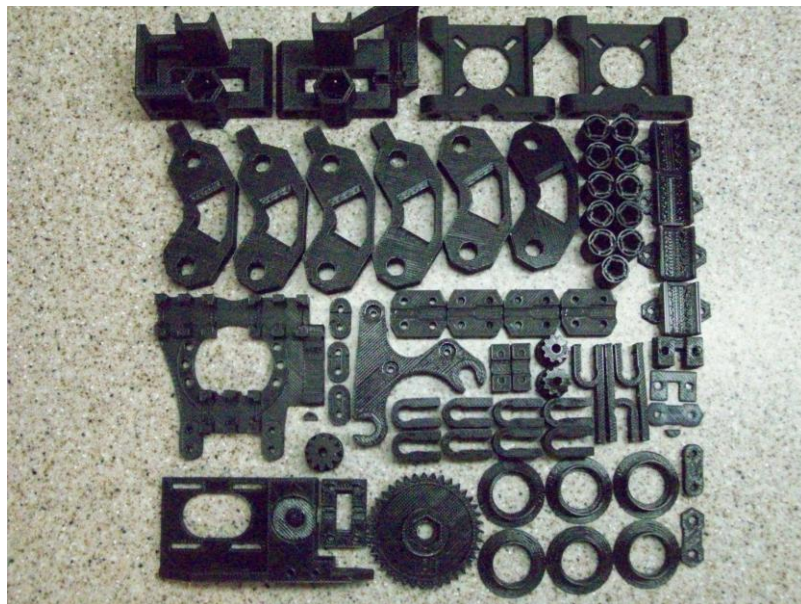
Velkou výhodou domácí 3D tiskárny Prusa Mendel je jednoduchost konstrukce. Při stavbě zařízení byl kladen důraz na dostupnost a cenu materiálů, ze kterých je 3D tiskárna složena, čímž plní základní očekávání od domácích 3D tiskáren. Toto zařízení je vhodné zejména pro osoby, které s technologií 3D tisku začínají a jejich znalosti ohledně 3D tiskáren a elektroniky nejsou natolik dobré, aby byly schopni sestavit složitější zařízení. Materiály použité na stavbu 3D tiskárny Prusa Mendel jsou běžně dostupné. Zakoupení těchto dílů je možné v klasických obchodech nebo na internetu. V případě stavby zařízení však bylo využito především internetových obchodů s příslušnými druhy materiálů.

#### 3.3.1 Použitý materiál

Použitých materiálů pro stavbu domácí 3D tiskárny je celá řada. Sestava se skládá z mnoha dílů různých velikostí, které je nutno před samotnou stavbou pořídit. Základní tři druhy materiálů využitých při stavbě domácí 3D tiskárna jsou:

- tištěné součásti,
- spojovací materiál,
- elektronika.

Tištěné součásti, jako na **obr. 3.3** jsou díly vytvořené další domácí 3D tiskárnou nebo profesionální 3D tiskárnou. Typ použitého zařízení může být libovolný. Ve většině případů je však použita metoda tisku FDM. Nejčastěji používanými materiály jsou plasty ABS či PLA, které jsou snadno dostupné a dosahují dostatečných pevnostních vlastností. Při stavbě testovacího zařízení byly použity díly z materiálu ABS. V případě využití profesionální 3D tiskárny by však cena součástí byla vysoká a výroba zařízení by se tedy značně prodražila. Velkou roli při volbě typu tiskárny tedy hrála cena vytištěných plastových komponent. Tisk plastových dílů byl proveden pomocí další domácí 3D tiskárny. Bylo tedy využito procesu sebereplikace, kdy část tiskárny byla vytvořena zařízením stejného typu. Součásti byly objednány přes internet, kde je možné si sadu všech těchto dílů nechat vytisknout a poslat.



Obr. 3.3 Sada tištěných dílů [36].

Spojovací materiál představuje všechny materiál základní konstrukce, který nebyl vytisknut. Materiál těchto komponent je ocel, případně plast. Většina komponent je dobře dostupná jak na internetu, tak i v kamenných obchodech, které se zabývají prodejem spojovacího materiálu či podobného příslušenství. Spojovací materiál představují především tyto součásti:

- matice,
- šrouby,
- podložky,
- závitové tyče,
- vodící tyče,
- ložiska,
- pružiny,
- řemínky.

Maticice, šrouby a podložky byly zakoupeny v kamenném obchodě se spojovacím materiálem, kde bylo umožněno nařezání závitových tyčí přesně na požadovanou délku. Příklad takto zakoupeného materiálu lze vidět na **obr 3.4**. Řemínky a pružiny byly vybrány dle jejich přesných specifikací. Ložiska typu 608 ZZ byla zakoupena v internetovém obchodě. Značení ZZ představuje utěsnění a odolnost proti prachu. Dále byla zakoupena lineární ložiska, která mají za úkol snížit tření a umožnit rychlý a plynulý pohyb. Lineární ložiska byla použita na všech třech osách 3D tiskárny. Ložiska byla vložena nebo připevněna k plastovým dílům a pohybují se na vodících tyčích. Umožňují tedy velice rychlé pohyby, se kterými tiskárna pracuje.



Obr. 3.4 Ocelový materiál používaný při stavbě domácí 3D tiskárny [37].

K zajištění pohybu 3D tiskárny byly vybrány krokové motory SX17-1005 viz **obr 3.5**. Parametry krokových motorů jsou uvedeny v **tab. 3.2**. Tyto krokové motory jsou plně dostačující pro pohon domácí 3D tiskárny. Motory byly použity k pohonu ve všech třech osách. V ose X a Y slouží krokové motory k pohonu základní desky a extruderu v horizontálním směru. V ose Z slouží dva krokové motory k pohybu extruderu ve vertikálním směru. Stejný typ krokového motoru byl vybrán i pro pohon extruderu, kterým je vytlačován roztavený materiál.

Tab. 3.2 Parametry krokových motorů SX17-1005 [38].

Technické parametry krokových motorů SX17-1005	
Statický moment [Nm]	0,5
Jmenovitý proud (seriové/paralerní zapojení) [A]	1/2
Indukčnost (seriové/paralerní zapojení) [mH]	11,6/2,9
Odpor (seriové/paralerní zapojení) [ $\Omega$ ]	6/1,5
Hmotnost [kg]	0,3

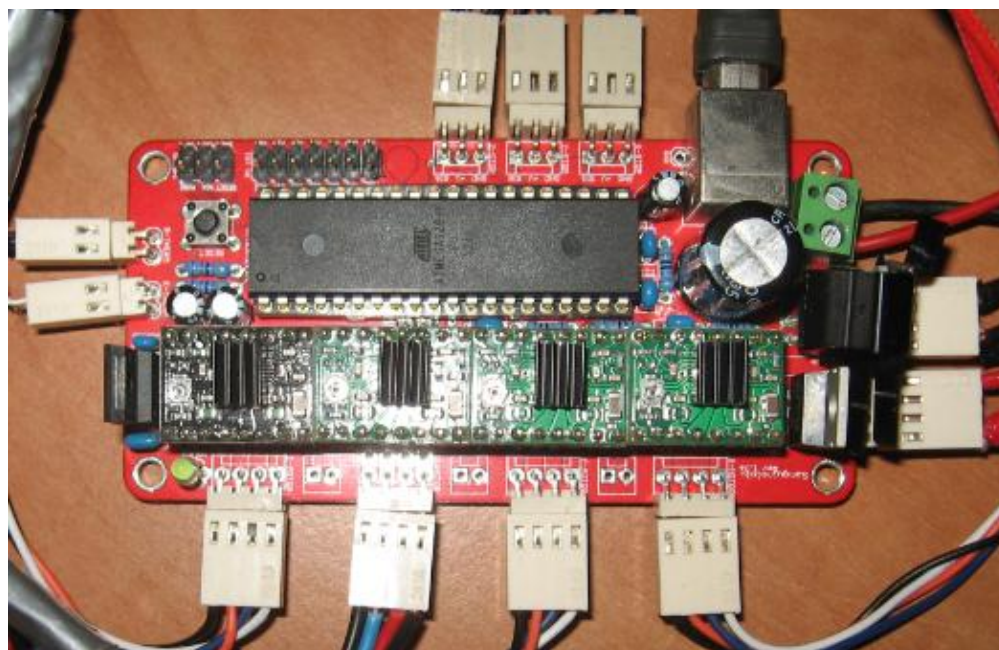


Obr. 3.5 Krokové motory SX17-1005.

Pro řízení domácí tiskárny byla vybrána řídicí deska Sanguinololu viz **obr. 3.6**. Tato řídicí deska plně dostačuje požadavkům domácí 3D tiskárny a je jedna z nejlevnějších na trhu. Řídicí deska byla osazena několika základními komponenty:

- USB konektor,
- napájecí vstup,
- mikroprocesor,
- konektory pro topná tělesa,
- konektory pro termistory,
- konektory pro připojení krokových motorů.

USB vstup slouží pro připojení 3D tiskárny k domácímu PC či notebooku. Vedle datového připojení byl umístěn napájecí vstup s napětím 12 V. Konektory pro topná tělesa představují výstupy z řídicí desky. Na tyto konektory bylo připojeno vyhřívání stolku a trysky extruderu. Vyhřívání stolku bylo provedeno odporově. Celkový odpor vyhřívání stolku je 5  $\Omega$ . Lze tedy dosáhnout teploty 110°C za necelých 5 minut. Výstup pro krokové motory tiskárny byl umístěn na přední části řídicí desky. Krokové motory mají napětí 12 V. Konektory pro termistory, které byly umístěny na levém okraji řídicí desky, slouží jako vstupy pro příjem informací o teplotě základního stolku a tavicí trysky extruderu. Hlavní částí řídicí desky je však mikroprocesor ATmega1284P. Před mikroprocesorem byl umístěn regulátor, který snižuje napětí mikroprocesoru na 5 V.



Obr. 3.6 Řídicí deska domácí 3D tiskárny.

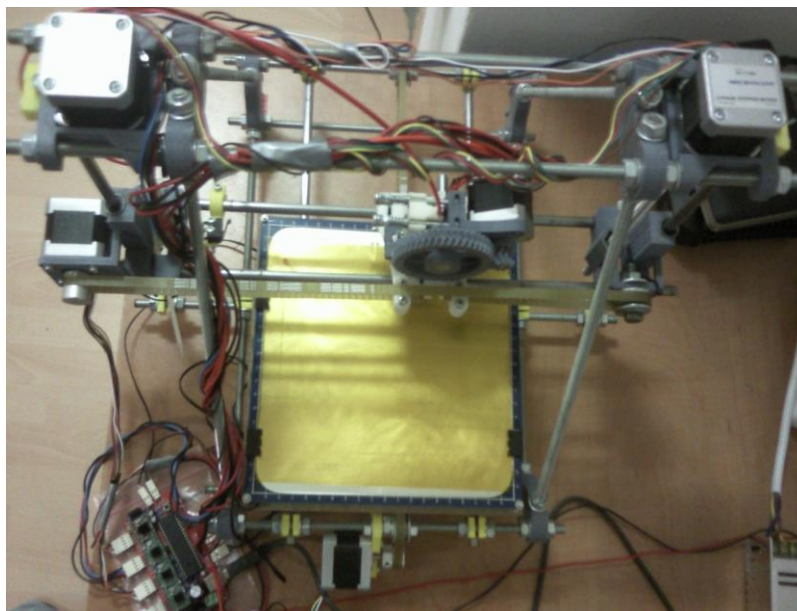
Po zapojení mikroprocesoru bylo nutné upravit některá jeho nastavení přeprogramováním firmware. Zvolený software pro domácí 3D tiskárnu byl Sprinter. Tento software umožňuje několik nastavení:

- volba typu elektroniky,
- volba typu termistoru,
- nastavení dorazů,
- komunikační rychlost mezi 3D tiskárnou a PC,
- možnost vypnutí či zapnutí os,
- nastavení krokových motorů,
- definice minimální a maximální teploty,
- podpora SD karty.

Veškeré nastavení bylo provedeno dle použité elektroniky a dle předpokládané funkce domácí 3D tiskárny. Software umožňuje ještě řadu dalších nastavení, která ovšem nejsou důležitá a pro provoz tiskárny nebylo nezbytné je měnit.

### 3.3.2 Kompletace domácí 3D tiskárny

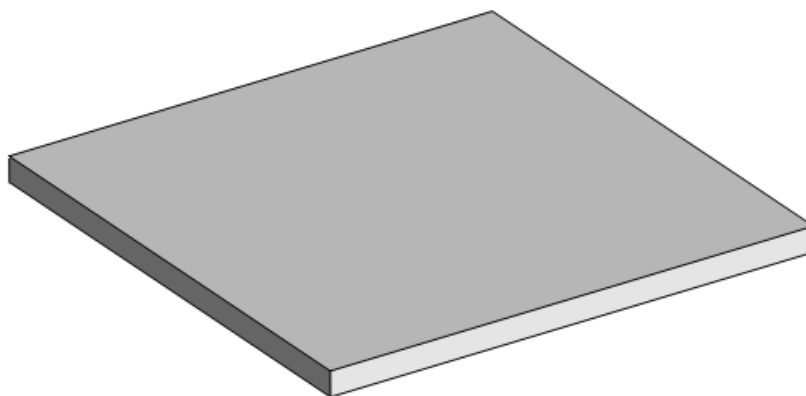
Stavba tiskárny začala po zakoupení všech součástí, které jsou ke kompletaci zařízení nutné. Ke stavbě 3D domácí tiskárny, kterou je možno vidět na **obr. 3.7** byl důležitý stabilní prázdný stůl, na kterém probíhala kompletace. Nutné bylo dodržet co nejlepší vodorovnost plochy. Jakmile byl připraven pracovní prostor, mohla začít stavba zařízení. Kompletace probíhala pomocí návodu, který je volně dostupný na internetových stránkách projektu *RepRap*. Jako pomůcky byly při stavbě použity běžné pracovní nástroje jako šroubovák, nůž, sada klíčů či kleště. Velice důležité bylo při stavbě dodržet všechny rozměry tiskárny. Výhodou konstrukce domácí 3D tiskárny je její jednoduchost. Bylo však nutné dbát na dostatečnou přesnost a pevnost sestaveného rámu. Některé tištěné plastové komponenty měly otřepy či ostré hrany. Bylo tedy nutné očistit či srazit hrany některých součástí. Další nevýhoda tištěných dílů byla nízká kvalita dřer, které bylo nutné převrtat tak, aby byla umožněna jejich funkčnost a použitelnost v sestavě. Podle návodu byla zkompletována hlavní kostra tiskárny. Kostra je tvořena zejména závitovými či vodícími tyčemi, které byly spojeny s tištěnými plastovými díly a dotaženy pomocí matek. Všechny rozměry byly průběžně měřeny a kontrolovány s návodem sestavení. Jakmile byla základní kostra kompletní, byla ověřena její pevnost a tuhost. Poté do ní byla umístěna základní deska. Na vytvořenou kostru byly následně připevněny krokové motory. K propojení krokového motoru a pojezdového stolku došlo pomocí ozubeného řemínku. Kompletace tiskárny pokračovala sestavením extruderu. Jedná se o jednu z nejdůležitějších částí 3D tiskárny. Sestavení extruderu bylo dosaženo po spojení krokového motoru s příslušnými tištěnými díly a tiskovou hlavou, která je nejdůležitější částí extruderu. Jakmile se podařilo extruder sestavit, byl umístěn na lože, které se nachází na vodících tyčích 3D tiskárny. Lože se pohybuje pomocí lineárních ložisek pro minimalizaci tření. Extruder byl poté spojen s krokovým motorem pomocí ozubeného řemínku. Následně byla 3D tiskárna vybavena vyhřívaným stolcem, který byl připevněn na základní desku [39].



Obr. 3.7 Sestavená domácí 3D tiskárna.

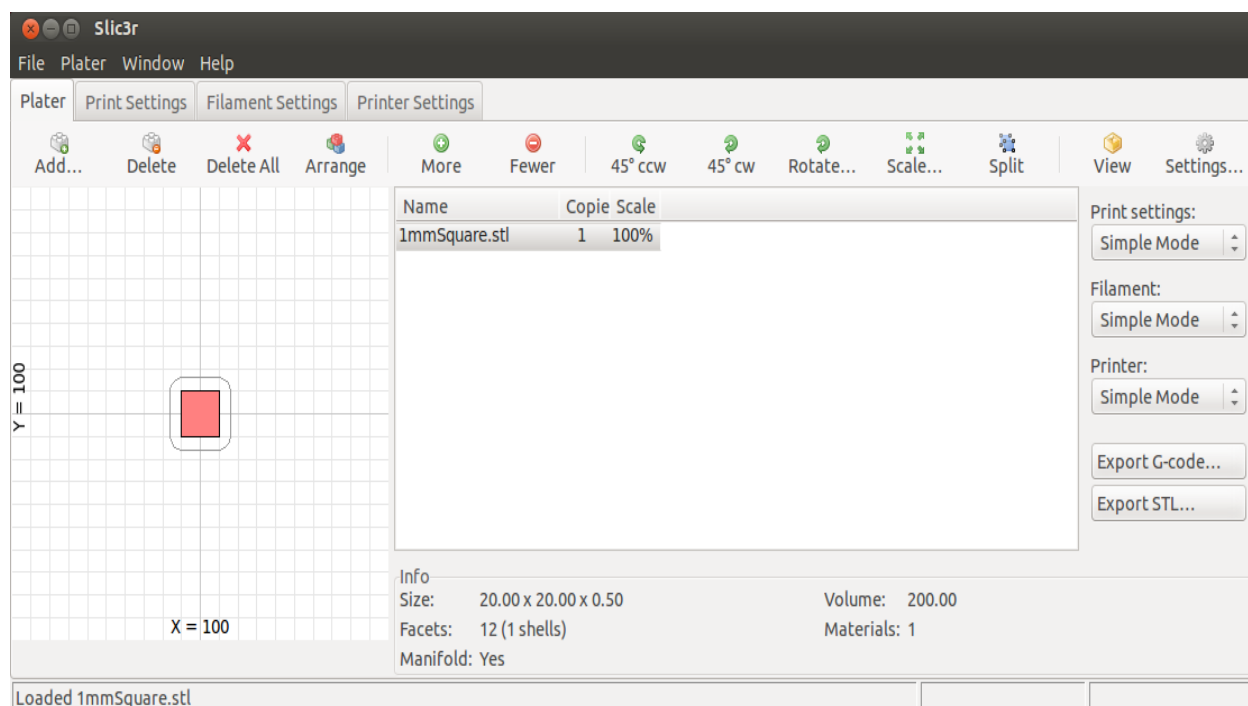
### 3.3 Nastavení parametrů tisku domácí 3D tiskárny

Jakmile byla 3D tiskárna zkompletována, bylo možné provést první zkušební tisk. Základem pro tisk součásti, kterou chceme vytvořit, je 3D digitální model. Možností získání digitálních modelů je celá řada. Pokud je požadavek tisknout atypické modely či prototypy, je nutné vytvořit digitální 3D model před samotným zahájením tisku. Vytvoření digitálního 3D modelu je možné především v CAD modelářských programech. Nejrozšířenější konstrukční 3D programy jsou Inventor či SolidWorks. Bohužel licence k těmto počítačovým programům jsou velice drahé a pro běžného člověka těžko dostupné. Použití těchto systémů si mohou dovolit pouze firmy, které mají dostatek finančních prostředků na koupi licencí. Dostupnost těchto programů, zejména pro studenty, se naskytuje na středních nebo vysokých školách, které mají licence zapůjčeny či zakoupeny. Pro běžné domácí využití je však nutné pořídit některý z volně dostupných 3D programů. Jedním takovým může být OpenSCAD nebo FreeCAD. Tyto programy umožňují tvorbu základních 3D prostorových těles. Další možností jak získat počítačový 3D model je využít některou z internetových stránek, na kterých jsou modely sdíleny. Tyto servery umožňují stažení součástí nejrůznějších tvarů a účelů použití. Množství takto nahraných součástí se pohybuje v tisících. Je možné si tedy vybrat vhodný model, který v danou chvíli chceme tisknout. Tyto servery umožňují i zpětně nahrát vytvořené součásti a tím neustále databázi modelů rozšiřovat. Tiskárna pracuje s digitálními soubory ve formátu STL. Většina CAD systémů tento formát podporuje, tudíž je jen nutné uložit nebo stáhnout model v požadovaném formátu dat. Pro první tisk byl zvolen zkušební prototyp čtvercového tvaru, který je na **obr. 3.8**. Tento model je využíván k testování prvotních tiskových vlastností 3D tiskárny. Na tomto prototypu byly vyzkoušeny vlastnosti tisku, jako je rychlost posuvu tiskové hlavy, množství přidávaného materiálu, teplota tavení plastu a další.



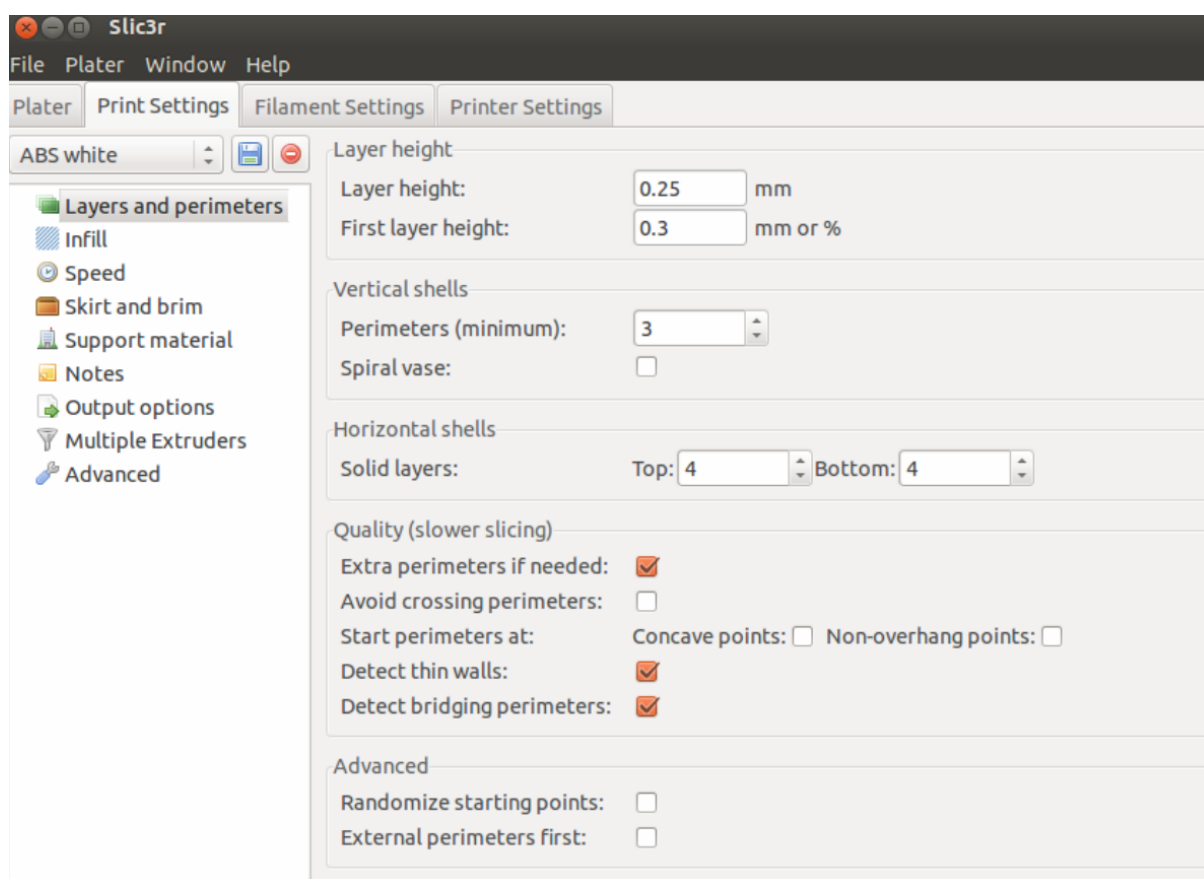
Obr. 3.8 Základní zkušební prototyp [41].

Jakmile byl k dispozici digitální model ve formátu STL, bylo nutné získání G-kódu, kterým bude tiskárna řízena. Jedná se v podstatě o podobný princip jako řízení CNC stroje. Tento počítačový kód řídí pohyb zařízení ve 3 osách. G-kódy lze generovat ručně, ale daleko častěji se využívá nejrůznějších systémů. 3D digitální model je rozřezán na tenké vrstvy, ze kterých systém dokáže snadno vygenerovat patřičný G-kód. Podle něj se pak řídí pohyb tiskové hlavy a tím výroba součásti. Jednotlivý G-kód řídí jak rychlost pohybu, tak množství materiálu a další vlastnosti tisku. Jedná se o velké množství parametrů, které značně ovlivňují výrobu součásti. Každý G-kód tedy musí být nastaven přesně dle vlastností tiskárny takřka na míru, aby tisk probíhal dle požadavků. Ke generování G-kódu bylo tedy využito programu Slic3r viz **obr 3.9**. Jde o free software volně dostupný na internetu, který díky správnému nastavení dokáže velice dobře řídit tvorbu prototypu. V úvodu umožňuje program nastavit několik základních parametrů. Po importu byl model umístěn automaticky do středu pracovního prostoru, v našem případě vyhřívaného stolu. Do tohoto prostoru lze přidávat libovolné množství dalších modelů. 3D tiskárna je limitována pouze prostorem pracovního stolu, který měl v daném případě rozměr 200 x 200 milimetrů. Umístění součástí v pracovním prostoru lze snadno změnit a uspořádat. Program umožňuje také kopírování součástí a tím vyrobit více stejných dílů najednou. Je zde dále umožněno rotování se součástí, volba směru umístění či lze nastavit velikost měřítka budoucí součásti vůči virtuálnímu 3D modelu. Další nastavení tisku lze provést v jednotlivých sekcích nastavení.



Obr. 3.9 Úvodní prostředí softwaru Slic3r [42].

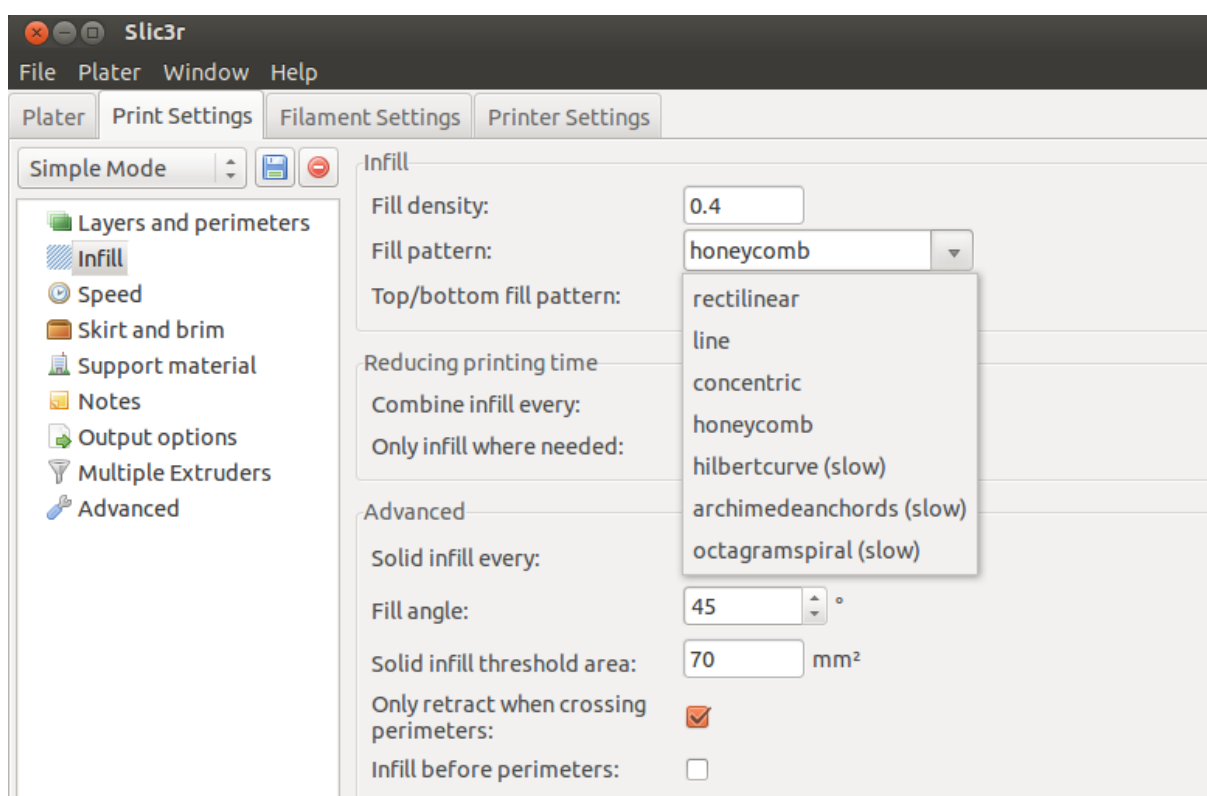
Nastavení tisku bylo předdefinováno. Tímto nastavením však nebylo možné dosáhnout kvalitního a správného tisku součástí a bylo nutné nastavení upravit. Důležité informace před nastavením tiskových parametrů byly zejména tvar a velikost součásti, plán využití modelu či použitý materiál. Všechny tyto vlivy musíme brát při nastavování tiskových parametrů 3D tiskárny v potaz. Mezi základní nastavení tiskárny patří nastavení parametrů vrstev a stěn (*Print Settings – Layers and perimeters*), jak je možno vidět na **obr. 3.10**. Volba výšky vrstvy má velký vliv na kvalitu tisku a také na celkový čas tvorby součásti. Abychom dosáhli co nejbližšího nastavení profesionální tiskárně Dimension uPrint, byla nastavena stejná výška tisku (*Layer height*), tedy 0,25 mm. Výška první kladené vrstvy (*First layer height*) na vyhřívanou podložku by měla být vždy vyšší. Dále byl nastaven parametr minimálního počtu vrstev, ze kterého byla tvořena stěna modelu (*Vertical shells*). Stejné nastavení bylo provedeno na spodní i horní části modelu (*Horizontal shells*). Byly zvoleny minimálně 3 vrstvy materiálu ve vertikálním směru (stěny modelu) a 4 vrstvy v horizontálním směru (spodní a horní část modelu), což je pro tvorbu běžných dílů plně dostačující. Závisí ovšem také na pevnostních požadavcích kladených na tištěný díl. Systém umožňuje také detekci tenkých stěn (*Detect thin walls*) a další nastavení tisku, která ovšem nejsou podstatná.



Obr. 3.10 Nastavení tiskových parametrů – vrstvy a stěny [42].

Mezi dalšími parametry v nastavení tisku výplně (*Print Settings - Infill*) v systému Slic3r byla hustota výplně (*Fill density*) a způsob výplně dílu (*Fill pattern*) viz **obr. 3.11**. Systém umožňuje v nastavení zvolit nejrůznější výplně materiálu. Běžně lze vytvořit model z plného materiálu, což je vhodné zejména u zatěžovaných součástí. V případě, že díl není výrazně

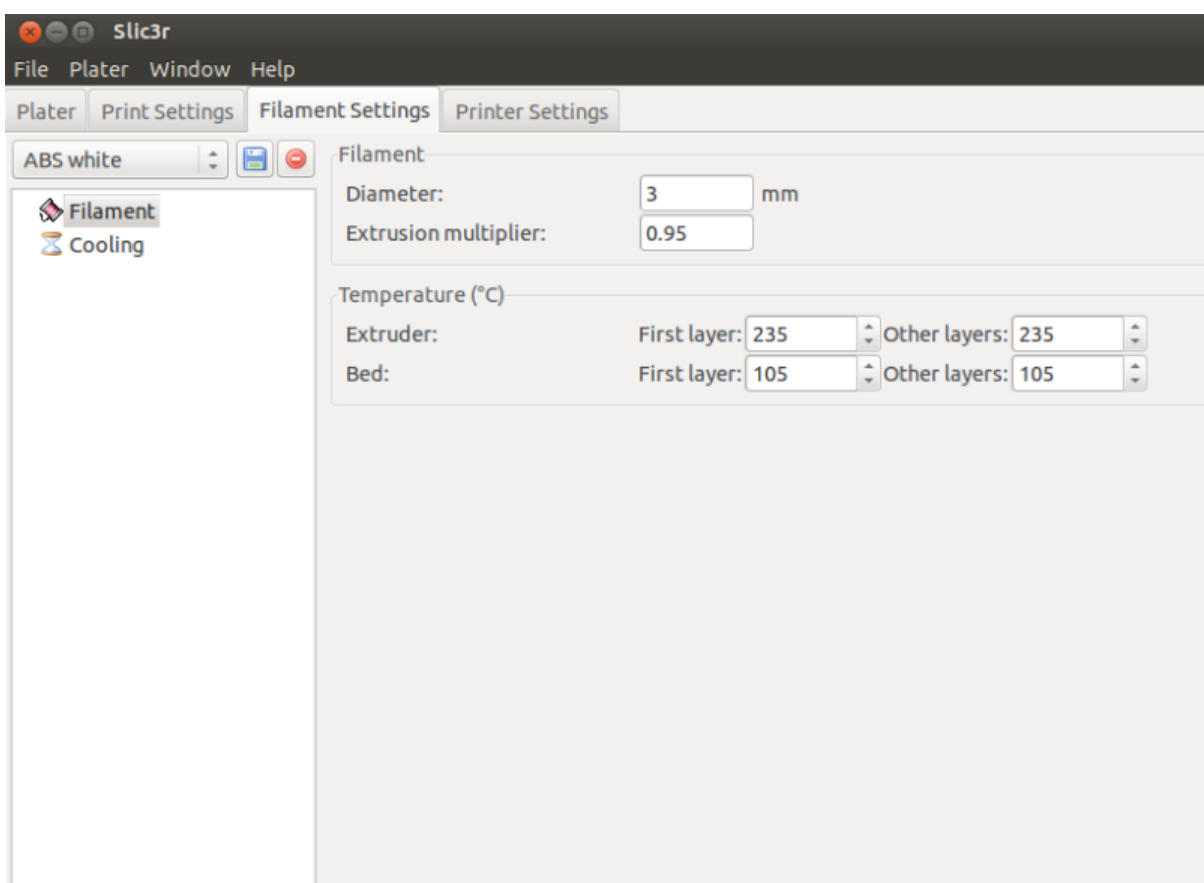
mechanicky namáhán, lze volit procentuální vyplnění vnitřního prostoru součásti. U běžných dílů sloužících pouze k dekoraci či vizualizaci je možno volit nižší stupeň výplně součásti. Volba výplně udává zejména tuhost součásti, ale také spotřebu materiálu a tudíž výslednou cenu dílu. Je proto vhodné před nastavením tisku určit použití vytvořené součásti a podle toho volit parametry tisku. Vnitřní výplň může být tvořena několika různými způsoby, mezi které patří přímočará výplň, spirálová výplň či výplň podobná včelí plástvi. Nastavení struktury výplně tištěných dílů bylo v podobě včelí plástve (*honeycomb*), která zaručuje dostatečnou pevnost součásti a zároveň úsporu materiálu. Je nutné nastavit výplň spodních i horních vrstev součásti (*Top/bottom fill pattern*), kterou je z důvodu pevnosti a kvality povrchu vhodné volit jako celistvou. Dále systém umožňuje nastavit některé další parametry tisku, jako je úhel výplně (*Fill angle*) nebo zpomalení tisku při přejíždění na další vrstvu vytvářené součásti (*Only retract when crossing perimeters*). Úhel výplně byl volen 45°, z důvodu lepší stability a výsledné pevnosti.



Obr. 3.11 Nastavení tiskových parametrů – výplň [42].

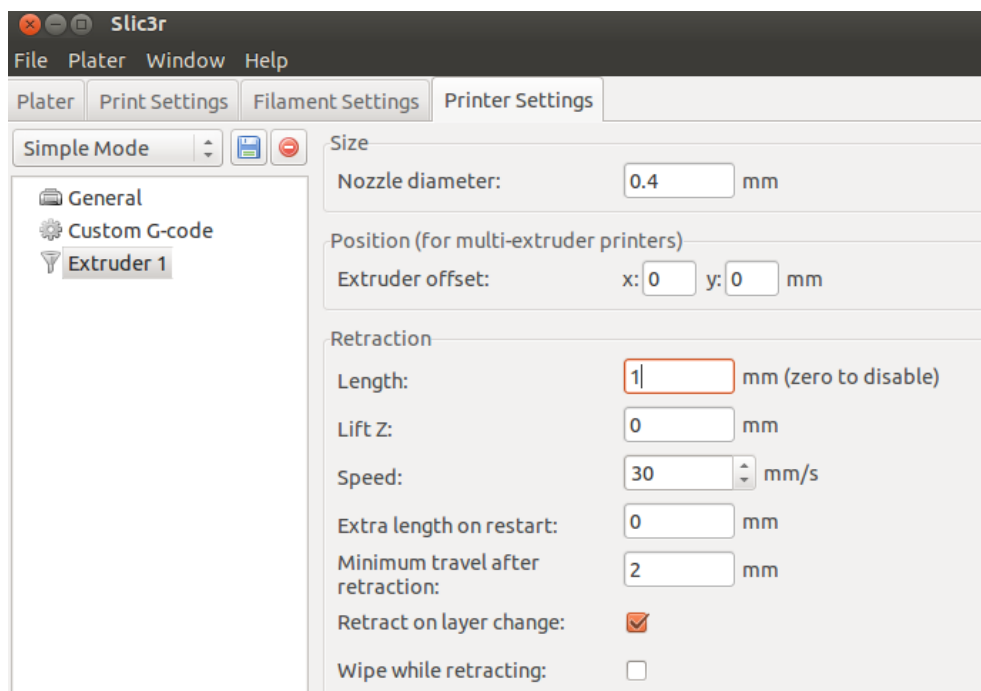
Důležité bylo zejména nastavení parametrů vlákna (*Filament Settings*) viz **obr. 3.12**. Průměry plastového drátu (*Diameter*) se liší dle druhu materiálu a také dle jednotlivých dodavatelů. Zadání této hodnoty je velice důležité pro přepočet objemu taveného materiálu, který tryskou prochází. Námí použité vlákno mělo průměr 3 mm a bylo z plastu ABS. Hlavním parametrem tisku v systému Slic3r bylo nastavení poměrného množství vytlačeného materiálu (*Extrusion multiplier*). Toto nastavení udává poměr vytlačeného materiálu vůči původnímu nastavení. V mikroprocesoru je pevně nastavena rychlost krokového motoru extruderu a tím i rychlost posuvu drátu. Tato rychlost určuje v závislosti na průměru drátu objem vytlačeného materiálu. Poměr vytlačovaného materiálu bylo nutno otestovat na několika vzorcích a najít správný poměr pro daný tisk. Jde o základní nastavení, které má největší vliv

na provedenou kvalitu tisku součástí. Dalším důležitým aspektem při nastavení vlastností domácí 3D tiskárny bylo nastavení teplot (*Temperature*). Jednalo se především o teplotu tavení plastu v extruderu (*Temperature Extruder*) a teplotu stolku (*Temperature Bed*). Teplota extruderu byla nastavena dle materiálu, se kterým tiskárna pracovala a který musel být roztaven. Nedostatečné nastavení materiálu i jeho přehřátí totiž mohou zapříčinit jak snížení kvality tisku, tak i řadu dalších problémů s tiskem. Použitý materiál byl plast ABS, jehož teplota tavení je okolo 235°C. Teplota stolku je důležitá zejména pro snadnější přilnutí materiálu a lepší rozložení teploty při kladení základních vrstev součástí. Teplota vyhřívání podložky byla proto nastavena na 105°C.



Obr. 3.12 Nastavení parametrů vlákna [42].

Jako poslední bylo provedeno nastavení parametrů tiskárny (*Printer Settings*), jak je možno vidět na **obr. 3.13**. Průměr trysky extruderu je dán dle typu použitého topného tělíska. Na testované domácí 3D tiskárně se jednalo o typ topného tělíska *J-head*, který má průměr trysky (*Nozzle diameter*) 0,4 mm. Dalším důležitým parametrem je posuvová rychlost (*Speed*). Dále bylo možno nastavit několik dalších parametrů. Tyto parametry byly však již nastaveny a nijak nám neovlivňovaly kvalitu tisku či vlastnosti součástí a bylo možné je nechat v základním nastavení.



Obr. 3.13 Nastavení parametrů 3D tiskárny [42].

Po nastavení všech základních parametrů tisku součásti pro danou 3D domácí tiskárnu byl program schopen vygenerovat G-kód. Jde o podobný G-kód, který využívají běžné CNC stroje. Na začátku jsou základní příkazy nastavení, jako zapnutí vyhřívání nebo nastavení extruderu do výchozí polohy apod. Poté následuje již řídicí kód, podle kterého je řízen samotný pohyb tiskárny. Příklad vygenerovaného G-kódu lze spatřit na **obr. 3.14**.

```
Otevřít Uložit Zpět  
1mmSquare.gcode ✖  
; generated by Slic3r 1.0.1-dev on 2014-03-06 at 13:27:08  
  
; perimeters extrusion width = 0.40mm  
; infill extrusion width = 0.42mm  
; solid infill extrusion width = 0.42mm  
; top infill extrusion width = 0.42mm  
  
G21 ; set units to millimeters  
M107  
M190 S65 ; wait for bed temperature to be reached  
M104 S185 ; set temperature  
G28 ; home all axes  
G1 Z5 F5000 ; lift nozzle  
  
M109 S185 ; wait for temperature to be reached  
G90 ; use absolute coordinates  
G92 E0  
M82 ; use absolute distances for extrusion  
G1 F1800.000 E-1.00000  
G92 E0  
G1 Z0.350 F7800.000  
G1 X84.905 Y85.749 F7800.000  
G1 E1.00000 F1800.000  
G1 X86.658 Y84.267 E1.07224 F540  
G1 X88.811 Y83.472 E1.14448
```

Obr. 3.14 Vytvořený G-kód systémem Slic3r [42].

### 3.4 Zkušební tisk prototypu

Návrh vhodného nastavení základních tiskových parametrů.

Mezi základní parametry tiskárny patří zejména nastavení rychlosti posuvu a množství vytlačovaného materiálu. Na závislosti těchto procesů v podstatě závisí celý tisk součásti. Je tedy nutné provést matematický výpočet pro určení těchto hodnot. Celý proces natavování a kladení materiálu probíhá následujícím postupem. Materiál je podáván do trysky pomocí podávacího šroubu. Tento šroub je poháněn krokovým motorem přes dvě ozubená kola. Materiál je v trysce taven a poté je vytlačen na požadovaný díl. Toto vše probíhá za konstantní posuvové rychlosti.

Teoretický výpočet parametrů:

Znamé hodnoty:

$D$	$= 3$ [mm]	- průměr použitého plastového drátu,
$D_s$	$= 8$ [mm]	- průměr podávacího šroubu,
$i$	$= 3,5$ [-]	- převodový poměr extruderu,
$d$	$= 0,4$ [mm]	- průměr trysky,
$h$	$= 0,25$ [mm]	- výška vrstvy,
$f_p$	$= 30$ [mm.s <sup>-1</sup> ]	- posuvová rychlost,
$L$	$= 1$ [mm]	- výpočtová délka tisku.

Na základě rozboru procesu bylo možno spočítat otáčky krokového motoru extruderu v závislosti na posuvové rychlosti v osách XY. Při výpočtu bylo využito zákona o zachování objemu.

Výpočet objemu spotřebovaného materiálu pro 1 mm tisku ( $V_t$ ) dle vztahu (3.1).

$$V_t = d \cdot h \cdot L \quad (3.1)$$

$$V_t = 0,4 \cdot 0,25 \cdot 1 = 0,1 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Délka plastového drátu spotřebovaného pro 1 mm tisku ( $L_D$ ) dle vztahu (3.2).

$$V_t = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L_D \Rightarrow L_D = \frac{V_t}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} \quad (3.2)$$

$$L_D = \frac{0,1}{\frac{\pi \cdot 3^2}{4}} = 0,014 \text{ [mm]}$$

Počet otáček podávacího šroubu pro 1 mm tisku ( $n_S$ ) dle vztahu (3.3).

$$n_S = \frac{L_D}{\pi \cdot d_S} \quad (3.3)$$

$$n_S = \frac{0,014}{\pi \cdot 8} = 5,57 \cdot 10^{-4} \text{ [ot} \cdot \text{mm}^{-1}\text{]}$$

Počet otáček krokového motoru pro 1 mm tisku ( $n_M$ ) dle vztahu (3.4).

$$n_M = n_S \cdot i \quad (3.4)$$

$$n_M = 5,57 \cdot 10^{-4} \cdot 3,5 = 1,95 \cdot 10^{-3} \text{ [ot} \cdot \text{mm}^{-1}\text{]}$$

Poměr mezi posuvem v osách XY a otáčkami krokového motoru ( $p$ ) dle vztahu (3.5).

$$p = f_D \cdot n_M \cdot 60 \quad (3.5)$$

$$p = f_D \cdot 1,95 \cdot 10^{-3} \cdot 60 = f_D \cdot 0,117 \text{ [ot} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$$

Pro posuvovou rychlost 30 [mm · s<sup>-1</sup>]


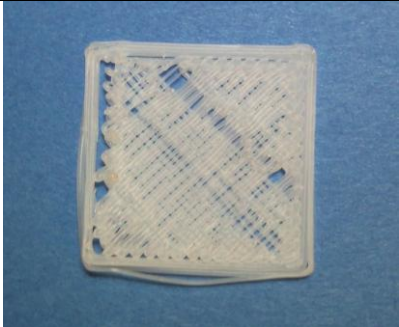

$$p = 30 \cdot 1,95 \cdot 10^{-3} \cdot 60 = 3,51 \text{ [ot} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$$

Vypočtené hodnoty byly zadány do mikroprocesoru jako výchozí parametr. Podle tohoto nastavení je následně program Slic3r schopen pracovat a vytvářet dráhy i pro jiná nastavení. Jako hlavní parametr v programu Slic3r byl použit *extrusion multiplier* (násobnost vytlačení), který určuje poměr vytlačeného materiálu vzhledem k prvotnímu nastavení. Tento parametr je zanesen do programu Slic3r zejména proto, že vypočtená a zadaná data zcela neodpovídají reálnému procesu a tímto parametrem je možno provést snadné úpravy a rychlé odladění tisku.

Aplikace teoretických výpočtů v praxi a odladění tisku.

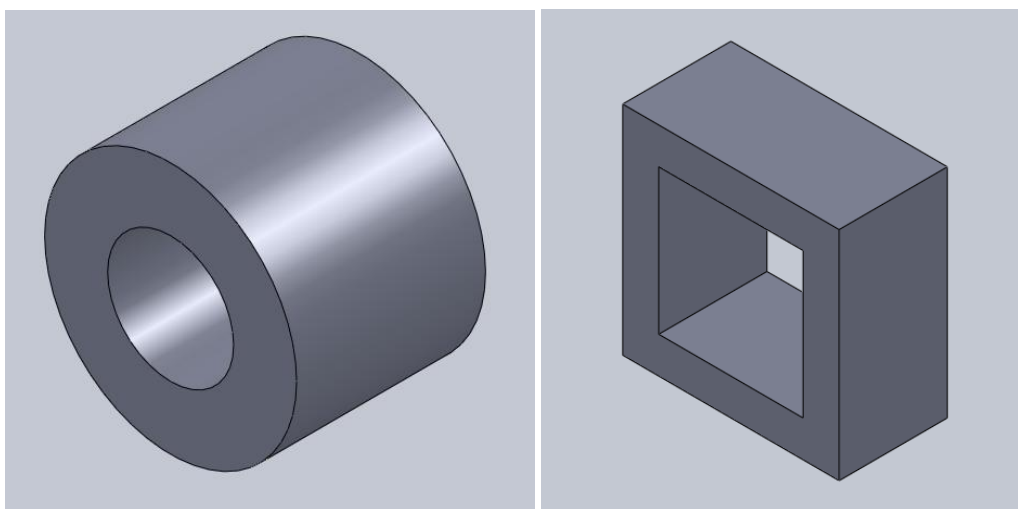
Po nastavení správných tiskových parametrů byl G-kód odeslán do 3D domácí tiskárny, kde byl proveden tisk základního zkušební prototypu. Nastavení tiskárny však bylo nedostačující a musely být provedeny dodatečné úpravy parametrů tisku. Pokud je tedy vyžadována co nejvyšší kvalita tisku, je nutné najít optimální nastavení a provést zkušební tisk nejdříve na příslušných zkušebních prototypy. Zkušenosti s daným materiálem a konkrétní 3D domácí tiskárnou hrají tedy podstatnou roli při výrobě součásti. Nastavení parametrů tisku bylo nutné provést několikrát, než bylo docíleno kvalitního tisku. Podobné úpravy parametrů tisku je nutno provést po sestavení tiskárny nebo vždy po větší opravě, jako např. oprava extruderu či jiných důležitých komponent 3D tiskárny. V **tab. 3.3** jsou zobrazeny první zkušební prototypy, které byly vyrobeny v průběhu nastavení tiskárny.

Tab. 3.3 Výsledky testů a odladění tisku.

Vzorek	Extrusion multiplier	Popis
 <p data-bbox="448 763 475 792">1.</p>	1	<p data-bbox="855 443 1485 663">Výtlač materiálu byl moc velký. Jakmile tryska vytlačila velké množství materiálu, vlastním pohybem jej deformovala a roztírala. Bylo nutné snížit množství vytlačovaného materiálu extruderem, abychom zabránili vnikání trysky do materiálu.</p>
 <p data-bbox="448 1133 475 1162">2.</p>	0,9	<p data-bbox="855 813 1485 965">Model byl tištěn s nedostatkem vytlačovaného materiálu. Bylo nutné zvýšit výtlač materiálu během tisku prototypu tak, aby byla celá plocha vyplněna.</p>
 <p data-bbox="448 1554 475 1583">3.</p>	0,95	<p data-bbox="855 1182 1485 1294">Množství vytlačovaného materiálu bylo vyváženo. Tiskárna tvoří plnou plochu a zároveň nedochází k roztírání materiálu.</p>

### 3.5 Porovnání dosažených vlastností tisku

Jakmile se podařilo nastavit optimální parametry tisku domácí 3D tiskárny, byly vytištěny porovnávací díly a srovnána přesnost s profesionální tiskárnou Dimension *u*Print. Pro tisk byly vybrány dva modely základních tvarů, které lze vidět na **obr. 3.16**. Vytvoření digitálních modelů proběhlo v parametrickém systému SolidWorks. Jak domácí 3D tiskárna, tak profesionální tiskárna Dimension *u*Print pracují se stejnou metodou tisku, tedy FDM. Výhoda tiskárny Dimension *u*Print je práce ve vyhřívaném pracovním prostoru, což umožňuje vyšší kvalitu tisku. Bylo však nadefinováno nastavení tiskových parametrů takovým způsobem, aby mohlo být provedeno srovnatelné hodnocení součástí vyrobených oběma zařízeními.



Obr. 3.16 Porovnávací díly [41].

#### 3.5.1 Tisk součástí na profesionální 3D tiskárně Dimension *u*Print.

Tiskárna Dimension *u*Print je profesionální tiskárna, kterou vlastní VUT v Brně. Tiskárna využívá softwaru CatalystEX. Systém je obslužným programem tiskárny *u*Print a bylo v něm provedeno veškeré nastavení a příprava tisku. Nejdříve byly do systému nahrány 3D digitální modely dílů ve formátu STL. Poté byly tyto díly umístěny do pracovního prostoru tiskárny. Jakmile bylo dokončeno umístění modelů na pracovní desce, byly v systému CatalystEX nastaveny veškeré vlastnosti tisku, které daný systém umožňuje měnit. Nastavené parametry tisku lze vidět na **obr. 3.17**.

### Properties

Layer resolution:	0,2540
Model interior:	Sparse - high density
Support fill:	Sparse
Number of copies:	1
STL units:	Millimeters
STL scale:	1,000

Obr 3.17 Nastavení vlastností tisku v systému CatalystEX [40].

Systém CatalystEX umožňuje nastavení tisku tak, aby výsledný model odpovídal požadavkům, které jsou na něj kladeny. Bylo tedy provedeno několik základních nastavení parametrů.

Výška jednotlivých vrstev (*Layer resolution*) umožňuje systém volit za tři variant:

- 0,178 mm,
- 0,254 mm,
- 0,330 mm.

Výška vytvořených vrstev má výrazný vliv zejména na kvalitu povrchu. Dalším faktorem, který tato vlastnost ovlivňuje je doba tisku. Čím menší vrstva je zvolena, tím se zvýší kvalita povrchu a přesnost součásti, ale výrazně se prodlouží doba tisku. Tisk porovnávacích dílů byl proveden s výškou vrstvy 0,254 mm. Systém CatalystEX totiž neumožňuje pro tento typ tiskárny měnit nastavení výšky vrstvy.

Vyplnění modelu (*Model interior*) tiskárna umožnila nastavit ve třech provedeních:

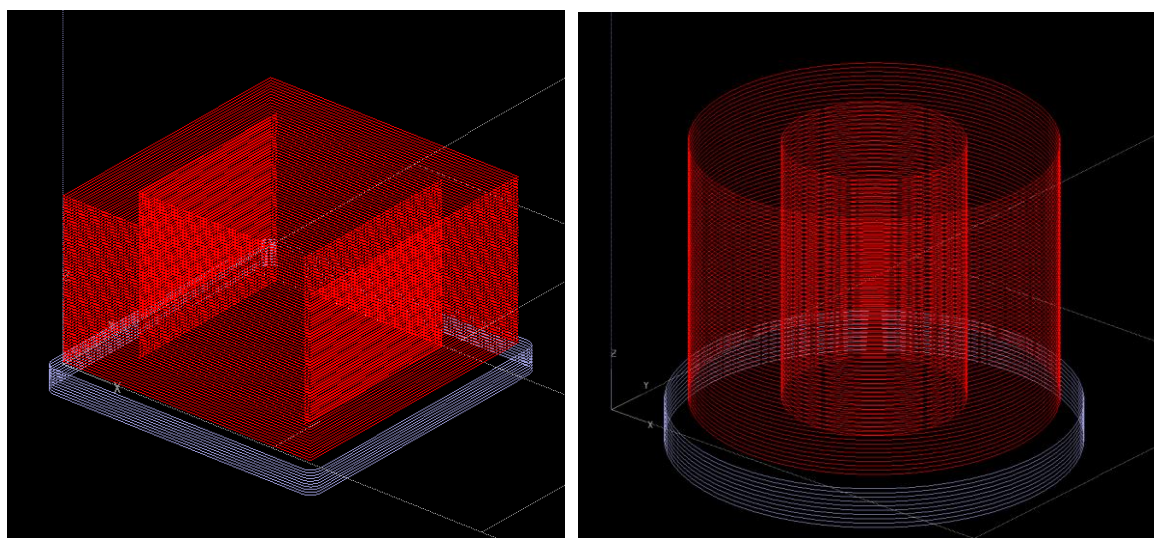
- *Solid* (plný materiál),
- *Sparse - high density* (vysoká hustota výplně),
- *Sparse - low density* (nízká hustota výplně).

Na zvolené variantě výplně závisí zejména tuhost součásti. Toto nastavení bývá provedeno zejména dle pevnostních požadavků na vytvářený díl. U malých či tenkých součásti je nastavena ve většině případů výplň *Solid*. Díl je v tomto případě celý vyplněn materiálem. U větších dílů je poté nutno počítat s vyšší cenou součásti, protože roste i spotřeba materiálu. Možnost výplně *Sparse - high density* je volena zejména u součásti, které nejsou výrazně namáhány. Výhodou je i větší úspora materiálu, než u výplně *Solid*. U prototypů, které slouží pouze k vizualizaci nebo součásti, které nejsou pevnostně namáhány, se často používá výplň *Sparse - low density*. Výplň vnitřního prostoru součásti je velice řídká, ale úspora materiálu je značná. U testovaných modelů byla nastavena hustota výplně *Spare - high density*. Testovací součásti nebyly mechanicky namáhány. Součásti byly pouze měřeny a porovnávány, k čemuž je tato výplň plně dostačující.

Výplň podpor (*Support fill*) umožňuje tiskárna nastavit z několika variant:

- *Basic* (základní),
- *Sparse* (řídka),
- *Minimal* (minimální),
- *Break-away* (odlamovací),
- *Surround* (podpora okolo součásti).

Tisknuté díly byly vytvořeny bez podpor, zejména díky tvaru, který nevyžadoval jejich tvorbu. Tiskárna Dimension *uPrint* automaticky vytvořila podpory pouze v podobě základních vrstev na pracovní podložce, což lze vidět na **obr 3.18**. Na tyto vrstvy byl pak následně model stavěn. Mezi dalšími parametry nastavení byl počet kopií součásti (*Numbers of copies*), který představuje nastavení kopií vytvářených dílů a umožňuje tisk více stejných součástí najednou. Dále byly nastaveny použité jednotky (*STL unit*) a jako poslední parametr měřítko součásti (*STL scale*). Jakmile byly nastaveny veškeré parametry tisku, provedl systém výpočet řídicího programu pro tisk součástí. Po vytvoření programu systém umožnil zobrazení základních informací tisku, které jsou shrnuty v **tab. 3.4** [39].



Obr 3.18 Automatické generování jednotlivých vrstev součásti [40].

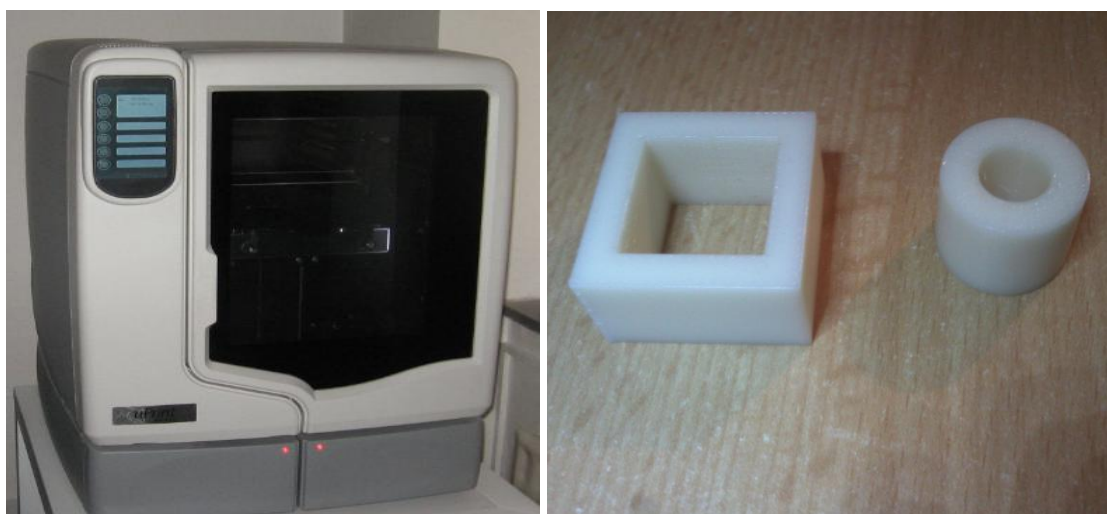
Tab. 3.4 Vlastnosti tisku porovnávacích dílů.

<b>Celkový čas tisku</b>	50 min
<b>Spotřebovaný materiál dílů</b>	10,43 cm <sup>3</sup>
<b>Spotřebovaný materiál podpor</b>	1,41 cm <sup>3</sup>

Po nastavení všech parametrů a vytvoření řídicího programu byl proveden tisk součástí tiskárnou Dimension *uPrint*, kterou je možno vidět na **obr. 3.19**. Technické parametry 3D tiskárny lze spatřit v **tab. 3.5**. Jedinou věcí, kterou bylo nutno provést přímo u samotného zařízení, bylo stisknutí tlačítka start. Než tiskárna spustila tisk, byl pracovní prostor vyhřát na 74 °C. Po vyhřátí pracovního prostoru na požadovanou teplotu tiskárna spustila tisk součástí. Zařízení pracuje s materiálem *ABSplus*, který je kvalitnější a pevnější než materiál ABS. Použitelnost materiálu je do teploty 82 °C a jeho pevnost dosahuje 36 MPa. V tiskové hlavě byl tedy materiál *ABSplus* roztaven z přívodního plastového drátu při teplotě 293 °C a poté byl nanesen na díly. Jakmile byly součásti vytvořeny, ukončila 3D tiskárna výrobu a základní deska byla připravena k vyjmutí z pracovního prostoru. Poté byly díly odejmuty z podložky a byly jim odstraněny podpurné vrstvy. Poté byly součásti připraveny k použití.

Tab. 3.5 Technické údaje tiskárny Dimension *uPrint* [7].

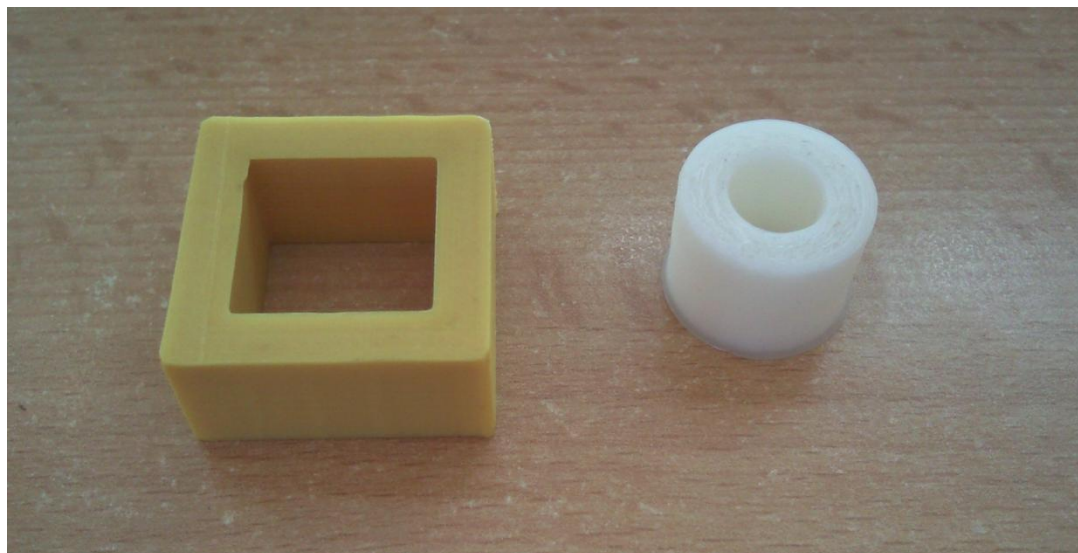
<b>Velikost modelovacího prostoru</b>	203 x 152 x 152 mm
<b>Modelovací materiál</b>	<i>ABSplus</i> plast v barvě slonovinové kosti
<b>Tloušťka vrstev</b>	0,254 mm
<b>Objem kazet modelovacího materiálu a podpory</b>	2 x 490 cm <sup>3</sup>
<b>Software</b>	Catalyst
<b>Kompatibilita</b>	Windows 2000, XP, Vista, 7



Obr. 3.19 Vlevo tiskárna Dimension *uPrint*, vpravo vytištěné porovnávací díly [7].

### 3.5.2 Tisk součástí domácí 3D tiskárnou

Domácí 3D tiskárna pracuje na stejném principu jako profesionální 3D tiskárna. Celý proces tisku byl tedy obdobný jako na profesionálním zařízení. Digitální modely srovnávacích dílů byly nahrány do systému Slic3r. Jakmile byl proveden import modelů a nastavení parametrů, tiskárna byla připravena na výrobu součástí. Nastavení tiskových parametrů bylo provedeno již na zkušebních prototypch, kde bylo optimalizováno veškeré nastavení tisku. Tiskové parametry se tedy nijak výrazně nezměnily. Následně byl vygenerován řídicí program. Než však byl proveden samotný tisk dílů, byl vyhřát pracovní stůl na teplotu 105 °C, což trvalo zhruba 5 minut. Tuto operaci 3D tiskárna provedla z důvodu lepšího přilnutí materiálu na podložku. Po zahřátí tiskového stolku 3D tiskárna provedla nanesení první vrstvy materiálu. Domácí tiskárna tedy nevytvořila základní podpůrné vrstvy, jako je tomu u profesionální 3D tiskárny Dimension  $\mu$ Print. Po nanesení základní vrstvy materiálu byl tiskárnou vytvořen zbytek součástí, které lze vidět na **obr. 3.20**. Použitý materiál byl plast ABS u obou vyrobených součástí. U dílu kruhového tvaru v bílém provedení a u dílu čtvercového tvaru zlaté provedení. Vlastnosti tisku srovnávacích dílů jsou znázorněny v **tab. 3.6**.



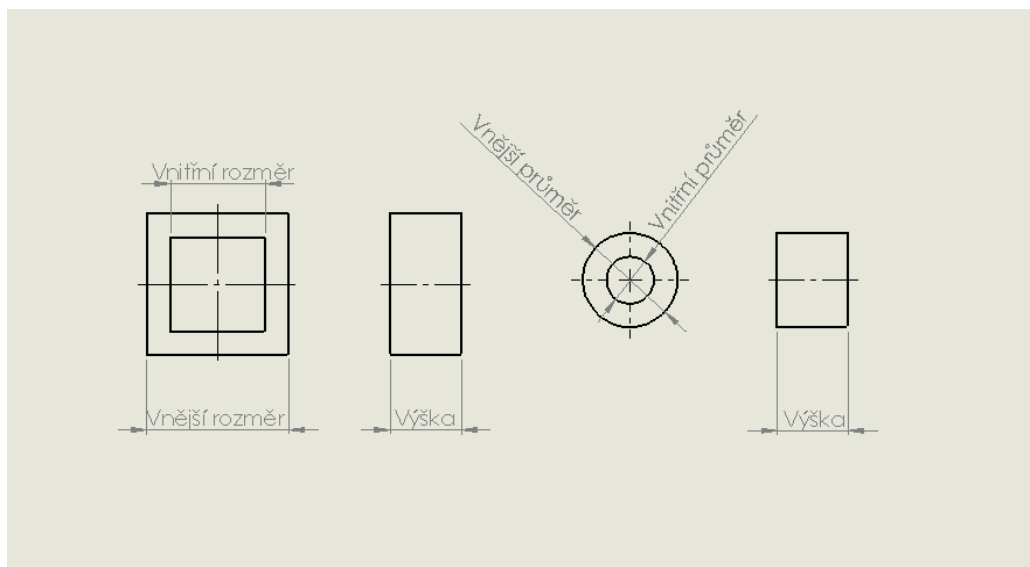
Obr 3.20 Srovnávací díly vytištěné domácí 3D tiskárnou.

Tab. 3.6 Vlastnosti tisku srovnávacích dílů.

<b>Celkový čas tisku</b>	65 min
<b>Spotřebovaný materiál modelu</b>	10,22 cm <sup>3</sup>

### 3.5.3 Měření a vyhodnocení srovnávacích dílů

Porovnány byly základní vnější a vnitřní rozměry vyrobených srovnávacích dílů viz **obr. 3.21**. Měření bylo provedeno na několika plochách součástí a to běžným posuvným měřítkem Kinex - DIN 862, které bylo pro dosaženou přesnost tisku plně dostačující. Následně byly tyto hodnoty zpracovány a vyhodnoceny. Jakmile bylo dokončeno měření a zpracování výsledků, byly hodnoty zaneseny do **tab. 3.7** a **tab. 3.8**. Poté byly porovnány s požadovanými rozměry součástí.



Obr 3.21 Měřené rozměry srovnávacích dílů.

Tab. 3.6 Výsledky měření čtvercového srovnávacího dílu.

Součást 1	Domácí 3D tiskárna			Profesionální 3D tiskárna		
	Vnější rozměr	Vnitřní rozměr	Výška	Vnější rozměr	Vnitřní rozměr	Výška
Měření 1	30,1	20,1	15	29,9	19,9	15,4
Měření 2	30,1	20,0	14,9	30	19,9	15,4
Měření 3	30,2	20,0	14,9	29,9	19,9	15,4
Měření 4	30,2	19,9	14,9	29,9	19,9	15,4
Měření 5	30,2	20,0	15	29,9	20	15,4
Aritmetický průměr ( $\bar{x}$ )	30,16	20	14,94	29,92	19,92	15,4
Skutečná hodnota	30	20	15	30	20	15
Odchylka	0,16	0	0,06	0,08	0,08	0,4

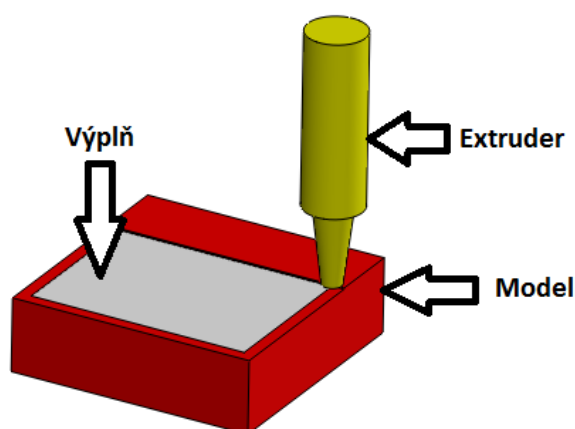
Tab. 3.8 Výsledky měření válcového srovnávacího dílu.

Součást 2	Domácí 3D tiskárna			Profesionální 3D tiskárna		
	Vnější průměr	Vnitřní průměr	Výška	Vnější průměr	Vnitřní průměr	Výška
Měření 1	19,7	9,5	14,9	19,9	9,9	15,4
Měření 2	19,6	9,4	14,8	19,9	9,9	15,4
Měření 3	19,7	9,3	14,8	19,9	9,8	15,4
Měření 4	19,8	9,5	14,9	19,9	9,9	15,4
Měření 5	19,7	9,7	14,9	19,9	9,9	15,4
Aritmetický průměr ( $\bar{x}$ )	19,7	9,48	14,86	19,9	9,88	15,4
Skutečná hodnota	20	10	20	20	10	15
Odchylka	0,3	0,52	0,14	0,1	0,12	0,4

Z naměřených hodnot je patrné, že profesionální 3D tiskárna dosahuje větší přesnosti tisku. Tato skutečnost je ovlivněna několika zásadními faktory. Jednou z hlavních předností profesionální 3D tiskárny je větší tuhost oproti domácímu zařízení. Váha obou 3D tiskáren je také neporovnatelná. Profesionální 3D tiskárny váží několik desítek kilogramů, tudíž vykazují i daleko vyšší stabilitu a tuhost. Hmotnost domácích 3D tiskáren je daleko nižší, pohybuje se maximálně do 10 kilogramů. Tomu odpovídá i celková stabilita zařízení. Největší výhoda profesionální tiskárny oproti domácí je však vyhřívaný pracovní prostor. Vnitřní prostor profesionální 3D tiskárny je vyhříván na teplotu 74 °C. Tato teplota způsobí rovnoměrnější rozložení teploty součásti během tisku a také rovnoměrnější smrštění součásti. Tímto je zabráněno kroucení či vzniku ohybů součásti při tuhnutí. Z naměřených hodnot je zřejmé, že u čtvercového srovnávacího dílu byla přesnost obou tiskáren srovnatelná. U domácí tiskárny bylo dosaženo průměrné odchylky 0,16 mm u vnějších rozměrů čtvercového dílu. U profesionální tiskárny Dimension uPrint bylo dosaženo přesnějšího tisku vnějších rozměrů a to s odchylkou 0,08 mm. Profesionální 3D tiskárna ovšem v obou případech vytvořila srovnávací díly o 0,4 mm vyšší v ose Z, než je skutečný rozměr digitálního modelu. Tato chyba je dána pravděpodobně chybou řídicího systému profesionální 3D tiskárny. Z hodnot naměřených na kruhovém srovnávacím dílu je pak zřejmé, že domácí 3D tiskárna dosáhla nižší přesnosti než profesionální zařízení. Nicméně dosažená přesnost domácí 3D tiskárny je plně dostačující běžným produktům.

### 3.6 Návrh tisku dutých modelů

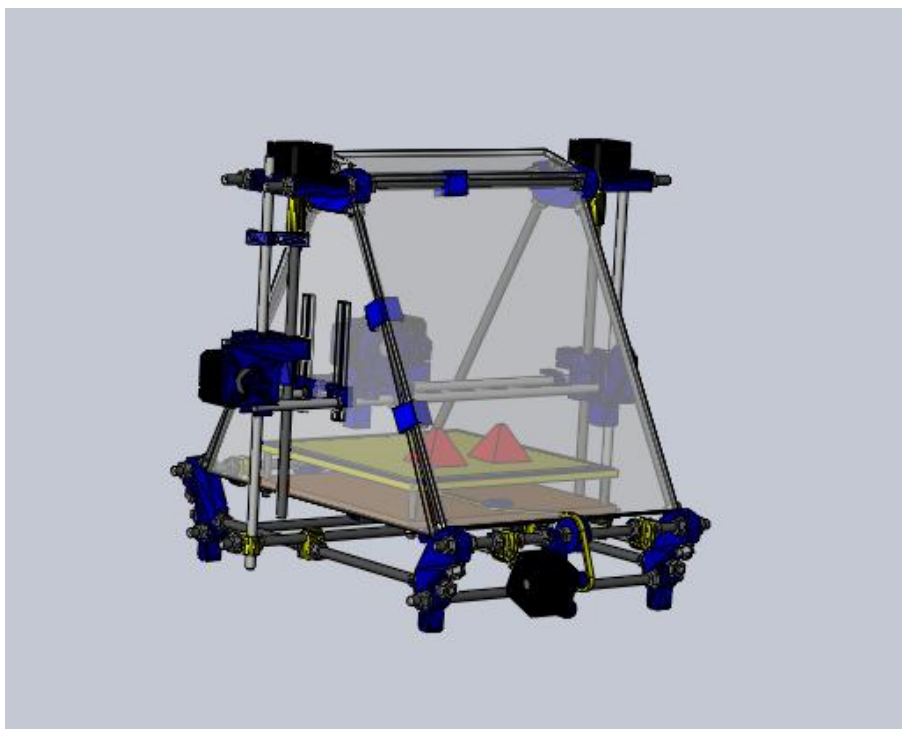
3D tiskárny umožňují tisk mnoha složitých a tvarově náročných dílů. Problém však nastává u dílů dutých a převislých. Vytvoření takto konstruovaných tvarů umožňují však jen některé z aditivních metod. Pro takto navržené součásti je často využíváno metody SLS či DMLS. Tyto metody pracují s práškem, který se spéká laserovým paprskem a tím vzniká součást. Nenatavený prášek slouží jako podpora a po vytvoření součásti lze díl z prášku snadno vyjmout a zbytky prášku rychle odstranit. Metoda FDM pracuje na principu postupného přidávání materiálu na součást. Vnitřní prostor dílu je možno celý vyplnit materiálem nebo vytvořit vnitřní strukturu součásti. Ovšem tato struktura je trvalá. Další způsob výroby složitých součástí je vytvoření podpor, které podepírají díl. Tyto podpory musejí být následně odstraněny. Problém ovšem nastává u dutých součástí, ze kterých podpora nemůže být vyjmuta z důvodů obtížné dostupnosti a není možné ji tedy mechanicky odstranit. Existují však druhy materiálů, které lze za určitých podmínek chemicky či tepelně rozpustit a z dutých či částečně dutých prototypů je odstranit. Ovšem tuto možnost domácí 3D tiskárna neposkytuje. Bylo tedy vhodné najít určitou alternativu tisku. Hlavní problém dutých součástí nastává při vytváření horní části dílu. Jestliže kladený materiál, který je v tekutém stavu nic nepodepírá, dochází k jeho propadání. Kdyby ovšem byla kladná vlákna taveného materiálu podepřena, došlo by k jejich ztuhnutí ve správné poloze a udržení tvaru součásti. Proto byl proveden experiment se sypkým materiálem, který představovala v našem případě kuchyňská sůl. Tímto materiálem byl vyplněn dutý prostor součásti, na kterém byla poté vytvořena horní část dílu. Kladená vlákna byla během tisku podepřena a bylo zabráněno jejich propadání a deformaci. Po vytvoření a ztuhnutí prvních vrstev byl již tavený materiál kladen na pevné vrstvy prototypu. Součást však nemůže být zcela uzavřena. Musí být možné materiál výplně z dutiny odstranit. Je tedy nutné jej opatřit alespoň malým otvorem. Tato metoda umožnila tisk dutých součástí, u kterých bylo nutné zachovat prázdný vnitřní prostor. Použitá zkouška tisku dutých dílů ukazuje možnost vývoje 3D tiskáren, kdy bude použita kombinace jednotlivých metod tisku tak, aby se dosáhlo co největší kvality tisku a byl umožněn tisk součástí, které do této doby činily 3D tiskárnám největší problémy. Schéma metody tisku lze spatřit na **obr. 3.22**.



Obr. 3.22. Schéma tisku duté součásti.

### 3.7 Návrhy na konstrukční úpravu tiskárny

Obrovskou výhodou mají profesionální 3D tiskárny vůči domácím 3D tiskárnám ve vyhřívaném pracovním prostoru. Při tisku je vnitřní prostor tiskárny vyhřát na několik desítek stupňů, což ovšem závisí na typu tiskárny a materiálu, se kterým tiskárna pracuje. Tato teplota způsobí rovnoměrnější rozložení teploty ve vznikající součásti a poté stabilnější ochlazení součásti, čímž je zabráněno kroucení či ohybům. Tento jev není tak zřetelný u malých součástí. Deformace jsou zřejmě zejména při tisku velkých a tenkých dílů. Aby bylo dosaženo lepší kvality tisku a zabráněno dodatečným deformacím, byl vypracován koncept, který je možno spatřit na **obr. 3.23**. Tato úprava by nevýhodu domácí 3D tiskárny odstranila a umožnila tisk součástí v prostoru, kde bude dosaženo vyšší teploty. Jde v podstatě o aplikaci již stávajícího principu profesionálních zařízení na domácí 3D tiskárnu. Nicméně touto úpravou by bylo nutné zkrátit pracovní prostor tiskárny v ose Y o 50 mm důvodů kolizí. Vyhřívání vnitřního prostoru tiskárny by mohlo být provedeno pomocí vyhřívaného stolku, který poskytuje dostatečný výkon a dosahuje teploty okolo 100 °C. V případě, že by toto vyhřívání nebylo dostatečné z důvodu velkých ztrát, mohlo by být do tiskárny zabudováno elektrické vytápění, které by zajistilo dostatečný výkon na vyhřátí vnitřního prostoru a následné dlouhodobé udržení teploty. Kontrola teploty by byla provedena pomocí termistoru a konstantní teplota regulována za pomoci mikroprocesoru. Tímto by bylo docíleno přiblížení domácích 3D tiskáren profesionálním zařízením používaných k tvorbě nejvyšších součástí.



Obr. 3.23 Návrh úpravy domácí 3D tiskárny.

## 4. TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Závěrečná kapitola technicko-ekonomického zhodnocení obsahuje shrnutí výroby a sestavení domácí 3D tiskárny, zejména pak materiálových nákladů. Bylo zde popsáno i možné praktické využití domácí 3D tiskárny a návratnost daného zařízení.

### 4.1 Materiálové náklady

Domácí 3D tiskárna byla sestavena z celé řady použitých součástí. Převážná část těchto dílů byla zakoupena přes internetové servery z důvodu dosažení co nejnižší ceny zařízení. Veškeré materiálové náklady vynaložené na stavbu domácí 3D tiskárny lze spatřit v **tab. 4.1**.

Tab. 4.1. Materiálové náklady na stavbu domácí 3D tiskárny.

Název a typ součásti	Cena za kus	Počet kusů	Cena celkem
Tištěné díly	-	43ks	2 000 Kč
Spojovací materiál – závitové a vodící tyče	-	-	250 Kč
Spojovací materiál – šrouby, matice, podložky	-	-	100 Kč
Ložisko 608 ZZ	40 Kč	10ks	400 Kč
Lineární ložisko LM8UU	20 Kč	10ks	200 Kč
Řemeny Pikron	150 Kč	2ks	300 Kč
Řemenice T5	200 Kč	2ks	400 Kč
Extruder	1300 Kč	1ks	1 300 Kč
Vyhřívaný stolek	550 Kč	1ks	550 Kč
Zdroj 350W	750 Kč	1ks	750 Kč
Kabely a konektory	-	-	200 Kč
Krokové motory SX17-1005	325 Kč	5ks	1 625 Kč
Řídicí deska Sanguinololu – ATMega644	510 Kč	1ks	510 Kč
El. komponenty - Sanguinololu	-	-	287 Kč
Budiče krokových motorů - Pololu1182	270 Kč	4ks	1 080 Kč
<b>Celková cena základních součástí pro stavbu domácí 3D tiskárny</b>			<b>9 952Kč</b>

Cena, za kterou byla sestavena domácí 3D tiskárna nepřesáhla hranici 10 000 Kč. Při porovnání s profesionálními 3D tiskárnami jde jen o zlomek jejich ceny. Komerčně využívané 3D tiskárny poskytované převážně zahraničními společnostmi představují obrovské pořizovací náklady. Cena profesionálních tiskáren pracujících na stejném principu tvorby součástí, tedy metodou FDM, se pohybuje od 300 000 Kč až do 2 000 000 Kč. Profesionální tiskárny však představují vyšší kvalitu tisku a využití celé škály různých materiálů. Nicméně při základních požadavcích na vytváření prototypu je mohou domácí 3D tiskárny plně nahradit a to při několikanásobně nižší pořizovací ceně. Dnes se již mnoho firem začalo zabývat výrobou zjednodušených poloprofesionálních 3D tiskáren, které si drží jednoduchost konstrukce domácích 3D tiskáren a zároveň obsahují prvky zkvalitňující tisk, se kterými pracují profesionální tiskárny. Vzhledem ke stále se rozšiřující popularitě 3D tisku se zvyšuje i konkurence na trhu s těmito zařízeními a tím klesá i jejich pořizovací cena.

#### 4.2 Srovnání ceny tisku

Cena tisku dílů domácí 3D tiskárnou a profesionální tiskárnou Dimension *uPrint* se výrazně lišila. Objem spotřebovaného materiálu byl díky podobnému nastavení obou tiskáren prakticky totožný. Rozdíl ceny byl dán zejména cenou materiálu, se kterým tiskárny pracovaly. Rozdíl byl značný zejména proto, že profesionální tiskárna pracuje s materiálem *ABSplus*, dodávaným výhradně od distributora této tiskárny. Marže na tento materiál je však velmi vysoká a tudíž je vysoká i cena vyrobených dílů. Domácí tiskárna pracuje s materiálem ABS, který má o něco málo horší vlastnosti než materiál *ABSplus*. Tento materiál byl však zakoupen od distributorů přes internetový obchod. Cenu takto nakoupeného materiálu lze tímto snížit až několikanásobně. Náklady na výrobu dílů jsou tedy hlavní výhodou domácích zařízení. Srovnání materiálových nákladů a tím pádem i finančních nákladů na výrobu testovaných součástí lze spatřit v **tab. 4.2**.

Tab. 4.2 Náklady na tisk testovaných součástí

Typ tiskárny	Profesionální 3D tiskárna <i>uPrint</i>	Domácí 3D tiskárna
Spotřebovaný materiál	11,84 cm <sup>3</sup>	10,22 cm <sup>3</sup>
Cena materiálu	14,4 [Kč·cm <sup>-3</sup> ]	1 [Kč·cm <sup>-3</sup> ]
Ceny výroby porovnávacích dílů	170,49 Kč	10,22Kč

#### Srovnání ceny výroby sady dílů profesionálním a domácím zařízením

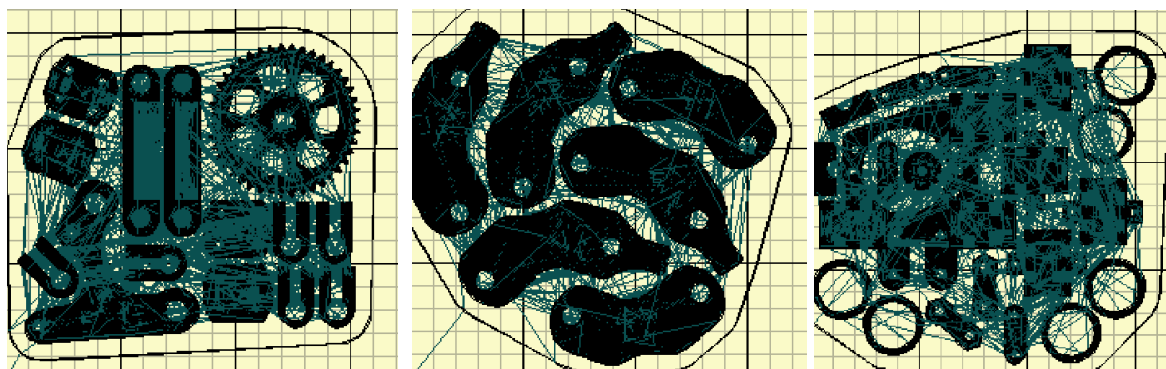
Výroba sady dílů domácí 3D tiskárnou je několikanásobně nižší než profesionálním zařízením. Kdyby byl zvolen před stavbou domácí 3D tiskárny způsob výroby sady dílů profesionální tiskárnou *uPrint*, náklady na materiál by se vyšplhaly na několik tisíc korun, jak je možno vidět v **tab. 4.3**. Je tedy zřejmé, jak velký rozdíl je mezi cenou tisku domácí 3D tiskárnou a profesionální tiskárnou *uPrint*. Profesionální zařízení dosahuje sice lepší kvality tisku, ale u výroby sady díl ke stavbě domácí 3D tiskárny nebyla vyžadována nejvyšší kvalita tisku. Vyrobena sada dílů domácím zařízením byla tedy plně dostačující.

Tab. 4.3 Náklady na tisk sady dílů

Typ tiskárny	Profesionální 3D tiskárna <i>uPrint</i>	Domácí 3D tiskárna
Spotřebovaný materiál	572,67 cm <sup>3</sup>	572,67 cm <sup>3</sup>
Cena materiálu	14,4 [Kč·cm <sup>-3</sup> ]	1 [Kč·cm <sup>-3</sup> ]
Cena výroby sady dílů	8246 Kč	573Kč

### 4.3 návratnost 3D tiskárny

Jedním z možných využití domácí 3D tiskárny je tisk dílů a komponent pro stavbu další 3D tiskárny. Proces seberekoplace umožnil rozšíření domácích tiskáren takřka do celého světa a pomohl k rozvoji 3D technologií. Odhaduje se, že dnes je po celém světě několik desítek, možná stovek tisíc těchto domácích 3D tiskáren a poptávka je stále vysoká. Domácí 3D tiskárna tedy může být využita zejména ke stavbě součástí pro naplnění poptávky na trhu. Celá sada dílů domácí 3D tiskárny obsahuje 43 dílů. Jde o díly různých velikostí a tvarů. Všechny tyto díly je však domácí 3D tiskárna schopna vytvořit svépomocí. Materiál pro výrobu dílů bývá použit plast ABS. Tisk součástí může probíhat zcela automaticky. Obsluha tiskárny spočívá v zapnutí tisku a po jeho dokončení vyjmutí součástí z vyhřívaného stolku a opětovné zapnutí tiskového procesu. Tisk všech komponent je proveden na více sad tisku z důvodů omezení pracovního prostoru zařízení. Díly jsou rozděleny na 4 sady a poskládány na stůl tak, aby bylo využito maximálně pracovního prostoru domácí 3D tiskárny. Celková doba tisku je proto závislá na několika faktorech, zejména pak na rozdělení součástí v pracovním prostoru, ale také i na parametrech tisku, hlavně pak na výšce tiskové vrstvy. Na **obr. 4.1** je možno vidět příklad rozložení součástí v pracovním prostoru.



Obr 4.1 Příklad rozložení součástí v pracovním prostoru.

Celkové materiálové náklady na tisk modelu byly spočteny podle vztahu (4.1)

$$N_s = O_m \cdot C_m \quad (4.1)$$

kde:  $N_s$  [Kč] - materiálové náklady na tisk součástí,  
 $O_m$  [cm<sup>3</sup>] - objem spotřebovaného materiálu,  
 $C_m$  [Kč·cm<sup>-3</sup>] - cena spotřebovaného materiálu.

$$N_s = 572,67 \cdot 1 = 572,67 \text{ Kč}$$

Časová náročnost je plně závislá zejména na nastavení výšky vrstev součástí, která byla zvolena 0,25 mm, což odpovídá kvalitnímu tisku všech dílů. Náklady na energie byly spočteny podle vztahu (4.2)

$$N_e = T_s \cdot P_t \cdot C_e \quad (4.2)$$

kde:  $N_e$  [Kč] - energetické náklady na tisk součástí,  
 $T_s$  [hod] - časová náročnost tisku,  
 $P_t$  [kW] - příkon tiskárny,  
 $C_e$  [Kč · kWh<sup>-1</sup>] - cena energie.

$$N_e = 41,5 \cdot 0,1 \cdot 4,7 = 19,5 \text{ Kč}$$

Cena nejlevnější sady dílů se pohybuje od 1500 Kč. Zisk je tedy dán cenou sady dílů, ze které jsou odečteny náklady na výrobu. Celkový zisk z jedné sady vytištěných dílů byl spočten dle vztahu (4.3)

$$Z_c = C_s - (N_s + N_e) \quad (4.3)$$

kde:  $Z_c$  [Kč] - celkový zisk,  
 $C_s$  [Kč] - prodejní cena sady dílů,  
 $N_s$  [Kč] - materiálové náklady na tisk součástí,  
 $N_e$  [Kč] - energetické náklady na tisk součástí.

$$Z_c = 1500 - (572,67 + 19,5) = 906,83 \text{ Kč}$$

Výsledek ukazuje, že při odečtení všech nákladů na výrobu je zisk z tisku sady dílů pro stavbu domácí 3D tiskárny 906,83 Kč. Při úvaze, že tiskárna může běžet v podstatě 24 hodin denně 7 dní v týdnu takřka bezobslužně, je její návratnost velice rychlá. Náklady na její výrobu činily 9952 Kč, což k rychlé návratnosti není natolik vysoká cena. Nejrychlejší návratnosti lze dosáhnou při 24 hodinové práci 3D tiskárny. Nicméně není vždy možné zajistit 24 hodinový provoz. Proto byly spočteny hodnoty návratnosti pro menší časovou náročnost, které lze spatřit v **tab. 4.4**.

Návratnost tiskárny byla spočtena podle vztahu (4.4)

$$N_t = \frac{C_t}{Z_c \cdot \left(\frac{T_d}{T_s}\right)} \quad (4.4)$$

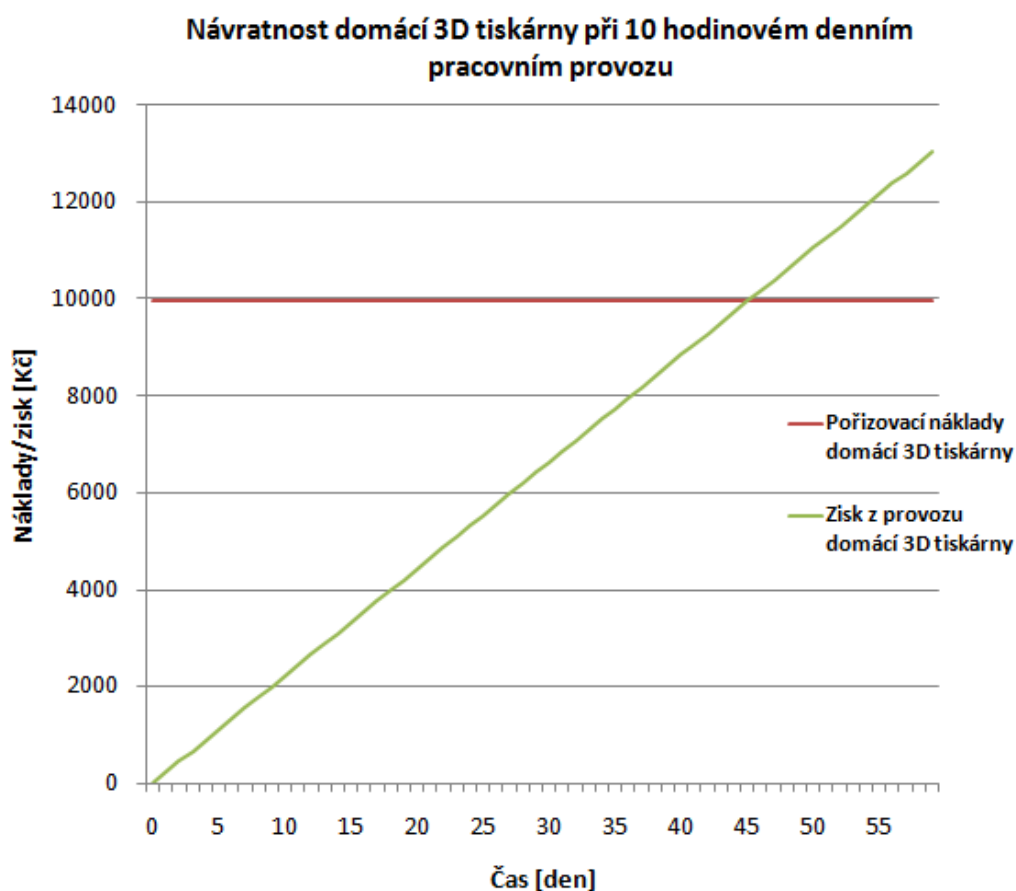
kde:  $N_t$  [den] - návratnost,  
 $C_t$  [Kč] - cena tiskárny,  
 $Z_c$  [Kč] - celkový zisk,  
 $T_d$  [hod] - denní kapacita provozu,  
 $T_s$  [hod] - časová náročnost tisku.

$$N_t = \frac{9952}{906,83 \cdot \left(\frac{24}{40,5}\right)} = 18,51 \cong 19 \text{dnů}$$

Tab. 4.4 Návratnost 3D tiskárny

Délka denního provozu	Návratnost [den]
4 hodinový provoz	112
8 hodinový provoz	56
10 hodinový provoz	45
12 hodinový provoz	37
16 hodinový provoz	28
24 hodinový provoz	19

Návratnost domácí 3D tiskárny výrobou sady dílů je velice rychlá, což je možno vidět na **obr. 4.2**. Časová náročnost tisku záleží na několika faktorech. Doba tisku je ovlivněna zejména výškou vrstvy, která byla v daném případě zvolena 0,25 mm. Jedná se o poměrně nízkou vrstvu, tedy i vyšší kvalitu tisku. Nicméně pro dané díly by bylo možné volit vyšší výšku kladených vrstev a tím i značně zkrátit čas výroby sady dílů. Tisk jedné sady dílů trvá přibližně 40,5 hodin. Celá sada dílů by byla tištěna na čtyřikrát v podobě menších podsestav z důvodů omezení velikosti pracovního prostoru. Čas tisku každé podsestavy je tedy kolem 10 hodin, záleží ovšem na množství dílů a jejich rozložení v pracovním prostoru. Je tedy vhodné v daném případě zvolit 10 hodinový pracovní provoz domácí 3D tiskárny, kdy bude vždy vytištěna jedna podsestava dílů za 1 den. Při jiných časových prozovech by muselo být upraveno množství tištěných dílů tak, aby čas tisku odpovídal požadovanému dennímu provozu 3D tiskárny. Jestliže by byla vytištěna sada dílů pro další tiskárnu, mohly by tyto díly být použity i pro stavbu vlastního zařízení. Tímto systémem sebepublikace by bylo možno získat dostatečné množství dalších domácích 3D tiskáren, které by vyráběly další díly pro uspokojení trhu. Dále by bylo možno tato zařízení kompletovat a prodávat zákazníkům.



Obr. 4.2 Návratnost domácí 3D tiskárny.

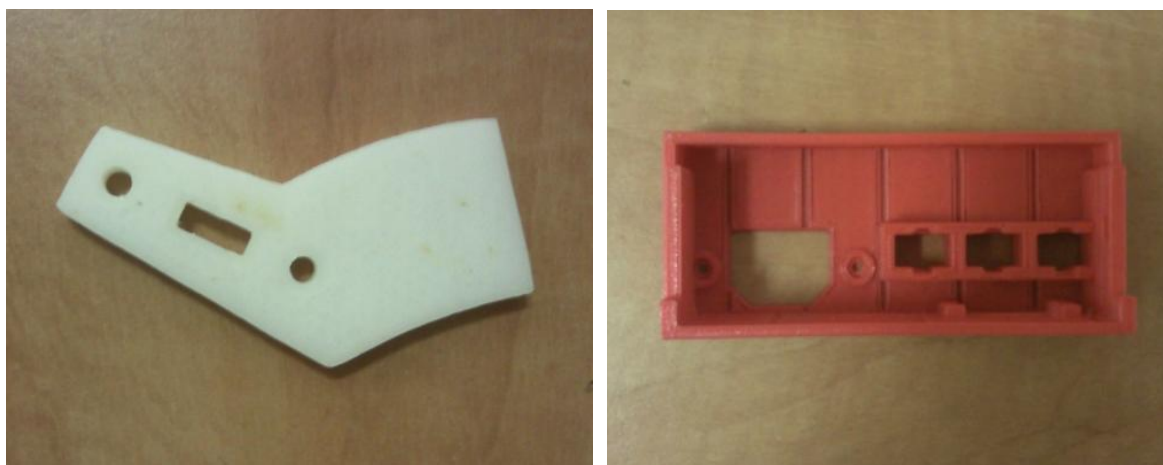
### 4.3 Využití domácí 3D tiskárny

Další z možností využití domácí 3D tiskárny je tisk běžně využitelných součástí. Na internetu se nachází mnoho serverů poskytujících virtuální 3D modely. Tyto modely jsou běžně dostupné a kdokoli si je může stáhnout a vyrobit. Nicméně tyto servery umožňují nahrát digitální modely, které byly námi vytvořeny a tímto je poskytnout dalším uživatelům. Jde tedy o sdílení 3D digitálních modelů na internetu za účelem jejich rozšíření mezi širokou veřejnost. Je tedy velice jednoduché najít jakýkoli 3D model a ten si následně stáhnout a vytisknout na vlastní domácí 3D tiskárně. Takto je možno vyrobit si množství nejrůznějších doplňků do bytu, které plní jak dekorační, tak praktické účely. 3D tiskárnu lze také využít k výrobě součástí, které jsou poškozeny vlivem častého používání, nebo došlo k jejich zničení. Jestliže bychom pro nějaký náhradní díl cestovali do vzdáleného obchodu a tam jej za vysokou cenu zakoupili, je nesrovnatelně jednodušší si tento model stáhnout z internetu či si jej vymodelovat a během chvíle vytisknout. Tímto postupem ušetříme množství času stráveného v dopravních prostředcích, ale i velké finanční náklady, které by musely být vynaloženy. Cena výroby dílů domácí 3D tiskárnou je také velice nízká. Záleží zejména na velikosti dílu či na použitém materiálu. Nicméně cena základních středně velkých dílů se pohybuje v řádech několika korun. Finanční úspora je tedy velmi vysoká. Jako příklad lze uvést součást rukojeti křovinořezu. Zničením jedné banální součásti se stal křovinořez nepoužitelným. Možností jak jej uvést zpět do provozu není mnoho. Náhradní součást je možno vyrobit některou z konvenčních metod, jako je např. obrábění. Materiálové a časové

náklady jsou přitom velmi vysoké. Výroba náhradních dílů tímto způsobem tedy není příliš efektivní. Další možností je zakoupit tento díl v příslušném obchodě. Nicméně velký problém nastává s přístupností náhradních součástí, zejména pak plastových. V době spotřebního zboží totiž nejsou vždy náhradní díly dostupné a jednotlivá zařízení se proto vyhazují. Řešením tohoto problému by mohlo být tisknutí náhradních dílů 3D tiskárnami, zejména pak domácími. Doba výroby a finanční náklady by přitom byly velmi nízké. V **tab. 4.5** jsou uvedeny náklady na opravu křovinořezu. Domácí 3D tiskárnou byla vytisknuta pouze poškozená součást, zatímco běžná oprava by vyžadovala zakoupení celé rukojeti za daleko vyšší cenu.

Tab. 4.5 Porovnání tisku a zakoupení komponenty

Zakoupená součást	525 Kč
Tištěná součást	7,5 Kč
Úspora	517,5 Kč



Obr 4.3 Příklady součástí vyrobených domácí 3D tiskárnou.

## 5. DISKUSE

Tato kapitola obsahuje souhrn výsledků dosažených při stavbě a testování použitelnosti domácí 3D tiskárny. Jsou zde zhodnoceny dosažené výsledky, výhody zařízení a zhodnocena perspektiva k budoucímu využití v praxi.

### 5.1 Sestavení a seřízení domácí 3D tiskárny.

Sestavení domácí tiskárny bylo provedeno ze zakoupených součástí. Dostupnost součástí byla velice dobrá a při jejich nákupu nenastal větší problém. Stavba konstrukce nebyla složitá, k čemuž byla také tato tiskárna zkonstruována. Elektronické vybavení tiskárny je však poměrně složité a je zapotřebí praktických znalostí z elektrotechniky, bez kterých se při sestavování zařízení nelze obejít. Tiskárnu se podařilo sestavit za cenu nepřesahující 10 000 Kč. Tato cena je nižší než prodávané typy domácích 3D tiskáren a podstatně nižší než profesionální zařízení. Po sestavení tiskárny bylo provedeno nastavení tisku v systému Slic3r. Tento systém je volně dostupný a poměrně jednoduchý, což umožňuje snadné používání a obsluhu zařízení. Dále bylo provedeno nastavení tisku tak, aby 3D tiskárna byla schopná vytvářet součásti v co nejvyšší kvalitě.

### 5.2 Zhodnocení výsledků tisku

Po sestavení a seřízení domácí tiskárny byl proveden tisk porovnávacích součástí. Tisk dílů byl proveden na profesionální tiskárně Dimension  $\mu$ Print a následně na sestavené domácí 3D tiskárně. Jakmile byly modely vytvořeny, proběhlo jejich měření a porovnání. Z naměřených výsledků je zřejmé, že profesionální 3D tiskárna dosahuje lepších výsledků tisku, tedy lepší přesnosti tisku než domácí 3D tiskárna. V ose Z ovšem vykazovala chybu 0,4 mm, což je pravděpodobně zapříčiněno chybou řídicího systému. Přesnost tisku je dána větší stabilitou zařízení a zejména vyhřívaným pracovním prostorem profesionální 3D tiskárny. Nicméně výsledky domácí tiskárny nebyly nijak tragické, dokonce předčily očekávání a bylo dosaženo přiblížení se profesionálním 3D tiskárnám. Velkou výhodou domácích 3D tiskáren lze pak spatřit v jejich ceně a zejména pak v nákladech na tisk součástí, které jsou několikanásobně nižší.

### 5.3 Zhodnocení úprav a využití domácí 3D tiskárny

Po provedení tiskových zkoušek a porovnání výsledků byla navržena metoda tisku a úprava domácí tiskárny tak, aby bylo možné se dále přiblížit kvalitě a přesnosti tisku profesionálních 3D tiskáren. Dále v této práci byl zpracován plán návratnosti tiskárny, který spočívá v tisku sady dílů sloužící k replikaci tiskárny a rozšíření mezi širokou veřejnost. Návratnost tohoto zařízení je velmi rychlá, což svědčí o budoucím potenciálu domácích 3D tiskáren. Byl zde také proveden návrh tisku použitelných součástí pro domácnost či poškozených dílů jednotlivých zařízení. Různorodá využitelnost dělá z domácí 3D tiskárny zařízení, které jistě bude velice rychle rozšířeno mezi širokou veřejnost.

## 6. ZÁVĚR

Diplomová práce byla zvolena z důvodu ověření funkčnosti domácí 3D tiskárny, která slouží jako alternativa k profesionálním 3D tiskárnám. V teoretické části práce byla představena technologie *Rapid Prototyping*. Tato technologie se zásadně liší od běžných konvenčních technologií. Jedná se o aditivní technologii, která umožňuje výrobu prototypu daleko rychleji než běžné metody výroby. Výhodou aditivní technologie je zejména rychlost, široká škála materiálů a cena výroby prototypu. V této práci byly dále popsány metody získání digitálních modelů nezbytných pro tuto technologii. Dále zde byly představeny hlavní metody aditivní technologie. V druhé polovině teoretické části byly představeny možnosti využití moderních technologií v nejrůznějších oborech lidské činnosti. V praktické části práce byla sestavena domácí 3D tiskárna. Kompletace zařízení proběhla úspěšně a bylo možné uvedení tiskárny do provozu. Po sestavení byla tiskárna seřizena a bylo provedeno nastavení tiskových parametrů. Seřízení bylo provedeno na testovacím prototypu, na kterém byly patrné nedostatky tisku, které byly následně odstraněny. Jakmile bylo provedeno seřízení 3D tiskárny a správné nastavení všech parametrů, byl proveden tisk porovnávacích dílů. Výroba součástí byla provedena jak na domácí 3D tiskárně, tak na profesionální 3D tiskárně Dimension *uPrint*. Profesionální 3D tiskárna i domácí 3D tiskárna pracují se stejnou metodou tisku *Fused Deposition Modelig*. Vlastníkem profesionální 3D tiskárny je FSI VUT v Brně, kde byl také tisk proveden. Výroba porovnávacích dílů proběhla úspěšně na obou testovaných 3D tiskárnách. Po úspěšné výrobě porovnávacích prototypů byly tyto díly změřeny, aby bylo možné porovnat přesnost tisku obou zařízení. Výsledky byly překvapivé a obě tiskárny dosáhly kvalitního tisku. Při porovnání naměřených hodnot však bylo zřejmé, že profesionální 3D tiskárna dosahuje vyšší přesnosti než domácí 3D tiskárna. Tato skutečnost je dána zejména vyšší stabilitou zařízení a absencí vyhřívaného pracovního prostoru u domácí 3D tiskárny. Vyšší přesnost profesionální 3D tiskárny byla očekávána, nicméně lze považovat za úspěch přiblížení se profesionálnímu zařízení. V práci byl také proveden návrh úpravy tiskárny tak, aby se ještě více přiblížila 3D profesionálním tiskárnám, zejména pak v kvalitě tisku. Na závěr práce bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení. V této části byly shrnuty náklady vynaložené na stavbu domácí 3D tiskárny, zejména pak na použitý materiál. Cena materiálu pro stavbu domácího zařízení byla 9952 Kč, což je v porovnání s cenou profesionálních tiskáren, které se pohybují v řádech statisíců až milionů, zanedbatelná částka. Byl zde také proveden návrh využití zařízení a výpočet návratnosti pro různé alternativy provozu. V této práci se však ukázalo, že propastná cenová relace však neznamená nesrovnatelnou kvalitu tisku, ale přinejmenším možnost přiblížení se výsledkům dosahovaných profesionálními 3D tiskárnami s několikanásobně menšími náklady na výrobu součástí.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PÍŠKA, M. a kolektiv. *Speciální technologie obrábění*. CERM 1.vyd. 246 s.2009. ISBN 978-80-214-4025.
- [2] GEBHARDT, Andreas. *Rapid prototyping*. 1st ed. Munich: Hanser Publishers, 2003, 379 s. ISBN 34-462-1259-0.
- [3] SLOTA, J., MANTIČ, M., GAJDOŠ, I. *Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve*. Košice: Edícia študijnej literatúry, 2010. ISBN 978-80-553-0548-6.
- [4] PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In *Proceedings of the Abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004*. Bratislava: STU, 2004. s. 160. ISBN 80-227-2121-2.
- [5] SEDLÁK, J., PÍŠA, Z. Rapid Prototyping master modelu pomocí CAD/CAM systému. In *Mezinárodní vědecká konference 2005*. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 07.09.2005-09.09.2005. 30 s. ISBN: 80-248-0895-1.
- [6] TMS (The Minerals, Metals & Materials Society): *Rapid Prototyping of Materials*. The Minerals, Metals & Materials Society. 2002, pp. 615. ISBN 0873395301.
- [7] TESÁŘ, J. *Aplikace moderních metod pro výrobu odkládacího stojanu na mobilní telefon*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 70 s. 3 přílohy.  
Vedoucí práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
- [8] ROUNDS, Ryan. Prototype Machining History and Rapid Prototyping Assembly History. [online]. [cit. 2014-02-17]. Dostupné z: <http://ezinearticles.com/?Prototype-Machining-History-and-Rapid-Prototyping-Assembly-History&id=1254470>
- [9] Rapid Prototyping. [online]. [vid. 2014-02-17]. Dostupné z: <https://www.nsf.gov/about/history/nsf0050/manufacturing/rapid.htm>
- [10] Machining. [online]. [vid. 2014-02-20]. Dostupné z: <http://www.mdzmakina.com/?l=en&top=4>
- [11] MM Průmyslové spektrum: Nekonvenční metody obrábění. [online]. 2008 [vid. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
- [12] VÉVODA, A. *Porovnání moderních 3D CAD programů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Dosedla.
- [13] MM průmyslové spektrum. *Digitalizace* [online]. 2004 [vid. 2012-03-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html>
- [14] History of rapid prototyping. [online]. [vid. 2014-02-20]. Dostupné z: <http://www.mechanicalengineeringblog.com/tag/history-of-rapid-prototyping/>
- [15] Tvorba modelu přilby z 3D skenování. [online]. [vid. 2014-02-20]. Dostupné z: <http://mech.fd.cvut.cz/presentation/other/tvorba-modelu-prilby-z-3d-skenovani/>
- [16] 3D digitální technologie: Atos triple scan. [online]. [vid. 2014-02-20]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/atos>

- [17] Fused Deposition Modeling (FDM). [online]. [vid. 2014-02-22]. Dostupné z: [http://www.protoprint.de/Fused\\_Deposition\\_Modeling.html](http://www.protoprint.de/Fused_Deposition_Modeling.html)
- [18] Additive manufacturing. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://www.kaso.com/category/news-post-tags/additive-manufacturing>
- [19] Technologie Rapid Prototyping. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://www.pbsvb.cz/technologie-rapid-prototyping>
- [20] Automotive Rapid Prototyping Services. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://www.model-ease.com/automotive.htm>
- [21] Digital Photonic Production and Its Emerging Opportunities. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://www.lia.org/blog/2013/09/digital-photonic-production-and-its-emerging-opportunities/>
- [22] General Purpose, Accurate, Epoxy Resin for Stereolithography. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: [https://www.mechse.uiuc.edu/rplab/media/sla\\_materials\\_dsm\\_somos\\_protogen\\_ox\\_18420.pdf](https://www.mechse.uiuc.edu/rplab/media/sla_materials_dsm_somos_protogen_ox_18420.pdf)
- [23] Functional Prototyping. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/applications/functional-prototyping>
- [24] Gigantická 3D tiskárna může během dne postavit domovy. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://www.ac24.cz/zpravy-ze-sveta/3379-giganticka-3d-tiskarna-muze-behem-dne-postavit-domovy>
- [25] Foster navrhuje měsíční základny pomocí 3D tisku. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://www.designmagazin.cz/architektura/38816-foster-navrhuje-mesicni-zakladny-pomoci-3d-tisku.html#>
- [26] National Geographic. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://www.national-geographic.cz/detail/video-3d-tiskarna-usnadni-astronautum-zivot-jednoduse-si-vytisknou-to-co-budou-potrebovat-15000/>
- [27] 3D printing. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://www.timesofisrael.com/topic/3d-printing/>
- [28] 3D Printing: Food in Space. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: [http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/home/feature\\_3d\\_food\\_prt.htm](http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/home/feature_3d_food_prt.htm)
- [29] A Guide to All the Food That's Fit to 3D Print. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://www.businessweek.com/articles/2014-01-28/all-the-food-thats-fit-to-3d-print-from-chocolates-to-pizza>
- [30] Dimension 3D Printer Helps Build Success at Paul Davis +Partners. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/resources/case-studies/architecture/paul-davis-and-partners>
- [31] Z Corporation 3D Printed Model Helps Sell New Arena for Stockholm. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://www.newswire.ca/en/story/854505/z-corporation-3d-printed-model-helps-sell-new-arena-for-stockholm>

- [32] 3D printer produces synthetic. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://rt.com/news/printer-3d-synthetic-tissues-396/>
- [33] Digital Dentistry: 3D printing makes digital dentistry happen. [online]. [vid. 2014-02-23]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/industries/dental>
- [34] KOUBEK, M. *Výroba spotřebních doplňků s využitím technologie Rapid Prototyping*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
- [35] Prusa Mendel. [online]. [vid. 2014-05-11]. Dostupné z: [http://reprap.org/wiki/Prusa\\_Mendel\\_%28iteration\\_2%29](http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel_%28iteration_2%29)
- [36] Mouse over image to zoom Details about Reprap LM8UU Prusa Mendel Printed Parts Kit. [online]. [vid. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.ebay.com/itm/Reprap-LM8UU-Prusa-Mendel-Printed-Parts-Kit-/150820586185>
- [37] RepRap - potřebný materiál. [online]. [vid. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://jakub.serych.cz/reprap-potrebny-material>
- [38] Technické parametry krokových motorů řady SX17, SX18. [online]. [vid. 2014-05-11]. Dostupné z: [http://www.jmf.cz/pdf/tp\\_sx1617.pdf](http://www.jmf.cz/pdf/tp_sx1617.pdf)
- [39] Prusa Mendel Visual Instructions. [online]. [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://garyhodgson.com/reprap/prusa-mendel-visual-instructions/>
- [40] CatalystEX 4.0.1®, ©2010 Stratalys Inc. Eden Prairie, MN. Všechna práva vyhrazena [online]. [vid. 2012-04-12] Dostupné z: <http://www.dimensionprinting.com/applications/rapid-prototyping.aspx>
- [41] SolidVision, s. r. o.. *3D CAD CAM CAE PDM – SolidWorks* [online]. [vid. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.solidvision.cz/solidworks/>
- [42] Slic3r: G-code generator for 3D printers. [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://slic3r.org/>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Jednotka	Popis
ABS	-	Akrylonitrilbutadienstyren – označení plastu používaného v 3D tiskárnách
ATOS	-	Advanced Topometric Sensor – označení optického skeneru
CAD	-	Computer Aided Design - počítačem podporované navrhování
CAM	-	Computer Aided Manufacturing - počítačem podporovaná výroba
CNC	-	Computer Numerical Control – označení číslicově řízeného stroje
DMLS	-	Direct Metal Laser Sintering - označení technologie RP
FDM	-	Fused Deposition Modeling - označení technologie RP
IGES	-	Označení výměnného datového formátu
LOM	-	Laminated Object Manufacturing – označení technologie RP
MJM	-	Multi Jet Modeling - označení technologie RP
NC	-	Numerical Control – všeobecné označení číslicově řízeného stroje
např.	-	Například
PC	-	Personal Computer – osobní počítač
RE	-	Reverse Engineering – reverzní (zpětné) inženýrství
RP	-	Rapid Prototyping – rychlá výroba prototypů
SGC	-	Solid Ground Cutting - označení technologie RP
SLA	-	Stereolithography – stereolitografie - označení technologie RP
SLS	-	Selective Laser Sintering - označení technologie RP
STEP	-	Označení výměnného datového formátu
STL	-	Označení výměnného datového formátu
tzv.	-	Takzvaný
UV	-	Ultra Violet – ultra fialová
viz	-	Odkaz na obrázek
2D	-	Two Dimensional „dvourozměrný“
3D	-	Three Dimensional „trojrozměrný“

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota
$C_e$	[Kč·kWh <sup>-1</sup> ]	Cena energie
$C_m$	[Kč·cm <sup>-3</sup> ]	Cena materiálu
$C_s$	[Kč]	Prodejní cena sady dílů
$C_t$	[Kč]	Cena tiskárny
$d$	[mm]	Průměr trysky
$D$	[mm]	Průměr použitého plastového drátu
$D_s$	[mm]	Průměr podávacího šroubu
$f_p$	[mm·s <sup>-1</sup> ]	Posuvová rychlost
$h$	[mm]	Výška vrstvy
$i$	[-]	Převodový poměr extruderu
$L$	[mm]	Výpočtová délka tisku
$L_D$	[mm]	Délka plastového drátu potřebná pro 1 mm tisku
$N_e$	[Kč]	Energetické náklady na tisk součástí
$n_M$	[ot·mm <sup>-1</sup> ]	Počet otáček krokového motoru pro 1 mm tisku
$n_S$	[ot·mm <sup>-1</sup> ]	Počet otáček podávajícího šroubu pro 1 mm tisku
$N_s$	[Kč]	Materiálové náklady na tisk součástí
$N_t$	[den]	Návratnost
$O_m$	[cm <sup>3</sup> ]	Objem spotřebovaného materiálu
$p$	[ot·min <sup>-1</sup> ]	Otáčky krokového motoru při určité $f_p$
$P_t$	[kW]	Výkon tiskárny
$T_d$	[hod]	Denní kapacita provozu
$T_s$	[hod]	Časová náročnost tisku
$V_t$	[mm <sup>3</sup> ]	Objem spotřebovaného materiálu pro 1 mm tisku
$Z_c$	[Kč]	Celkový zisk

**SEZNAM PŘÍLOH**

P1 - Stereolitografie SLA

P2 - Solid Ground Cutting SGC

P3 - Selective Laser Sintering SLS

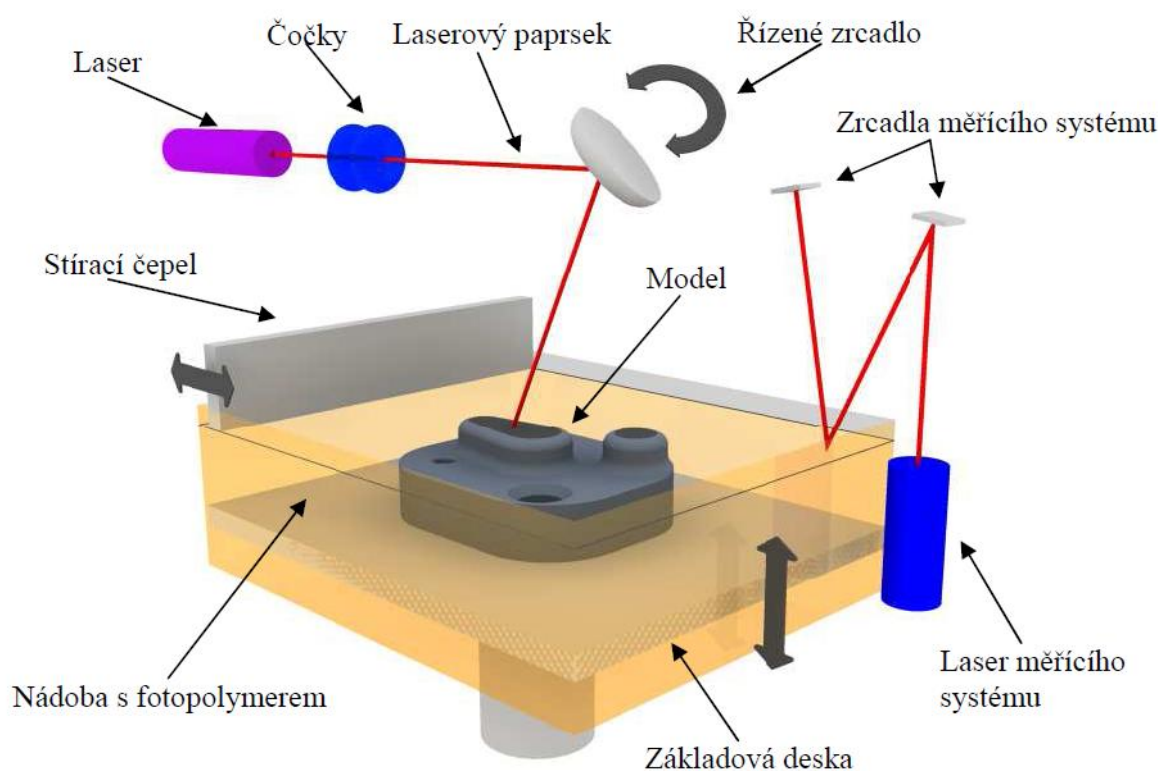
P4 - Direct Metal Laser Sintering DMLS

P5 - Laminated Object Manufacturing LOM

P6 - Multi Jet Modelig MJM

### P1- Stereolitografie SLA

Tato metoda je jednou z nejčastěji používaných a nejpřesnějších výrob prototypů viz **obr. P1.1**. Přesnost výroby prototypů touto metodou se pohybuje v rozmezí od 0,05 až 0,2 mm na 100 mm délky. Zajišťuje přitom relativně rychlou výrobu master modelu. Tento model slouží k následnému použití, často však slouží jen jako prostředek k výrobě formy. Nejčastěji používaným materiálem pro stavbu modelu je epoxidová pryskyřice, která má vhodné vlastnosti k dokončovacím operacím, jako jsou broušení, pískování či leštění. Takto vyhotovený model slouží k vytvoření formy, která umožňuje výrobu až několika desítek plastových dílů z polyuretanu nebo jiných materiálů. Metoda SLA je nejčastěji využívána v automobilovém průmyslu, kdy se na vytvořeném modelu zkouší nejrůznější technologické přípravy a nástroje. Vytvořený model lze také použít k návrhu nebo vizualizaci součásti [2, 3, 7].



Obr. P1.1 Metoda SLA [7].

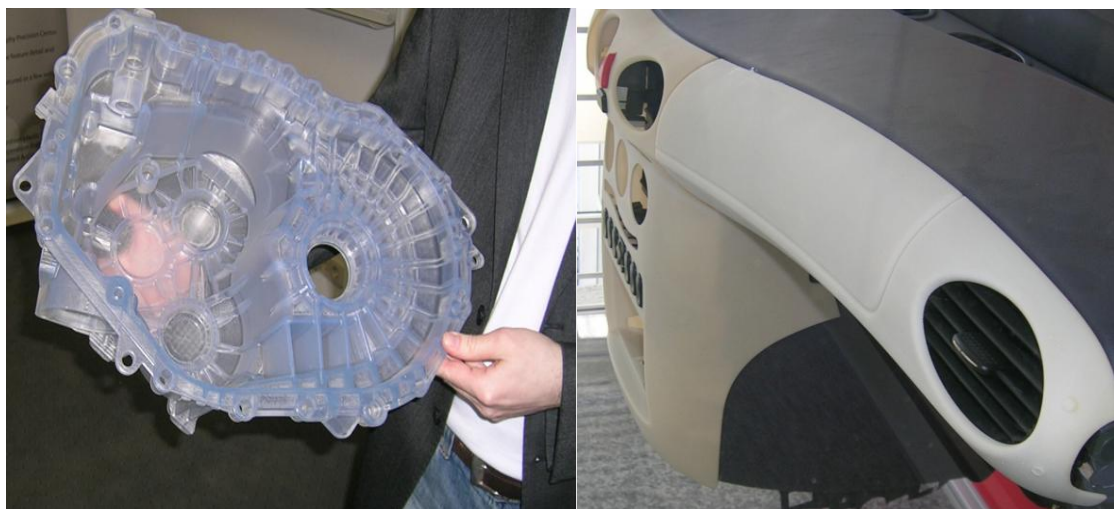
Pracovní komora obsahující epoxidovou pryskyřici či fotopolymer je umístěna na pohyblivé desce. Tato deska vykonává svislý pohyb ve směru Z. Celý proces je řízený počítačem, který je obsažen v řídicí jednotce. Opticko-laserový systém obsahuje pevno-látkový nebo plynný laser, soustavu naklápěcích zrcadel a čočky. Naklápěcí zrcadla slouží k usměrňování paprsku laseru. Model vytvářený metodou SLA je založen na vytvrzování 2D vrstev, které jsou získávány softwarem ze 3D modelu. Síla jednotlivých vrstev se pohybuje v rozmezí 0,05 až 0,15 mm. Nosná deska se po vytvrzení vrstvy posune o tuto vzdálenost směrem dolů. Stírací čepel poté zarovná vytvrzenou pryskyřici na požadovanou tloušťku. Než je však zahájen celý proces tisku, je nutné zbavit virtuální model chyb. Chybami mohou být např. špatně nadefinované hrany modelu. Stabilita součásti je zajištěna pomocí podpor, které jsou vytvořeny ze stejného materiálu jako model. Orientace podpor musí být taková, aby bylo možné jejich snadné oddělení od modelu. Po dokončení tisku je model vyjmut z podpor a upraven dokončovacími operacemi. Vytvořené modely jsou poté připraveny k použití jako na **obr. P1.2** [2, 3, 7].

#### Výhody:

- možnost tvorby i rozměrných modelů,
- přesnost tvaru součásti, která se pohybuje od  $\pm 0,06$  do  $\pm 0,28$  mm,
- obsáhlý výběr materiálů, v současné době komerčně využíváno kolem 20 druhů,
- není třeba přítomnosti pracovníků při obsluze zařízení,
- možnost vytvoření průhledných součástí.

#### Nevýhody:

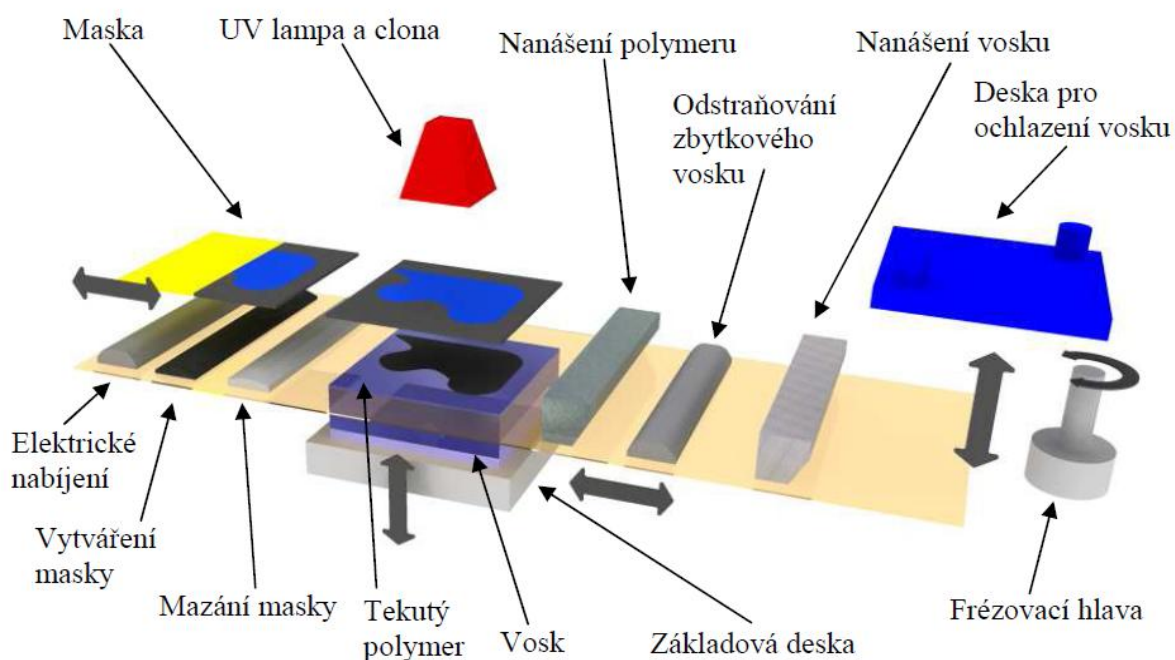
- nutná následná úprava povrchů,
- modely jsou často citlivé na teplo, vlhkost či chemikálie,
- nutné sušení modelu [2, 3, 7].



Obr. P1.2 Modely vyrobené metodou SLA [7].

## P2 - Solid Ground Cutting SGC

Metoda SGC využívá podobného principu jako SLA. Rozdíl těchto metod spočívá v tom, že u metody SGC probíhá vytvrzování vrstvy najednou, jako je zřejmé na **obr. P2.1**, zatímco u metody SLA dochází k vytvrzování vrstev postupně. Metodu vyvinula a uvedla do provozu izraelská společnost Cubital v roce 1987. Společností Cubital byl vyvinut software, který slouží k přenosu 3D součástí do obslužného softwaru zařízení. Tento software také slouží k přípravě dat, která jsou ve formě vrstev vytvořených z virtuálního modelu. Po zpracování dat je na šablonovou desku nanesen speciální toner pomocí ionografického procesu. První fáze tvorby modelu spočívá v nanesení tenké vrstvy fotopolymerní pryskyřice na základní desku. Nad tuto vrstvu je připravena šablonová deska. Díky působení UV lampy je pryskyřice vytvrzena poměrně za krátkou dobu. Výkon této UV lampy je přibližně 4 kW. Pryskyřice, která nebyla vytvrzena, je následně odsáta a nahrazena výplňovým voskem, který slouží jako podpora pro vytvářený model. Vrstvy vytvrzené pryskyřice a výplňového vosku jsou následně odfrézovány, aby bylo dosaženo konstantní výšky. Tento postup je několikrát opakován, dokud nedojde k vytvoření konečného prototypu, který je možno vidět na **obr. P2.2**. Po vytvoření modelu je nutné provést dokončovací práce. Jako dokončovací práce mohou být provedeny dodatečné vytvrzení modelu speciální UV lampou a odstranění voskových podpor pomocí kyseliny citronové, která zlepšuje rozpustitelnost podpůrného vosku [2, 3, 7].



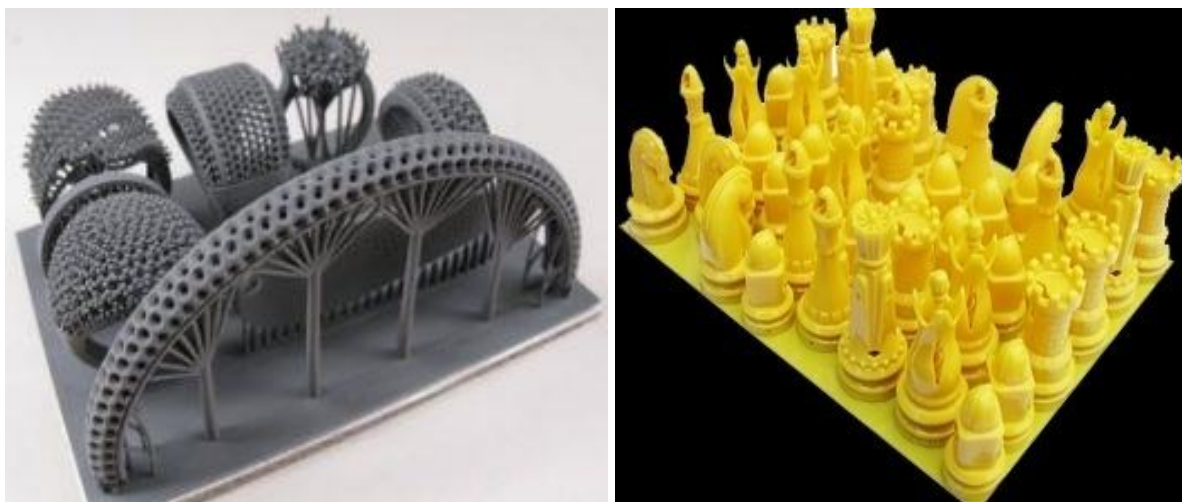
Obr. P2.1 Princip metody SGC [7].

**Výhody:**

- minimální smrštění modelu,
- kvalitní struktura modelu,
- model je po vytvoření velice stabilní,
- tvorba modelu neprodukuje zápach,
- ekonomické využití stavebního materiálu.

**Nevýhody:**

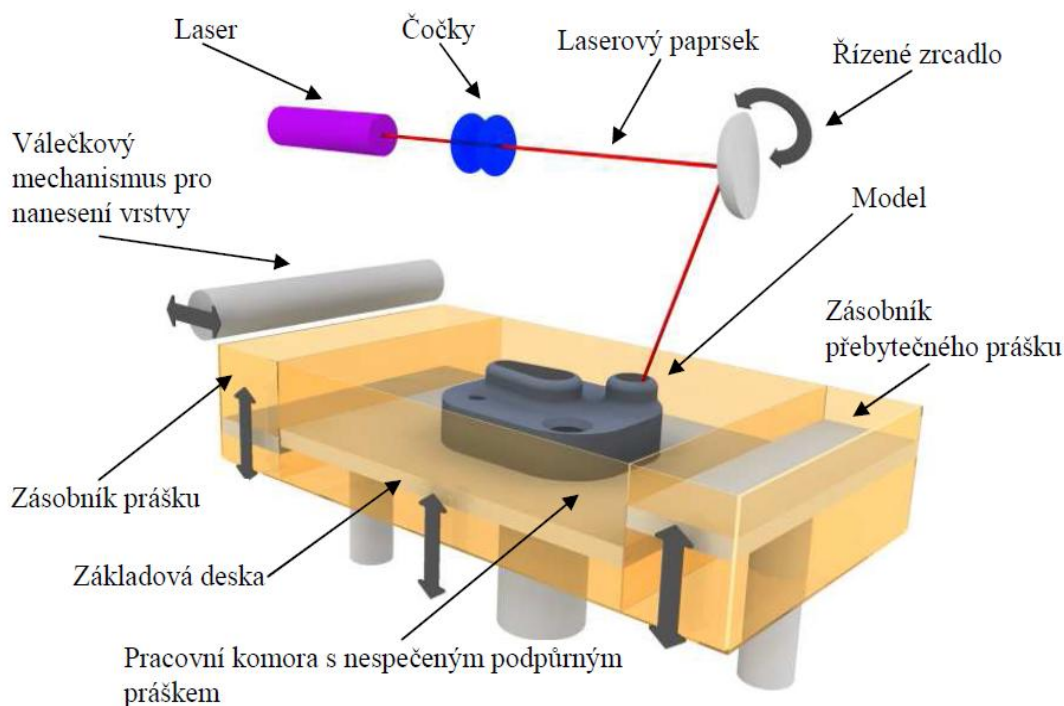
- hlučné zařízení,
- tvorba odpadu,
- ve většině případů jde o rozměrné zařízení [3, 7].



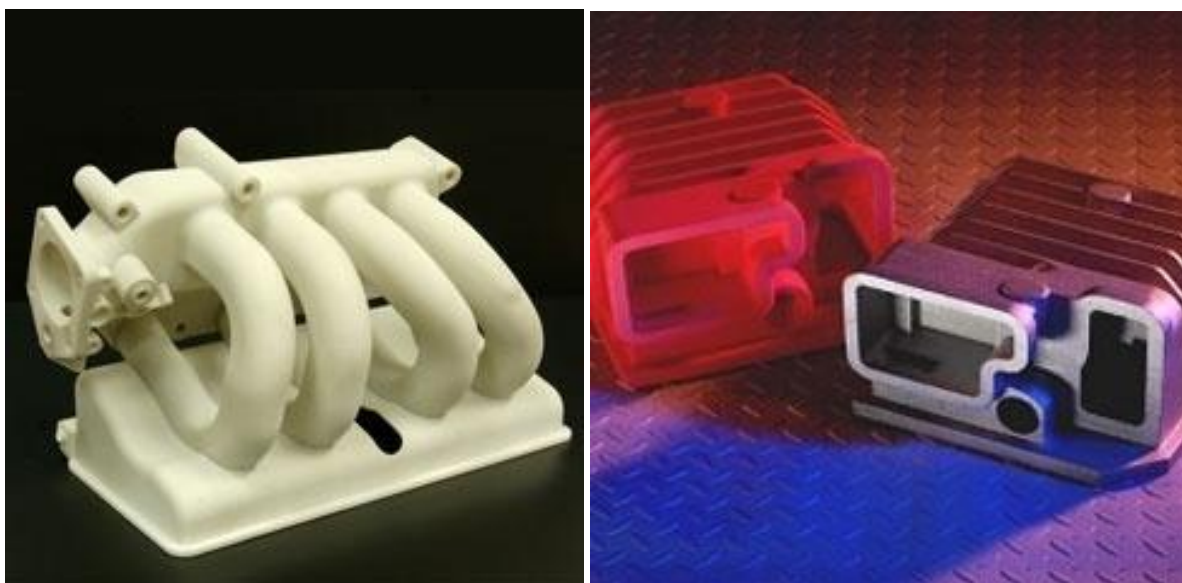
Obr. P2.2 Modely vytvořené metodou SGC [7].

### P3 - Selective Laser Sintering SLS

Metoda SLS, podobně jako předchozí technologie, pracuje na principu postupného přidávání vrstev materiálu na vytvářený díl. Materiálem používaným u metody SLS je velmi jemný prášek o zrnitosti 20 až 100  $\mu\text{m}$ . Vrstvy prášku, kterým je díl tvořen, jsou na model natavovány pomocí  $\text{CO}_2$  laseru viz **obr. P3.1**. Okolní prášek slouží jako podpora a je po vyjmutí modelu odstraněn, proto není třeba u této metody tvorba podpor. Pro zabránění oxidace kovu při natavování je pracovní prostor vyplněn inertním plynem, dusíkem či argonem. První vrstva prášku se nanese na podkladovou desku a je natavena laserem na teplotu tání. Při této teplotě je materiál nataven a dochází ke spečení vrstvy prášku. Intenzitu paprsku zajišťuje řídicí systém tak, aby došlo ke spečení prášku pouze v žádaných místech a okolní nespečený materiál slouží jako podpora součástí. Po dokončení první vrstvy je nosná deska posunuta směrem dolů o výšku jedné vrstvy. Následně dochází k nanesení další vrstvy prášku o konstantní výšce, což zajišťuje speciální válečkový mechanismus. Následně dochází k opětovnému spečení prášku a tento proces je opakován až do vytvoření finálního modelu. Po nanesení poslední vrstvy materiálu je na model nanášeno několik centimetrů prášku, čímž je zajištěno postupné chladnutí modelu. Po vychladnutí je součást odebrána z pracovního prostoru zařízení a následně odstraněna od podkladové desky. Díl je následně nutné upravit dokončovacími úpravami, jako jsou broušení, obrábění, leštění či lakování. Materiály, které jsou využívány touto metodou, jsou různorodé. Patří sem plasty, kovy, pryž a další. Díky použitým materiálům mají vytvořené součásti výborné mechanické vlastnosti. Tato metoda je využívána zejména pro výrobu prototypů, jak je možno vidět na **obr. P3.2**, které jsou určeny k testování pomocí zátěžových zkoušek. Využívají se např. při crash-testech nebo v extrémních podmínkách daného provozu. Další využití metoda SLS nachází při výrobě forem s chladicími kanálky nebo součásti obsahující dutiny [2, 3, 7].



Obr. P3.1 Princip metody SLS [7].



Obr. P3.2 Modely vyrobené metodou SLS [7].

Výhody:

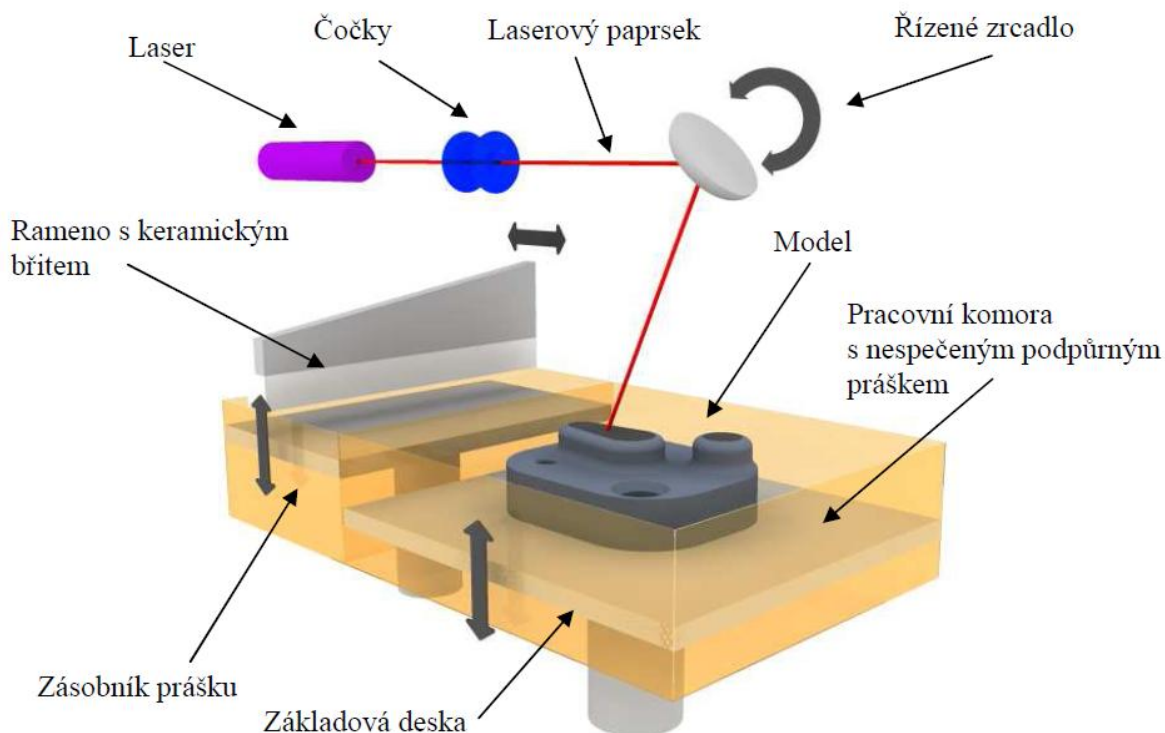
- relativně vysoká pevnost součástí,
- tvorba funkčních prototypů,
- široká škála využitých materiálů,
- tvorba modelu bez podpor,
- není nutné dodatečné vytvrzování.

Nevýhody:

- prostorové a energetické nároky,
- dlouhý čas potřebný na zahřátí a ochlazení zařízení,
- povrch modelu je často pórovitý,
- nižší přesnost,
- nutné dokončení povrchu [2, 3, 7].

#### P4 - Direct Metal Laser Sintering DMLS

Technologie DMLS využívá stejně jako metoda SLS laser, kterým je natavována velmi jemná vrstva prášku viz **obr. P4.1**. Model je vytvářen na speciální ocelové platformě, která umožňuje odvod tepla ze vznikajícího modelu. Na platformu je nanesen jemný ocelový prášek pomocí ramene, které obsahuje keramický břit. Toto rameno rozprostírá ocelový prášek takovým způsobem, aby bylo dosaženo rovnoměrné vrstvy prášku. Laser poté natavuje kovový prášek dle kontury modelu. V místě dopadu paprsku dochází k protavení prášku a podkladové vrstvy, čímž dojde k dokonalému spojení materiálu a následnému tuhnutí do pevného stavu. Proces je opakován až do vzniku kompletní součásti. Pracovní komora pro stavbu modelu bývá většinou vyplněna inertními plyny, nejčastěji argonem či dusíkem. Inertní plyny vytváří v komoře dostatečnou ochrannou atmosféru pro zamezení vzniku oxidace materiálu. Během stavby dochází k fixaci modelu podpurnou strukturou, která je připojena k ocelové platformě a je vytvářena současně s výrobkem. Po vytvoření konečného dílu je podpora odstraněna. Povrch součásti je následně nutno upravit několika dokončovacími operacemi jako jsou broušení, tryskání, leštění a další. Využitelnost použitých materiálu bývá u této metody poměrně vysoká. Až 98 % materiálu, který nebyl nataven při tvorbě součásti, je možné znovu použít k tvorbě dalších prototypových součástí. Tato hodnota využití materiálů je značně vysoká v porovnání s ostatními technologiemi, jako jsou obrábění nebo odlévání. Technologie DMLS umožňuje tvorbu menších až středních součástí, přičemž je splněna přesnost a funkčnost vyrobených prototypů. Je možné vytvářet velice odolné, avšak vysoce přesné komponenty, které se uplatňují v automobilovém, leteckém a strojním průmyslu viz **obr. P4.2**. Stále častěji je tato technologie využívána také ve zdravotnictví k tvorbě dentálních náhrad, implantátů nebo speciálních nástrojů [2, 3, 7].



Obr. P4.1 Princip metody DMLS [7].

## Výhody:

- vysoká pevnost modelů,
- široké spektrum použitelných materiálů,
- výroba plně funkčních prototypů srovnatelných s klasickými součástmi,
- není nutné dodatečné vytvrzování či tepelná úprava,
- vysoké využití materiálu,
- výroba modelu je plně automatizována.

## Nevýhody:

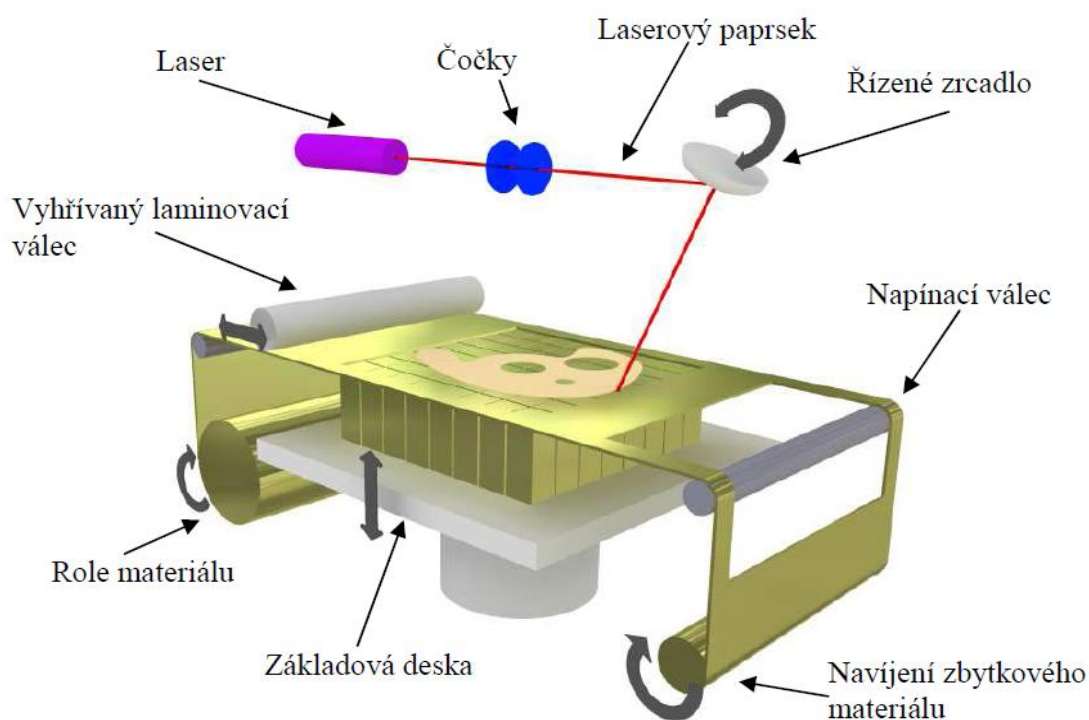
- prostorová a energetická náročnost zařízení,
- výrobky vykazují nízkou kvalitu povrchu,
- časově náročné zahřátí a ochlazení zařízení,
- u některých modelů nutná stavba podpor,
- nutnost zařadit do procesu dokončovací operace [2,3,7].



Obr. P4.2 Prototypové díly vyrobené technologií DMLS. Vlevo prototypový díl z kobalt-chromu, vpravo řez vložkou s vnitřním chlazením z martenzitické oceli [7].

### P5 - Laminated Object Manufacturing LOM

Jedná se o metodu využívající materiály v podobě fólií jako na **obr. P5.1**. Fólie z použitého materiálu jsou přilepeny k předchozí vrstvě. Toto přilepení umožňuje speciální nátěr, kterým je fólie opatřena. Pomocí laseru je vyřezán samotný tvar kontury modelu. Tloušťka pokládané fólie odpovídá tloušťce modelové vrstvy. Technologie LOM využívá pouze jednoho typu materiálu. Tento materiál tvoří model i jeho podpůrnou strukturu. Do příslušného softwaru jsou data zasílána ve formátu STL, kde jsou dále zpracovány. Následně je model rozdělen na jednotlivé vrstvy. S ohledem na velikost modelu a jeho tvar je nutno před zahájením výroby zvolit měřítko modelu a umístění modelu v pracovním prostoru. Na nosnou desku je položena jedna vrstva materiálu, která je následně ořezána přibližně 20 mm od okraje budoucího modelu. Zbytek vzniklé plochy pokryje oboustranná lepicí páska. Rám je tvořen kvádry o tloušťce 3 až 8 mm a šířce 25 x 25 mm. Tento rám je umístěn přímo na samotné nosné desce a zabraňuje kroucení modelu během procesu výroby. Kladení jednotlivých vrstev fólií na sebe vytváří samotný prototyp. Pomocí přítlačného tlaku je zajištěno dostatečné spojení těchto vrstev. Přítlačný tlak zajišťuje válec, který je zahřátý na 330°C. Tato teplota je důležitá pro aktivaci pojiva, které se nachází na spodní straně fólie. Laser následně vyřezává kontury jednotlivých vrstev prototypu. Celý proces nanášení vrstev je opakován až do samotného vytvoření kompletních prototypových součástí, které je možno vidět na **obr. P5.2**. [2,3,7].



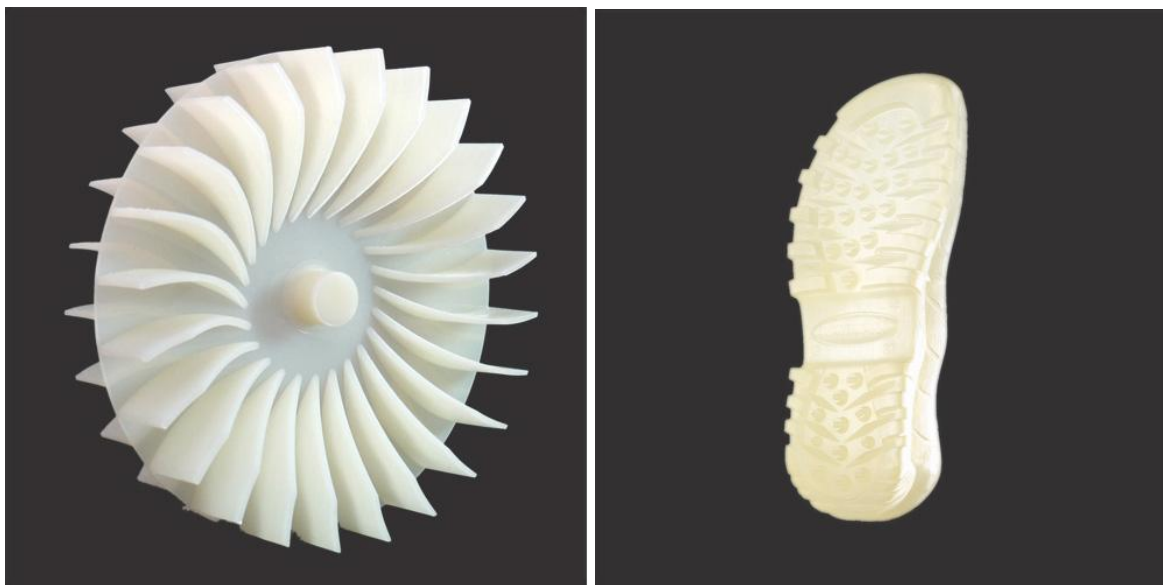
Obr. P5.1 Princip metody LOM [7].

**Výhody:**

- možnost využití velkého množství materiálů,
- vysoká rychlost práce zařízení,
- přesná metoda tvorby modelu,
- eliminace smrštění,
- model je tvořen bez podpor,
- tvorba větších součástí v porovnání s ostatními metodami RP,
- vysoká pevnost modelu,
- možnost dodatečné úpravy modelu,
- nízké materiálové náklady (papír, plast).

**Nevýhody:**

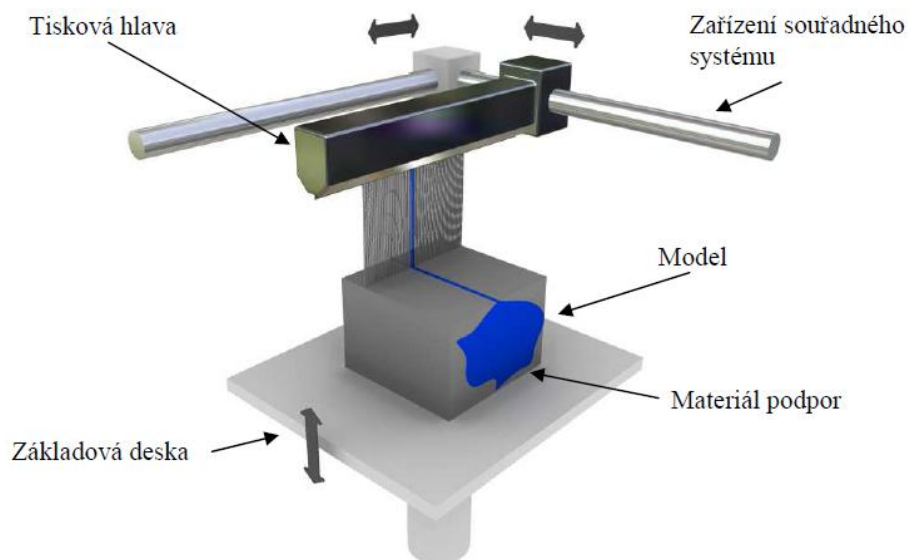
- metoda je nevhodná pro modely s tenkou stěnou,
- pevnost modelu závisí na použitém modelu,
- mírný dým a zápach při procesu tvorby modelu,
- vysoká spotřeba materiálu [2, 3, 7].



Obr. P5.2 Prototypové díly vyrobené technologií LOM [7].

### P6 - Multi Jet Modelig MJM

Metoda MJM pracuje zejména s materiály jako termopolymer nebo vosk. Princip je založen na nanášení jednotlivých vrstev materiálu, čímž vzniká model součásti jako na **obr. P6.1**. K nanášení je použita tisková hlava, která je tvořena až 352 tryskami. Nanášecí trysky jsou rozloženy rovnoběžně vedle sebe v délce 200 mm. Celý tento systém nanášení je ovládán softwarem, který řídí jak dávkování materiálu jednotlivými tryskami, tak i jejich pohyb. Součást je vytvořena na základní desce, která se posouvá pouze v ose Z. Základní deska je vždy po nanášení vrstvy materiálu posunuta směrem dolů o výšku nanášené vrstvy. Pracovní hlava vykonává pohyb v osách X, Y a nanáší drobné kapky materiálu, které tvoří jednotlivé vrstvy součásti. Požadovanou součást lze získat ve velice krátkém čase postupným opakováním celého procesu. Při stavbě modelu se současně vytváří i podpory, které je nutno po ukončení stavby dílu odstranit [2, 3, 7].



Obr. P6.1 Princip metody MJM [7].

#### Výhody:

- ekonomické využití materiálu,
- jde o poměrně jednoduché zařízení,
- rychlá metoda výroby prototypu.

#### Nevýhody:

- nízká přesnost vytvářeného modelu,
- možnost tvorby pouze menších součástí,
- omezený výběr materiálu,
- nutné odstranění podpor [2, 3, 7].

