



RAPID PROTOTYPING V PROTOTYPOVÉ VÝROBĚ PLECHOVÝCH VÝLISKŮ

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Tomáš Váňa**
Vedoucí práce: Ing. Petr Zelený, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Váňa**
Osobní číslo: **S13000478**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**
Název tématu: **Rapid prototyping v prototypové výrobě plechových výlisků**
Zadávací katedra: **Katedra výrobních systémů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je nalézt a ověřit možnosti využití technologií Rapid Prototyping pro výrobu specifických nástrojů pro tváření plechu, které budou sloužit k zjednodušení a zrychlení výroby prototypových výrobků dodávaných do elektronického průmyslu.

Zásady pro vypracování:


1. Shrnutí poznatků o metodách rapid prototyping
2. Výroba prototypového nástroje metodami rapid prototyping
3. Ověření funkčnosti nástroje vyrobeného metodami rapid prototyping
4. Vyhodnocení výsledků a porovnávání se stávající metodou výroby prototypových nástrojů



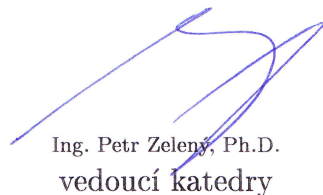
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **60 stran textu včetně příloh**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] NOORANI, R. *Rapid Prototyping: principles and applications*. Hoboken: John Wiley and Sons, 2006. ISBN 0-471-73001-7.
[2] JACOBS, P. F. *Stereolithography and other RP and M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling*. New York: ASME Press, 1996. ISBN 0-87263-467-1.
[3] GIBSON, I., D.W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.
[4] HOPKINSON, N., R. HAGUE a P. DICKENS. *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. Chichester: Wiley, 2006. ISBN 978-0-470-01613-8.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Zelený, Ph.D.**
Katedra výrobních systémů
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jaroslav Stryal**
LAIRD TECHNOLOGIES s.r.o.
Datum zadání diplomové práce: **14. listopadu 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2015**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 14. listopadu 2014

Prohlášení

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

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Petru Zelenému, Ph.D. za důležité připomínky, věnovaný čas a cenné rady při vypracování této práce.

Dále děkuji panu Ing. Jaroslavu Stryalovi za pomoc a ochotu při realizaci praktické části diplomové práce a také společnosti Laird.

Velké poděkování patří také mé rodině a přítelkyni za podporu nejen při psaní diplomové práce, ale během celého mého studia.

Anotace

Diplomová práce se zabývá výrobními postupy Rapid prototyping. Zaměřuje se na aplikaci těchto technologií do výrobního procesu firmy Laird.

Cílem práce je nalézt a ověřit možnosti využití technologií Rapid prototyping pro výrobu specifických nástrojů pro tváření plechu, které budou sloužit ke zjednodušení a zrychlení výroby prototypových výrobků dodávaných do elektronického průmyslu.

Výsledkem je vyhodnocení testovaných technologií a stanovení té nejvhodnější pro výrobní proces dané firmy.

KLÍČOVÁ SLOVA: (Rapid prototyping, 3D tisk, lisovací nástroj, Stereolitografie, Solid Ground Curing, Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Fused Deposition Modeling, Laminated Object Manufacturing, InkJet, Multi-Jet Printing, PolyJet)

Annotation

The diploma thesis deals with manufacturing techniques of Rapid prototyping. It focuses on application of these technologies in production process of the Laird company.

The goal of the work is to find and verify possibilities of utilization of Rapid prototyping technologies in production of specific tools for sheet metal forming which would help simplify and accelerate the manufacture of prototype products supplied for the electronic industry.

The result is an assessment of the tested technologies and determination of the technology which is the most suitable for the production process in the given company.

KEYWORDS: (Rapid prototyping, 3D printing, Press tool, Stereolitografie, Solid Ground Curing, Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Fused Deposition Modeling, Laminated Object Manufacturing, InkJet, Multi-Jet Printing, PolyJet)

Obsah

1	Úvod	- 10 -
2	Cíle práce	- 10 -
3	Vývoj 3D tisku	- 11 -
3.1	Historie.....	- 11 -
3.2	Současnost	- 11 -
3.3	Budoucnost	- 12 -
4	Rapid prototyping	- 13 -
4.1	Postup procesů při výrobě modelu.....	- 14 -
4.1.1	Pre-processing.....	- 15 -
4.1.2	Processing	- 16 -
4.1.3	Post-processing	- 16 -
4.2	Přehled technologií 3D tisku	- 17 -
4.2.1	Stereolitografie (SLA)	- 17 -
4.2.2	Solid Ground Curing (SGC)	- 19 -
4.2.3	Selective Laser Sintering (SLS).....	- 21 -
4.2.4	Direct Metal Laser Sintering (DMLS).....	- 24 -
4.2.5	Three Dimensional Printing (3DP).....	- 26 -
4.2.6	Fused Deposition Modeling (FDM)	- 28 -
4.2.7	Laminated Object Manufacturing (LOM)	- 30 -
4.2.8	InkJet a Multi-Jet Printing	- 33 -
4.2.9	PolyJet	- 35 -
4.3	Souhrn základních vlastností metod RP	- 37 -
5	Experimentální část	- 38 -
5.1	Popis lisovacího nástroje.....	- 38 -
5.2	Současný způsob výroby nástrojů.....	- 39 -
5.3	Výroba prototypových nástrojů metodami RP	- 40 -
5.3.1	Orientace prototypů v prostoru tiskárny	- 40 -
5.3.2	Výroba metodou FDM.....	- 41 -
5.3.3	Výroba metodou SLM	- 43 -
5.3.4	Výroba metodou PolyJet	- 45 -
5.3.5	Dodané prototypové nástroje.....	- 47 -

5.4	Rozměrová přesnost nástrojů	- 48 -
5.5	Zkušební výroba prototypovými nástroji	- 49 -
6	Vyhodnocení výsledků.....	- 57 -
6.1	Rozměry prototypových nástrojů	- 57 -
6.2	Porovnání rozměrů prototypových nástrojů.....	- 58 -
6.3	Rozměry výlisků.....	- 58 -
6.4	Porovnání rozměrů výlisků.....	- 61 -
6.5	Porovnání časů potřebných pro výrobu nástrojů	- 64 -
6.6	Porovnání cen nástrojů	- 65 -
7	Závěr.....	- 66 -
	Seznam použité literatury	- 68 -
	Seznam příloh.....	- 1 -
	Příloha I: Výměnné sady prototypových nástrojů.....	- 2 -
	Příloha II: Základní mechanické vlastnosti použitých materiálů	- 4 -

Seznam použitých zkratek

ABS - Akrylonitril-butadien-styren

CAD - Computer Aided Design

CAM - Computer Aided Manufacturing

CNC - Computer Numeric Control

DMLS - Direct Metal Laser Sintering

FDM - Fused Deposition Modeling

LOM - Laminated Object Manufacturing

MIT - Massachusetts Institute of Technology

NASA - National Aeronautics and Space Administration

OM - Ohybová matrice

OR – Ohybový razník

PA - Polyamid

PB - Přidržovací blok

PC - polykarbonát

PE - Polyethylén

PPS - Polyfenylsulfid

RP - Rapid prototyping

SGC - Solid Ground Curing

SLA - Stereolitografie

SLM - Selective Laser Melting

SLS - Selective Laser Sintering

SS – Souřadnicový stroj

STL - Stereolithography File

TUL - Technická univerzita Liberec

UV - Ultraviolet

3DP - Three Dimensional Printing

1 Úvod

V dnešním, vysoce konkurenčním prostředí je snaha firem zkracovat výrobní časy na minimum, od vývoje až po samotnou výrobu. Jednou z možností, jak docílit zkrácení časů prototypové výroby nástrojů a jejich testování, je využití metod Rapid prototyping. Pomocí těchto metod lze výrobu nástrojů urychlit a také flexibilněji reagovat na případné úpravy nástrojů a jejich opakovanou výrobu. Uplatnění lze nalézt i v kusové výrobě tvarově složitých součástí. Při použití metod Rapid prototyping není potřeba žádných speciálních nástrojů, jako tomu může být v případě konvenční výroby. Tím se výroba stává ekonomičtější a efektivnější oproti standartním výrobním postupům. Využitím metod Rapid prototyping lze též prezentovat představy konstruktérů či designerů na hmatatelných vzorcích dříve, než dojde k samotné výrobě.

Zavedení těchto metod je však důležitým a strategickým rozhodnutím firmy. Proto je potřeba toto rozhodnutí doložit analýzou prokazující vhodnost a ekonomičnost pro daný provoz.

2 Cíle práce

Hlavním cílem této diplomové práce je ověřit a navrhnout možnost začlenění metod Rapid prototyping do výrobního procesu firmy Laird. Snahou je dosáhnout rychlejší výroby prototypových nástrojů a tím urychlit celý výrobní proces jednotlivých zakázek.

Firma Laird se zabývá výrobou dílů pro elektrotechnický průmysl, převážně prvků pro odstínění elektromagnetického záření. Její výrobky jsou používány pro širokou škálu oborů a produktů. Výsledný výrobek je rozměrově a tvarově uzpůsoben požadavkům zákazníka a jeho konečnému použití. Z tohoto důvodu je nutné vždy začínat konstrukcí jednotlivých výrobních nástrojů dle tvaru požadovaného výrobku. Po dokončení konstrukce následuje výroba prototypu nástroje a s jeho pomocí výroba menšího množství funkčních vzorků. Až po ověření rozměrové přesnosti výrobku je teprve možné začít s hromadnou výrobou.

Práce je rozdělena do tří základních částí. V první, teoretické části jsou podrobně popsány jednotlivé technologie RP. Druhá, experimentální část se zabývá samotnou výrobou prototypových nástrojů metodami RP a jejich testováním. V poslední části jsou prezentovány výsledky testů, které určují vhodnost použití metod RP pro firmu Laird.

3 Vývoj 3D tisku

3.1 Historie

Vznik 3D tisku se datuje do druhé poloviny 20. století, kdy si Charles Hull nechal v roce 1986 patentovat technologii stereolitografie. Tato technologie spočívá v trojrozměrném laserovém tisku s využitím UV laseru a tekutého fotopolymeru. Před koncem 90. let pak Hull pod hlavičkou své firmy (3D Systems) vytvořil první zařízení tisknoucí v 3D formátu pro širokou veřejnost, tzv. stereolitografický aparát SLA-1. V této době ještě nenesl název 3D tiskárna, avšak metoda SLA se stala základem pro vývoj 3D tisku [1].

Vznik konkurence na sebe nenechal dlouho čekat a koncem 80. let se začaly objevovat podobné nové technologie FDM a SLS. Technologie FDM byla vytvořena Scottem Crumpem. Na ní založil firmu Stratasys, která tuto technologii využívá dodnes [2].

Moderní historie trojrozměrného tisku začala v roce 1993, kdy si slavná americká instituce MIT nechala patentovat prostorové tiskové technologie pod názvem 3 Dimensional Printing. Její koncept využíval analogii s inkoustovou technologií běžných dvouprostorových tiskáren, přičemž materiál předmětu vznikal s pomocí práškového materiálu a lepidla. Patent si licencovala firma Z Corporation, dnes součást firmy společnosti 3D Systems [2].

3.2 Současnost

V roce 2000 přišla izraelská firma Objet Geometries s technologií zvanou Polyjet. Jak název napovídá, využívá pro prostorový tisk fotocitlivý polymer. Tímto krokem začala éra trojrozměrného tisku, jak ji dnes známe [2].

Právě plasty stály za vznikem současného zájmu o technologii 3D tisku. Jejich využití je jednoduché a technologicky i energeticky nenáročné. Vývoj však nezůstal pouze u plastů. Technologicky lze tiskové hlavy upravit a nastavit např. i pro vosk, písek nebo kov. Množství možných použitelných materiálů velice rychle roste a tím tato technologie získává použitelnost napříč mnoha obory. Již v dnešní době si získává reputaci na poli medicíny, kde se daří vytvářet náhrady chrupavek, částí lebky a dalších.

3.3 Budoucnost

Přesný vývoj nikdy nelze na sto procent určit, avšak technologie 3D tisku má před sebou velkou budoucnost. Díky jejímu rychlému vývoji a i klesající ceně zařízení se stává dosažitelnou i pro běžného uživatele. Tento trend bude nejspíše i nadále růst, až se zařízení pro 3D tisk stane běžnou součástí každé domácnosti.

Důležitou roli začíná získávat i v dobývání vesmíru. Vesmírná agentura NASA se již snaží vyvinout 3D tiskárnu použitelnou ve vesmíru. Její vývoj sice nebude jednoduchý, protože vliv nulové gravitace znamená zcela jiné podmínky při tvorbě modelu, ale její přínos bude znamenat obrovské úspory v podobě snížení hmotnosti přepravovaných zásob.

3D tisk již proniká i do odvětví, kde se ani neočekávalo jeho uplatnění a tím je např. potravinářství. Už dnes vznikají první potravinářské tiskárny, které využívají technologii FDM a materiálem pro tisk je čokoláda. Její použití otevírá nové možnosti v podobě tvorby cukrovinek libovolných tvarů. I v tomto oboru lze očekávat postupný vývoj, jednou třeba nahradí i klasické vaření a pečení.

4 Rapid prototyping

Zprvu je nutné vysvětlit pojem Rapid prototyping a jeho význam. Z počátku se 3D tisk označoval jako Rapid prototyping (rychlá výroba prototypů) a to z důvodu užití výlučně pro výrobu prototypů. Příchodem dostupných tiskáren se tento trend změnil, ale jeho označení přetrvává dodnes [3].

Rapid prototyping (RP) je tedy termín, který označuje procesy zaměřené na rychlou tvorbu fyzických součástí z virtuálního 3D modelu pomocí 3D tiskárny. Tyto součásti pak velmi přesně odpovídají patřičnému virtuálnímu modelu. Rozdíly vznikají v závislosti na užití technologii tisku a jejich vlastnostech [3].

Všechny procesy RP jsou aditivní. Díly jsou stavěny směrem vzhůru postupným přidáváním materiálu po vrstvách a jeho spékáním či vytvrzováním. V tomto je zásadní rozdíl oproti klasickým technologickým procesům, při kterých dochází k odebrání materiálu až do vzniku požadovaných rozměrů [3].

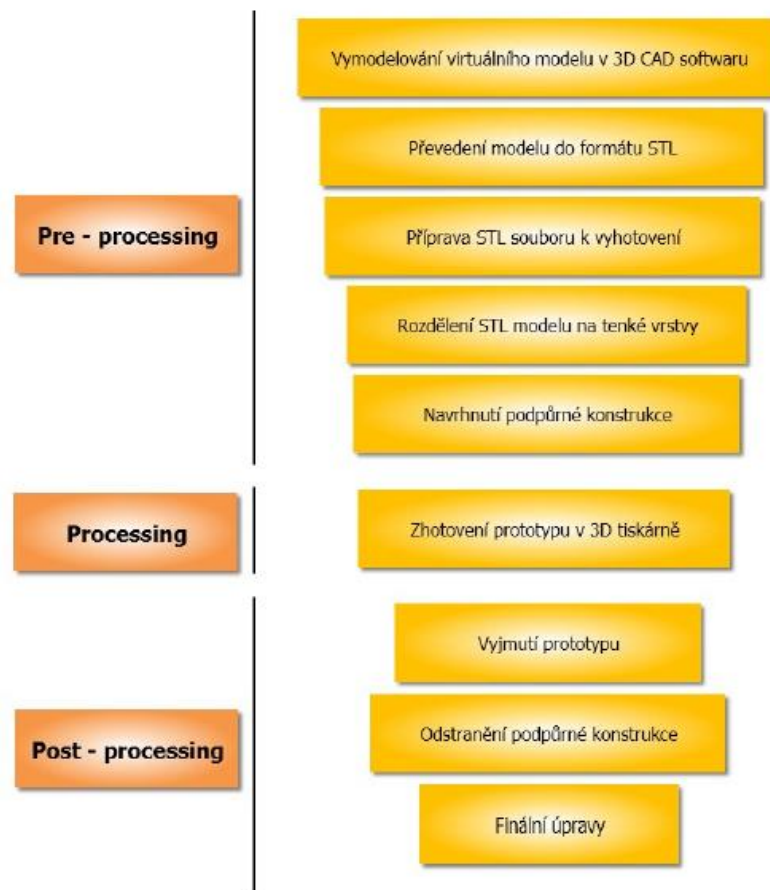
Hlavní výhodou těchto technologií je její nezávislost na tvaru a složitosti vyráběné součásti. Libovolně komplikovaný díl je vytvořen z jediného kusu materiálu, přestože jeho výroba pomocí konvenčních výrobních postupů by byla velmi složitá či dokonce nemožná. Vyrábět lze i uzavřené prostory. Pro možnost právě takového vrstvení materiálu se využívá tzv. nosného materiálu. Tento materiál se nanáší obdobně jako materiál pro stavbu dílů, ale slouží pouze jako podpora pro převislé části výrobku, aby nedošlo k jejich zhroucení. Podpurný materiál je nutné z výrobku po jeho dokončení odstranit. Využití RP může pomoci odstranit velké množství ruční a strojní práce spojené s výrobou prototypů pomocí tradičních metod, stejně tak umožnit rychlou a opakovatelnou výrobu zkušebních návrhu v různých fázích vývoje. Také na rozdíl od složitého CAM a CNC programování je použití softwaru a stroje pro RP obecně jednodušší, což může mít za následek výrazné snížení počtu potřebných zaměstnanců. Některá zařízení jsou tichá a lze je pustit i v kancelářském prostředí, nezpůsobují tedy hluk ani prach a nemají řadu bezpečnostních otázek jako v případě strojů pro obrábění.

Nicméně obráběním lze v současnosti stále vyrobit hladší povrchy, přesnější rozměry a využít mnohem širší škálu dostupných materiálů než RP. Materiálů pro RP je stále k dispozici jen omezené množství, ale jejich počet roste. V dnešní době se využívá

řada plastů a pryskyřic, u některých procesů může být s výhodou využit materiál jako vosk, škrob, sádra nebo kov [3].

4.1 Postup procesů při výrobě modelu

Celý proces výroby lze rozdělit do 3 základních fází. Jedná se o pre-processing neboli přípravu modelu pro výrobu. Processing, obsahující samotnou výrobu a post-processing zahrnující dokončovací operace na již vytvořeném výrobku. V každé z těchto fází je sled operací, které je nutné vykonat pro zhotovení správného a funkčního prototypu. Tyto kategorie resp. kroky znázorňuje *obr. 1*.

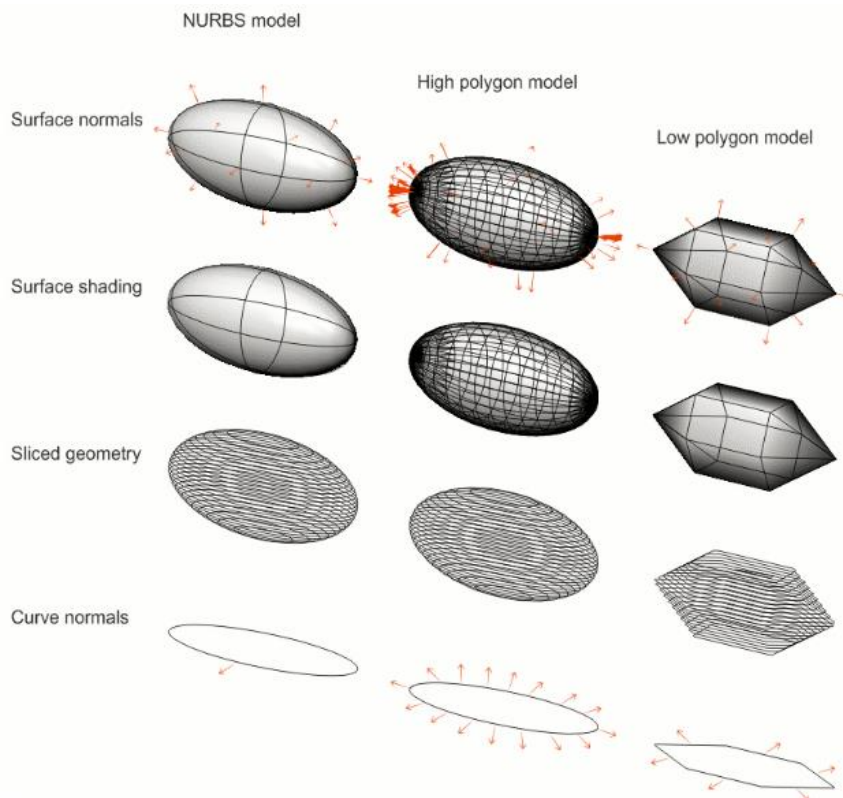


Obr. 1: Rozdělení procesů Rapid prototyping

4.1.1 Pre-processing

Jedná se o první fázi ve výrobě modelu. V prvním kroku je nutné vytvořit budoucí výrobek pomocí některého z CAD systémů. Aby mohl být fyzický model vytvořen, musí vstupní data nést úplné informace o geometrii tělesa [3].

Pro další využití tohoto modelu je potřeba soubor převést do formátu STL, se kterým pracují všechna zařízení RP. Při převodu formátu dochází k aproximaci geometrie modelu na polygonovou síť. Ta je složena z trojúhelníkových ploch, které mají pomocí normály určenou orientaci (vnitřní/vnější). Přesnost modelu je dána hustotou trojúhelníkové sítě (*obr. 2*) a ovlivňuje i přesnost výsledného výrobku, proto je nutné ji volit s ohledem na jeho velikost a požadovanou přesnost výroby. Pokud je tedy hustota sítě velmi jemná, může reprezentovat přibližně hladký povrch s určitým stupněm přesnosti. V případě příliš hrubé sítě nebo velkého množství úhlů mezi trojúhelníky model působí hrubě (hranatá geometrie) a postrádá přesnost [3] [4].



Obr. 2: Hustota polygonové sítě [3]

Posledním krokem je příprava STL modelu pro výrobu. Vytvořená virtuální součást v STL formátu je pomocí pre-processingového softwaru vhodně umístěna a orientována do výrobního prostoru 3D tiskárny. Tento krok je důležitý pro výslednou časovou náročnost tisku a také pro množství použitých vrstev pro postavení modelu. Vhodnou orientací lze ovlivnit i množství použitého podpůrného materiálu pro převislé části. V závěru dojde k rozdělení modelu na jednotlivé vrstvy, podle kterých bude součást stavěna. Tloušťka vrstev je závislá na použité technologii RP a pohybuje se mezi 0,01 mm až 0,7 mm. Tento software pro výrobu je dodáván každým výrobcem společně se zařízením pro tisk [5].

4.1.2 Processing

V tomto kroku dochází k samotné stavbě modelu. Pro většinu systému RP je tato fáze zcela automatická, není proto nutná přítomnost obsluhy stroje během celého procesu výroby. V pracovním prostoru dochází k cyklickému opakování základních kroků. Načtení aktuální vrstvy, rozvrstvení materiálu dle průřezu a jeho vytvrzení (podle použité technologie). Poté dojde ke sjetí pracovní plochy o tloušťku vrstvy a celý proces se opakuje, až do kompletního dokončení celého modelu. Doba stavby modelu je úměrná jeho velikosti a geometrii, proto se může pohybovat od jednotek až do desítek hodin [5].

4.1.3 Post-processing

Jedná se o poslední část ve výrobě součásti, ta je v tuto chvíli již vyrobena a nachází se v pracovním prostoru stroje. Lze tedy do této dokončovací fáze zahrnout veškeré úkony, které se konají po dokončení výroby a zastavení stroje. Často je nutné materiál nechat určitý čas ve stroji a nevyndávat ho ihned po výrobě, aby došlo k jeho zchladnutí. V některých případech ještě není materiál po vyjmutí ze zařízení plně vytvrzen a je tedy náchylný na mechanické poškození, proto je potřeba dbát na opatrnou manipulaci. Určité metody tedy vyžadují dodatečné dotvrzení modelů pod UV zářením, nebo vypálením v peci [5].

Závěrem dojde k finální úpravě pomocí dokončovacích operací, ty jsou různé podle principu technologie výroby, použitého materiálu, ale i podle požadované funkce výrobku. V zásadě se jedná o odstranění nepoužitého materiálu, odstranění nosných podpor a povrchovou úpravu. Jelikož jsou většinou po tisku na součásti vytvořeny tzv. schůdky, je nutné plochy obrousit případně funkční plochy obrobit [5].

4.2 Přehled technologií 3D tisku

Zařízení RP je velké množství, obecně je lze rozdělit do 3 kategorií podle používaného stavebního materiálu. Pracují tedy buď na bázi fotopolymery (SLA, SGC, PolyJet) či na bázi práškových materiálů (SLS, 3DP, DMLS) nebo na bázi tuhých materiálů (LOM, FDM, Jet Printing).

Tato kapitola představuje několik základních technologií RP, jejich výhody, nevýhody a možnosti použití. Lze se setkat i s mnoha dalšími, ty však vycházejí z podstaty těchto technologií a jsou pouze upraveny pro jejich specifické použití.

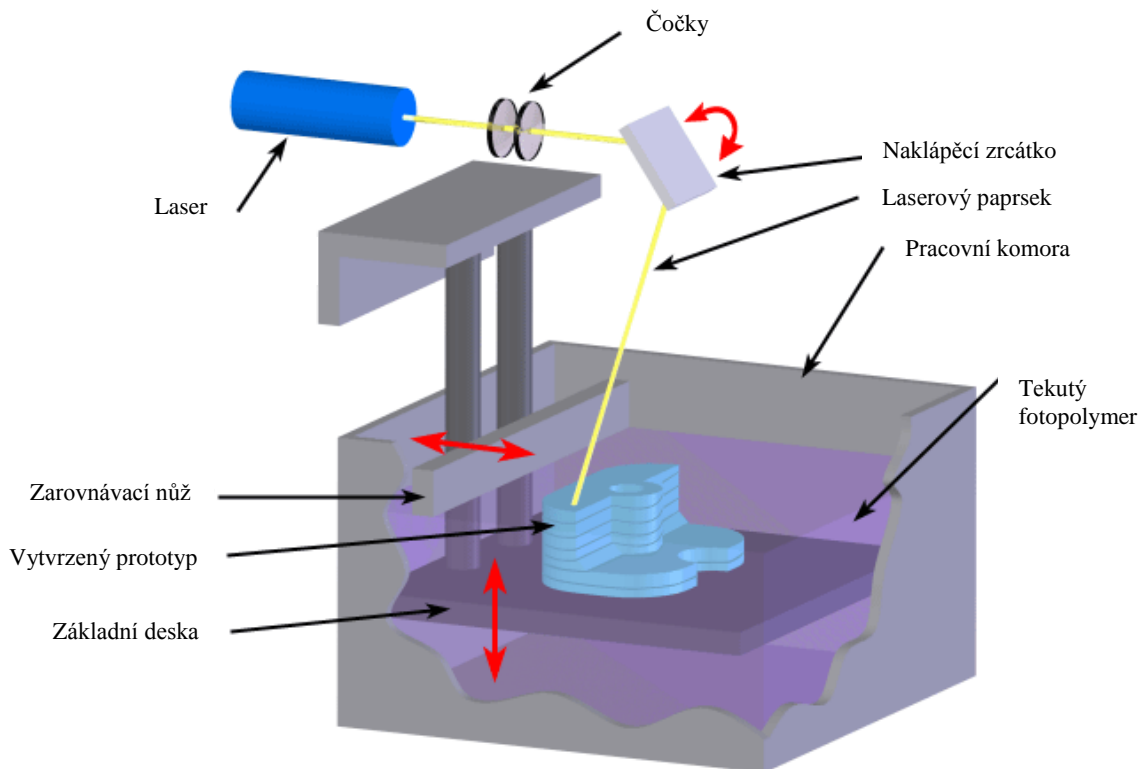
4.2.1 Stereolitografie (SLA)

Jedná se o technologii, která stála na počátku vzniku všech metod rychlého prototypování a je využívána dodnes. Její základní princip, stavění výrobku po vrstvách, vychází z již dlouhou dobu známého principu výroby litografických vrstev. Je zde využito schopnosti některých akrylátových nebo epoxidových pryskyřic (fotopolymerů) vytvrzovat pod UV zářením. Tento princip byl později využit v dalších, nově vzniklých metodách rychlého prototypování [6].

Stereolitograf (*obr. 3*), tak se nazývá zařízení používané pro tuto metodu, se skládá z několika hlavních částí. Jedná se o pracovní komoru, řídicí systém, pohybový systém a opticko-laserový systém [7].

Stavební materiál, tedy tekutá pryskyřice, je uložen v pracovní komoře, ve které se pohybuje v ose Z pracovní stůl a nůž zajišťující konstantní tloušťku vrstvy. Na hladinu pryskyřice se zaměřuje úzký paprsek s UV zářením. Na základě dříve vytvořených informací o rozměrech příčných řezů jednotlivými vrstvami, jsou vypočítány řídicí údaje, které vedou paprsek laseru. Při dopadu paprsku na hladinu dochází pomocí přenesení energie z laserového paprsku do materiálu, k vytvrzení. V místě dopadu UV paprsku je vytvořen bod ve tvaru polokoule. Průměr této polokoule, určující výšku jednotlivých vrstev, je určen tloušťkou působícího paprsku. U této metody se výška vrstvy pohybuje od 0,05 mm do 0,15 mm. Po vykreslení a vytvrzení vrstvy dojde k poklesu pracovní desky právě o hodnotu tloušťky řezu, srovnání hladiny nožem a následně k dalšímu opakování tohoto procesu, dokud není pomocí rovinných vrstev postaven celý model. Vlivem intenzity zářícího světla probíhá vytvrzení ve velmi krátké době, a proto se mů-

že paprsek po hladině pohybovat poměrně vysokou rychlostí. Po ukončení stavby se model umyje od nevytvrzené pryskyřice, odstraní se podpory, na kterých byl fixován k základní desce a dá se vytvrdit do UV komory. Ve stavbě modelu a rychlosti vykreslení jednotlivých vrstev je tato technologie stále řazena na přední místa v produktivitě výroby [3] [6] [7].



Copyright © 2008 CustomPartNet

Obr. 3: Stereolitografie [8]

Opticko-laserový systém je tvořen laserem, soustavou zrcátek a zaostřovacích čoček. Využívá se laser pevnolátkový, plynový nebo HeCd (helium-kadmium) laser. V prvních zařízeních RP byly využívány pouze plynové lasery a to z důvodu jejich nízké ceny proti tehdy drahým pevnolátkovým. Dnes jsou však na ústupu a do popředí se dostávají HeCd lasery, jejichž využití je velmi časté. V ojedinělých případech se lze setkat i s lasery argonovými, ty však mají příliš velkou energetickou náročnost a navíc vyžadují robustní chlazení. Laserový UV paprsek je veden soustavou zrcátek a zaostřovacích čoček na dvě pohyblivá zrcátka s navzájem kolmou osou rotace. Tato zrcátka mají za úkol pohybovat paprskem po hladině tak, aby vykreslila požadovaný tvar řezu výrobku [6].

Pohybový systém stroje snižuje pracovní desku v ose Z po každé vytvořené vrstvě na hladině Zároveň má funkci vyrovnávání a uklidnění hladiny pryskyřice po klesnutí vykreslené vrstvy pod hladinu. První vrstvy slouží k připevnění budoucího modelu na pracovní desku. Hodnota tloušťky vrstvy je závislá na dvou parametrech. Musí být dostatečně velká, aby byla úměrná potřebné produktivitě výroby, ale zároveň dostatečně malá pro zajištění požadované přesnosti výroby ve vertikálním směru. Omezení pro tloušťku vrstvy může vzniknout vlivem výkonosti laseru a schopnosti použité pryskyřice dostatečně vytvrdit určenou tloušťku [6].

Řídicí systém se stará o součinnost všech jednotlivých systému podílejících se na stavbě modelu. Má informace o všech zadaných parametrech použité pryskyřice. Jeho důležitou činností je eliminace vzniku nežádoucí vysoké teploty v určitých oblastech při dlouhém vykreslování na malé ploše. Řešení jsou možná dvě, buď se vykreslování v určitou chvíli přesune do jiné oblasti, nebo dojde k vložení prodlevy výroby, při kterém se paprsek zatmí [6].

Tato technologie vyniká svou přesností, pohybující se v rámci $\pm 0,05$ mm. Lze vytvářet modely s milimetrovými otvory a miniaturními prvky. Další velkou výhodou je množství použitelných materiálů, dobrá povrchová drsnost, možnost velkého stavebního objemu (pracovní plochy až 1500x700x500) [4] [9].

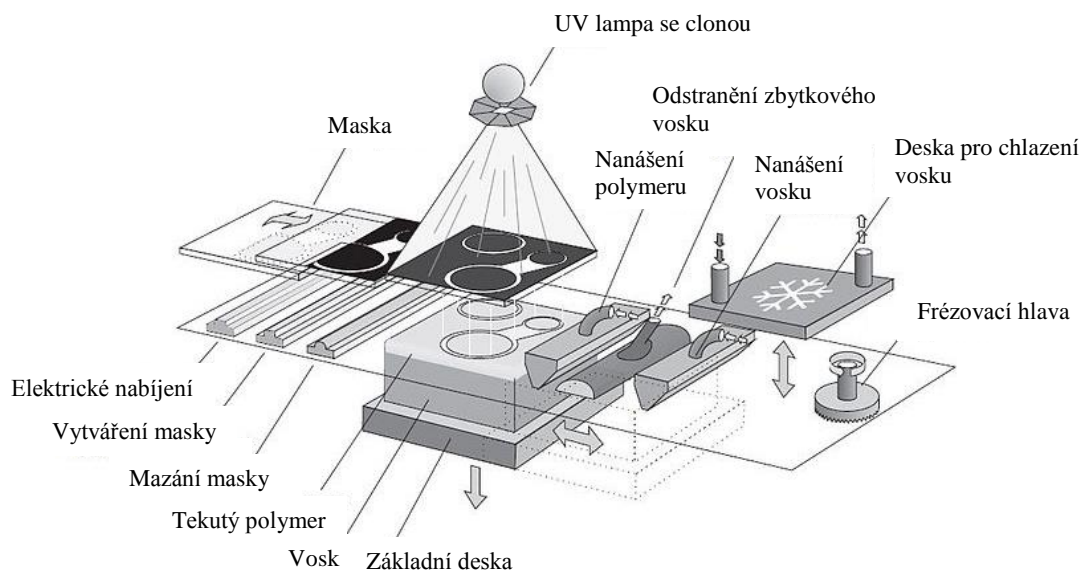
Mezi nevýhody lze zařadit křehkost vyrobených dílů a toxicitu používané pryskyřice. Dalšími zápory jsou nákladnost na použitý materiál (musí vždy vyplnit celou pracovní komoru), nutnost udržování stroje v klimatizovaných místnostech (většina pryskyřic je navlhavá), přeprava vyrobených dílů je možná pouze v sušivu (silikagel). Nevýhodou je i malá tepelná odolnost výrobků a potřeba dalšího vytvrzování po vytvoření dílu [9].

4.2.2 Solid Ground Curing (SGC)

Technologie byla vyvinuta v roce 1986 firmou Cubital Inc. z Izraele a na trhu se objevila roku 1991. Stejně jako metoda SLA využívá fotocitlivý polymer vytvrzovaný pomocí ultrafialového světla. Hlavním rozdílem je, že zde dochází k vytvrzování celé vrstvy najednou [23].

Před tím, než začne samotný proces výroby, je model pomocí softwaru rozdělen do tenkých vrstev a ke každé vrstvě je vytvořena deska, tzv. maska. Maska je vytvářena ionografickou tiskovou metodou, tzn. elektrostatickým nanášením barvy. Deska, z které je později vytvořena maska, je transparentní a je na ní nanášen barvou negativ příslušné vrstvy. Daný řez modelu tedy zůstane průhledný, zatímco zbytek desky je obarven barvou [22].

V prvním kroku výroby (*obr. 4*) dojde k nanesení fotopolymeru do pracovního prostoru. Následuje přesunutí masky nad pracovní prostor a spuštění UV záření. Paprsky UV světla, které projdou skrz masku, vytvrdí stavební materiál. Vytvrzen je tedy pouze řez součásti. Neosvětlený tekutý fotopolymer je odsáván a vzniklý prostor se vyplní voskem, který následně ztuhne. Tím je zajištěna podpora pro stavbu dalších vrstev. V dalším kroku je vytvořený povrch součásti opracován a zarovnán na požadovanou výšku vrstvy pomocí frézovací hlavy. Tím je připraven na nanesení další vrstvy tekutého fotopolymeru. Po jeho nanesení se nová maska přesune nad pracovní prostor a vlivem UV záření je opět vytvořen příslušný řez součásti. Tento proces se opakuje, dokud není pomocí jednotlivých vrstev vyrobena celá součást. Velikost jedné vrstvy se pohybuje v rozmezí od 0,1 mm do 0,5 mm. Vosková výplň je ve vytvářeném tělese až do konce celé výroby, poté je chemicky odstraněna. K odstranění se používá kyselina citrónová [3] [22].



Obr. 4: Solid Ground Curing [23]

Výhodou této metody je vysoká přesnost výrobků a velmi rychlý proces výroby. Po dokončení výroby není nutné dodatečné vytvrzování. Vyrobenou součást tedy lze okamžitě použít. Další výhodou jsou dobrá struktura a stabilita vyrobených modelů, ale také poměrně velký pracovní prostor 500x500x350 mm [22] [23] [24].

Nevýhodou je vznik velkého množství odpadu a velké rozměry celého zařízení. Velmi podstatnou nevýhodou je drahý provoz a také vysoká pořizovací cena celého zařízení z důvodu složitosti systému. Tyto důvody vedly ke špatnému uchycení na trhu a v roce 2002 společnost Cubital Ltd. zanikla. Přestože se systémy SGC již nevyrábějí, práva na tento proces výroby vlastní firma Objet Geometries Ltd [22] [23].

4.2.3 Selective Laser Sintering (SLS)

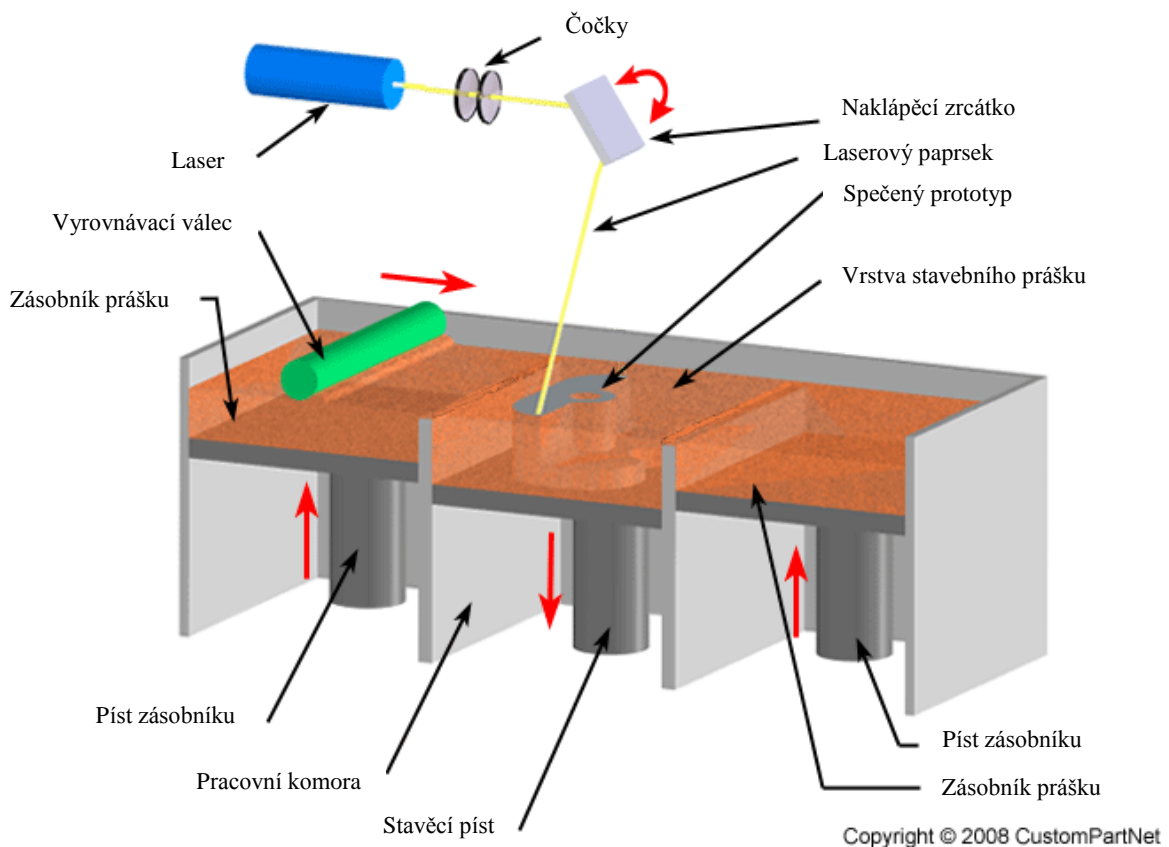
Jedná se o technologii velmi podobnou metodě SLA. Výroba probíhá obdobným způsobem. Dochází zde k selektivnímu spékání materiálu pomocí laseru v inertní atmosféře (argon nebo dusík). Hlavní rozdíl vzniká v použitém materiálu. Zatímco SLA využívá tekutou pryskyřici, zde je použit termoplastický prášek. Nejčastěji využívané jsou speciální práškové polyamidy, které se svými mechanickými vlastnostmi podobají sériově vstřikovanému polyamidu [10].

Zařízení (*obr. 5*) se skládá z komor, ve kterých je uložen prášek, dále stavěcího pístu a vyrovnávacího válce, sloužících k rozprostření dostatečné vrstvy materiálu pro vytvrzení. Další částí zařízení jsou zásobovací písty, které z obou stran doplňují potřebný materiál pro vytvoření nové vrstvy. Pro nasměrování laserového paprsku je zde opět použita soustava zrcátek a zaostřovacích čoček [11].

Po načtení geometrie aktuálního řezu součásti dojde k vytvrzení pomocí paprsku CO₂ laseru. První vrstva je uložena na pracovní desce, po jejím vytvrzení se deska posune pomocí stavěcího pístu směrem dolů. Velikost posunutí je rovna tloušťce vyráběné vrstvy. Tato hodnota se pohybuje od 0,15 mm do 0,2 mm. Aby byla zajištěna přítomnost dostatečného množství prášku, dojde po posunu stavěcího pístu také k posunu zásobovacích pístů. Ty se však posunou směrem nahoru a do pracovního prostoru doplní potřebné množství materiálu. K zajištění konstantní tloušťky vrstvy slouží vyrovnávací válec, který po doplnění prášku materiál rozprostře na potřebnou výšku vrstvy. V tento okamžik dojde opět k načtení nového řezu a spékání nové vrstvy, která se nataví na předešlou vrstvu. Tento proces se cyklicky opakuje, dokud není výroba hotová. Po jejím

dokončení stavěcí válec vyjede nahoru. Je však nutné nechat model společně s okolním práškem vychladnout. U větších modelů může tento proces trvat i několik hodin, to je způsobeno nízkou tepelnou vodivostí používaného materiálu. Na závěr se vyrobená součást očistí od zbytkového prášku. [3] [7] [10].

Pro urychlení procesu spékání se prášek v komorách udržuje při zvýšené teplotě dosahující téměř teploty tavení použitého materiálu. Díky tomu lze používat slabší lasery, které se mohou po vrstvách pohybovat mnohem rychleji [11].



Obr. 5: Selective Laser Sintering [11]

Technologie využívá značné množství materiálů. V podstatě lze použít jakýkoliv materiál, který vlivem působícího tepla měkne nebo se taví. V praxi se dnes užívá polyamid, polykarbonát, polystyrén, a z kovů nízkotavitelné slitiny niklových bronzů nebo polymerem povlakovaný ocelový prášek. Nevýhodou však je, že většinou na jednom zařízení nelze střídat jednotlivé druhy materiálů z důvodu velmi odlišných podmínek při jejich tavení [4].

Podle druhu použitého materiálu lze v rámci této technologie rozlišovat metody:

- **Laser Sintering – Plastic**

Pro výrobu můžeme volit z několika druhů plastických materiálů. Způsob využití hotového modelu je dán podle druhu materiálu. Při použití polystyrenu lze model využít pro standartní metodu lití do ztraceného vosku. Tato metoda umožňuje vyrábět i značně složité modely. Při použití nylonu získávají modely vynikající mechanické vlastnosti (tvrdost, teplotní odolnost atd.), proto jsou vhodné pro např. pro funkční zkoušky [4].

- **Laser Sintering – Metal**

U této metody lze vyrábět kovové součásti. Pro zaručení jejich pevnosti se do kovového prášku přidává polymerní pojivo. Po dokončení výroby je nutné umístit hotový díl do pece při teplotě vyšší než 900°C, kde je pojivo spáleno a část je obohacena bronzem pro zlepšení hustoty. Prototypy pak získávají dostatečnou pevnost a mechanickou odolnost. Jejich využití lze hledat např. jako formy pro výrobu vstřikováním nebo lisováním [4] [12].

- **Laser Sintering – Foundry Sand**

Jedná se o jednu z nejnovějších metod RP. Využívá upravený slévárenský písek, z kterého lze pomocí vytvrzování vytvořit klasickou pískovou formu pro lití [4].

- **Laser Sintering – Ceramic**

Zde je výchozím materiálem prášek slepovaný pojivem. Nanášení pojiva zajišťuje Ink-Jet trysková hlava. Výsledné prototypy jsou z keramického prášku, dají se tak vyrábět např. formy či jádra pro technologii přesného lití [4].

Značnou výhodou metody SLS je, že není potřeba podpůrného materiálu při stavbě, ani pro tvarově složité součásti. Funkci podpory součásti zde přebírá samotný stavební materiál v podobě prášku. Během vzniku jednotlivých vrstev je vyráběná součást trvale obklopena neroztaveným práškem a ten jí slouží jako podpůrný materiál. Další výhodou je jak vyšší teplotní odolnost a lepší mechanické vlastnosti prototypů oproti metodě SLA, tak i rychlejší stavba dílů (větší tloušťky vrstev). Jejich výroba je tedy

určena převážně pro zátěžové a napětíové zkoušky. Používaný stavební materiál je zde levnější než u metody SLA. [10] [11].

Nevýhody lze spatřit v nižší přesnosti výroby, pohybující se v hodnotách $\pm 0,2$ mm. Vzhledem k většímu parametru tloušťky vrstev, než je u metody SLA, jsou povrchové dokončovací operace pracnější a není možné dosáhnout tak kvalitního povrchu. Další nevýhodou je nemožnost tvorby uzavřených dutin, po spečení dutiny by totiž uvnitř zůstal uzavřen přebytečný prášek. Dále např. vyšší pořizovací cena stroje a jeho velká energetická náročnost.

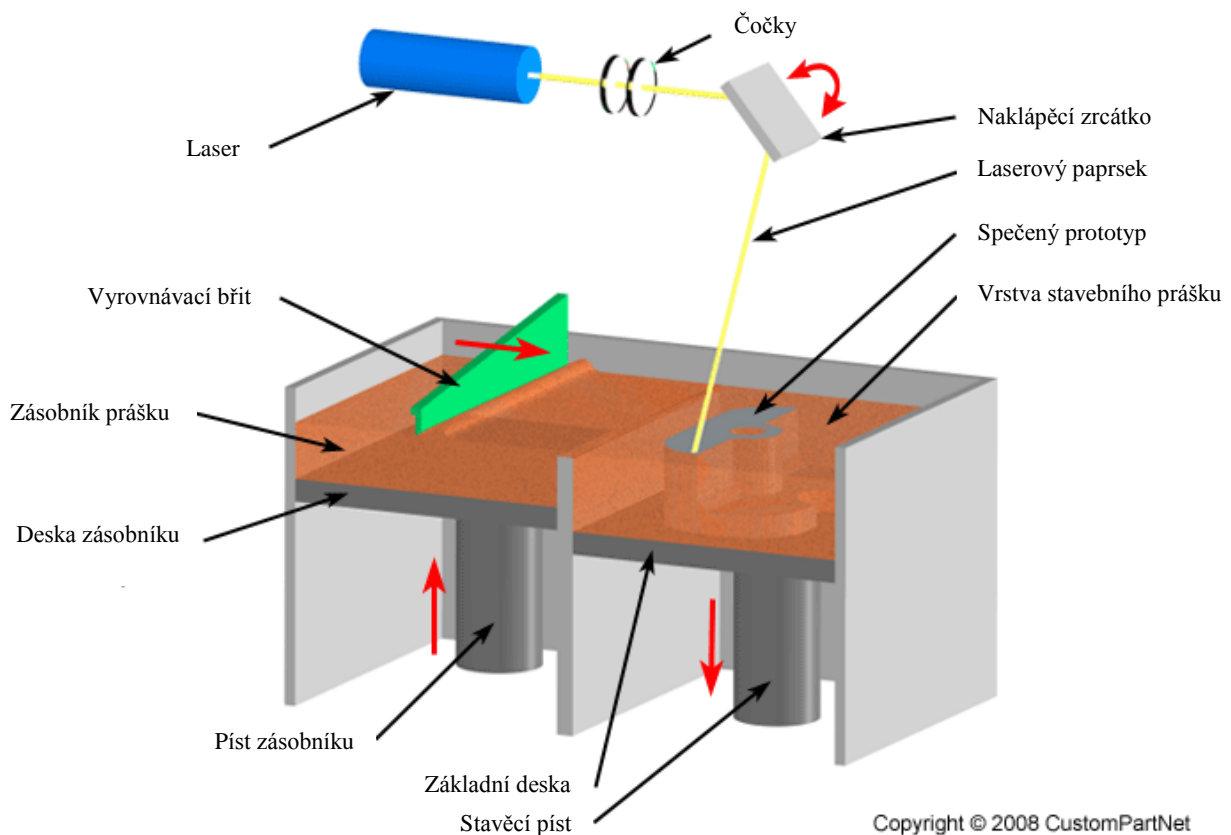
4.2.4 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Jedná se o technologii založenou na principu laserové slinování práškového materiálu, která je téměř identická s metodou SLS. V tomto případě se však jedná o spékání kovového prášku. Tímto způsobem se vyrábějí součásti s 99,99% hustotou původního materiálu, což znamená, že takto vyrobené díly se vlastnostmi téměř podobají konvenčně vyráběným dílům pomocí frézování, soustružení, tváření atd. Dle výrobce zařízení se lze setkat i s jinými názvy této technologie např. Selective Laser Melting (SLM) jedná se však o tutéž metodu výroby [25].

Zařízení pracující na metodě DMLS je složeno ze stejných částí jako zařízení pro metodu SLS. Jedná se tedy o laserový paprsek, který je směřován pomocí soustavy zrcátek. Dále o pracovní komoru, se kterou je pohybováno stavěcím pístem. O dostatečné množství stavebního materiálu ve stavebním prostoru se opět stará pomocná komora, která je pístem postupně vysouvána, aby mohl být materiál rovnoměrně rozprostřen v místě stavby. K rozprostření materiálu dochází pomocí keramického břitu [26].

Výrobní postup je zcela identický s metodou SLS. Výroba prototypu začíná na podkladové ocelové desce, na které je rovnoměrně rozvrstven stavební prášek. Vrstva může být tenká až 20 μm . Prášek je roztaven laserovým paprskem, čímž se spojí s předešlou vrstvou a následně ztuhne. Po dokončení celého řezu se pracovní deska posune směrem dolů o tloušťku vrstvy. Dále keramický břit opět rozprostře konstantní vrstvu prášku přes pracovní prostor a následuje další spékání nového řezu. A takto se proces opakuje do dokončení vyráběné součásti. Během stavby je nutné použití podpůrného materiálu pro převislé části prototypu. Výroba je prováděna v ochranné atmosféře, tvořené nejčastěji dusíkem, z důvodu zamezení oxidace jednotlivých vrstev.

V některých případech je atmosféra tvořena argonem. Odvod tepla, které je vytvářeno laserovým paprskem, je zajištěn skrz ocelovou podkladovou desku [25].



Obr. 6: Direct Metal Laser Sintering [26]

Nejčastější použití technologie DMLS je pro rychlou výrobu nástrojů. Jedná se o specifické nástroje vyráběné pro konkrétní aplikace v množství maximálně pár kusů. Náklady na tradiční výrobu (CNC, lití atd.) jednoho z těchto kusů by byly velmi vysoké ve srovnání s tiskem DMLS. Čím více je součást tvarově komplikovaná, tím výhodnější je výroba touto metodou oproti metodám konvenčním. V současnosti nabízenými materiály jsou legované oceli, nerezová ocel, nástrojová ocel, hliník, bronz, titan a kobaltchrom [26].

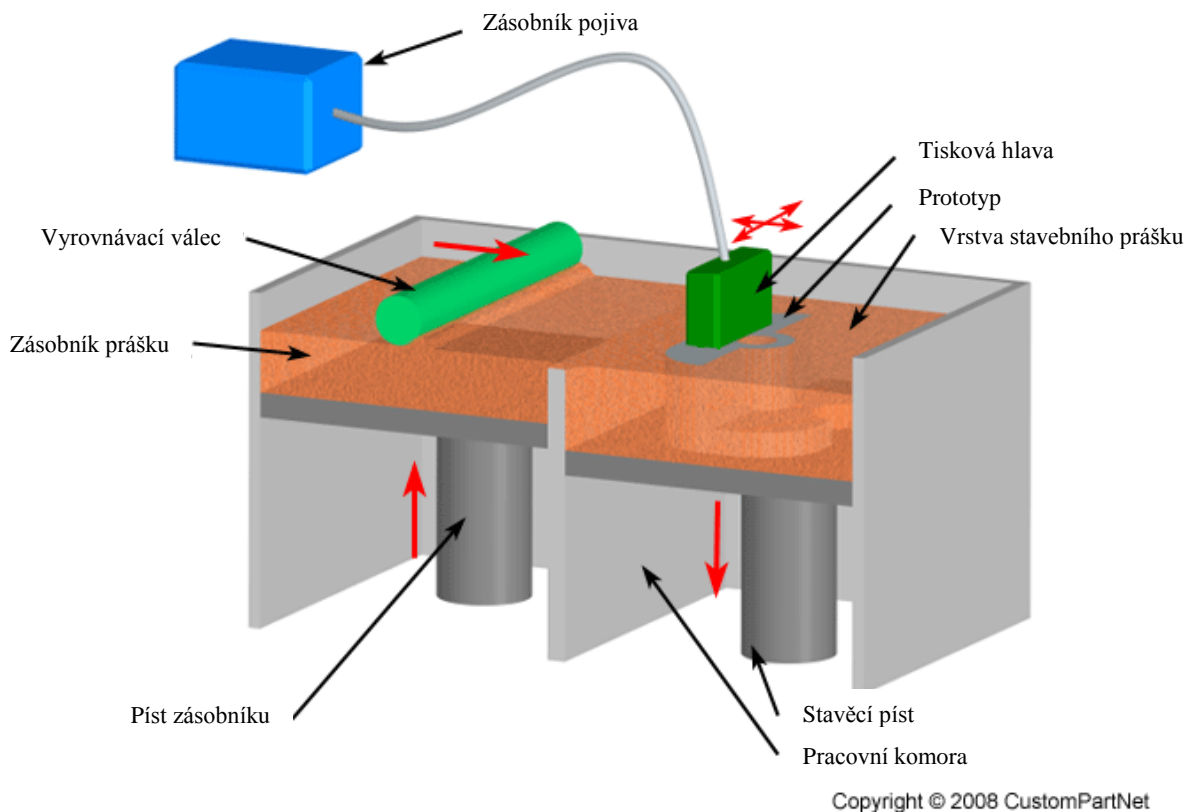
Výhodou této metody je výroba v podstatě jakéhokoliv tvaru jako jeden kus. Další velkou výhodou je úspora času při výrobě poměrně složitých součástí. Nevznikají zde ani žádné odpady. Vyrobené prototypy lze normálně obrábět či tepelně zpracovat [25].

Nevýhodou je nutnost stavby podpor. Ty je potřeba po dokončení výroby mechanicky odstranit, což může být komplikované a časově náročné. V případě navržení nedostatečných podpor může dojít ke zhroucení modelu a následně k jeho deformaci [25].

4.2.5 Three Dimensional Printing (3DP)

Technologie 3DP je velmi podobná metodě SLS a to v podobě stavebního materiálu, tedy prášku. Hlavní rozdíl je, že v tomto případě není použit laser pro spékání jednotlivých vrstev. Metoda spojování vrstev vychází z principu klasických 2D tiskáren, které nanášejí vrstvu barvy pomocí tiskové hlavy [17].

Zařízení (*obr. 7*) má dvě komory plné stavebního materiálu. Jedna komora je pracovní a druhá slouží k doplňování práškového materiálu do pracovního prostoru. S oběma je možné pohybovat pomocí pístů. Pro zaručení rovnoměrného rozprostření vrstvy prášku je zařízení opatřeno vyrovnávacím válcem. K umožnění spojení stavebního materiálu do společné vrstvy slouží tisková hlava, na kterou je napojen zásobník pojiva.



Obr. 7: Three Dimensional Printing [17]

Proces výroby probíhá obdobně jako u metody SLS. Nejprve je nutné vytvořit souměrnou vrstvu prášku přes pracovní desku, na které výroba probíhá. Na tuto činnost je použit vyrovnávací válec, který stavební materiál rozprostře a utlačí. Dalším krokem je vytvoření aktuální vrstvy dle dat. U již zmíněné metody SLS je použit laserový paprsek, který pomocí tepelné energie prášek roztaví a ten se následně spojí. Metoda 3DP však používá vícekanálovou tiskovou hlavu, která nanáší tekuté pojivo. Tisková hlava se pohybuje nad pracovní deskou a tryská rozehráté, tekuté pojivo na stavební materiál. Nanesené pojivo váže jednotlivá zrna prášku k sobě a po jeho ztuhnutí dojde k vytvrzení. Tímto způsobem se vytvoří celá vyráběná vrstva. Po jejím dokončení se pracovní deska posune ve vodorovném směru dolů o hodnotu tloušťky vrstvy. Druhá komora se naopak vysune, aby doplnila potřebné množství materiálu pro další výrobu. Materiál znovu rozprostře vyrovnávací válec a tisková hlava začne nanášet pojivo. Další vrstva součásti se spojí s předešlou vrstvou a tímto dojde k postupnému vyrobění celé součásti. Tloušťka vrstev má přibližnou hodnotu v rozmezí od 0,05 mm do 0,2 mm. Po dokončení stavby se vysaje nepoužitý prášek z pracovní komory a vyjme se výrobek. Ten je potřeba ještě důkladně očistit od dalšího přebytečného prášku [3] [17].

Jedná se asi o nejrychlejší metodu v rámci technologií RP. Rychlost se pohybuje okolo 2-4 vyrobených vrstev za minutu. Mezi používané materiály patří kovové či keramické prášky. Proto má technologie své uplatnění ve výrobě keramických skořepin a forem na odlitky. Vzhledem ke křehkosti výrobků je nelze použít pro mechanické zkoušky [3] [17].

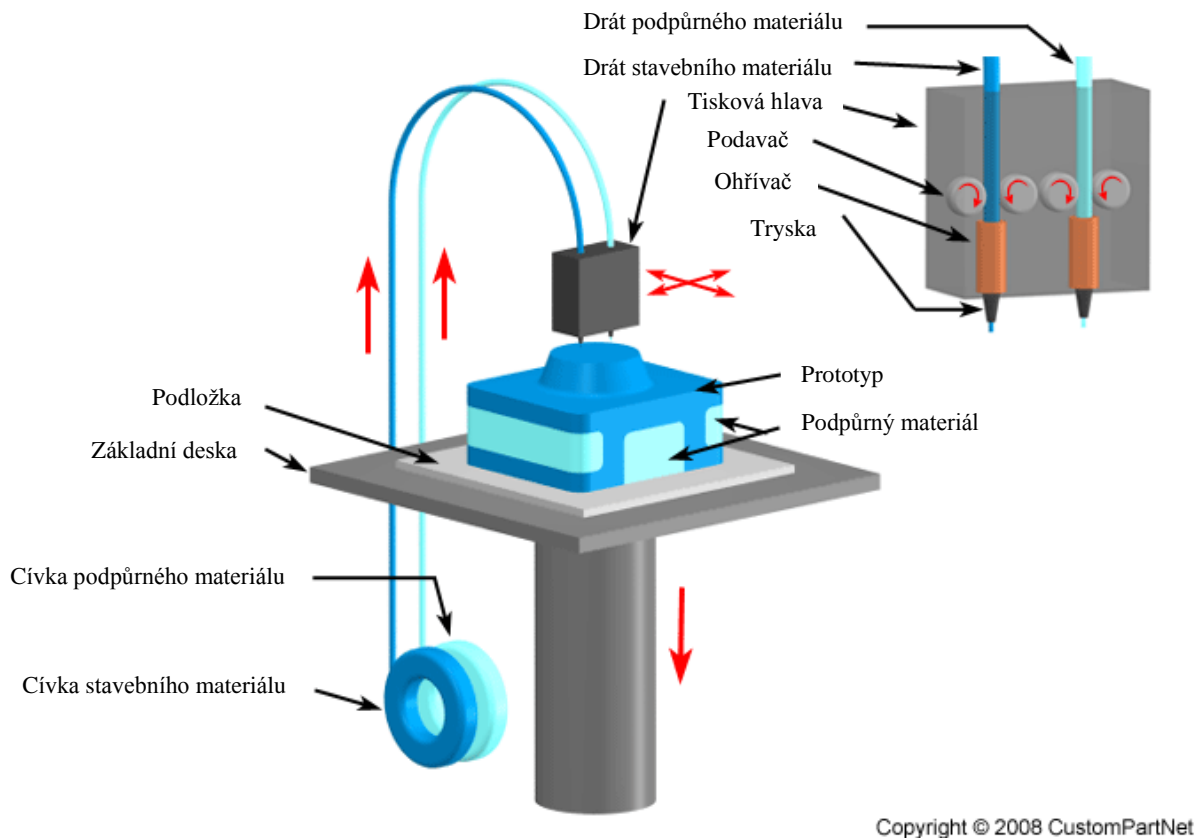
Výhodou této technologie je možnost tisku barevných součástí. Lze tisknout i různé barvy v rámci jedné vrstvy. Vytvoření barvy zajišťuje použití barevných pryskyřic sloužících jako pojivo. Další výhodou je, stejně jako u metody SLS, že jako podpůrný materiál slouží samotný prášek, který obklopuje vyráběnou součást. Dalšími výhodami je také rychlost tisku, nízká cena používaného materiálu a možnost opětovného použití vysátého materiálu [18].

Ze způsobu výroby je patrné, že mezi nevýhody bude patřit kvalita povrchu součásti. Povrch je velmi hrubý s nižší přesností oproti jiným technologiím RP. Způsob použití prototypu je také negativně ovlivněn jeho křehkostí [18].

4.2.6 Fused Deposition Modeling (FDM)

Jedná se o druhou nejpoužívanější technologii RP po metodě SLA a je zajímavým kompromisem mezi rychlostí, přesností výroby a odolností materiálu. Od již zmíněné metody je však velmi odlišná. Není zde používán žádný laser, ale trysky nanášející materiál po vrstvách. Tyto vrstvy pak dohromady tvoří vyráběný řez dílu. Na principu technologie FDM pracuje většina tzv. 3D tiskáren [4].

Zařízení (*obr. 8*) se tedy skládá z: tiskové hlavy, ve které jsou umístěny již zmíněné trysky, pracovního stolu, na kterém probíhá stavba součásti, stavěcího pistu sloužícího k pohybu pracovního stolu v ose Z a cívky s navinutým materiálem [14].



Obr. 8: Fused Deposition Modeling [14]

Výrobní materiál ve formě drátu je uskladněn na cívce. Z cívky je naveden do tiskové hlavy, kde je pomocí podavačů odměřována potřebná dávka materiálu. Tento materiál dále putuje do trysky, kterou je tisková hlava zakončena. Před tryskou však ještě dochází k ohřevu materiálu o 1°C nad jeho teplotu tavení pomocí odporových ohřivačů. Tím je možné materiál nanášet v tekuté formě [13] [14].

Aby bylo možné stavět i složitější konstrukce, kde je nutnost podpůrného materiálu, je v tiskové hlavě umístěna ještě druhá tryska. Tato tryska slouží pouze k nanášení podpůrného materiálu na potřebná místa. Druh podpůrného materiálu je volen tak, aby při jeho nanesení nedocházelo ke spojení podpůrného a stavebního materiálu a bylo možné ho snadno odstranit.

Při zahájení výroby se celá tisková hlava pohybuje v rovině X a Y dle souřadnic vypočtených řídicím systémem. Do tiskové hlavy je přiváděn stavební a podpůrný materiál. Materiál je ohříván a vytlačován tryskou v tenkých vrstvách na pracovní stůl. Jakmile materiál opustí trysku a je nanášen na předešlou vrstvu, dojde ke spojení a okamžitému ztuhnutí. Tímto procesem je postupně vyroben celý řez. Jakmile je řez hotov, dojde pomocí stavěcího pístu k posunu pracovního stolu v ose Z směrem dolu o hodnotu rovnající se právě tloušťce řezu a celý proces nanášení se opakuje, dokud není postavena celá součást. Tloušťka jednotlivých vrstev se pohybuje od 0,1 mm do 0,4 mm. Po dokončení výroby je nutné odstranění podpůrného materiálu. To lze provést buď mechanicky, nebo chemicky použitím podpůrného materiálu, který je rozpustný ve vodním roztoku. Vodní roztok je vhodný, pokud jsou podpory umístěné na špatně dostupných místech, nebo na drobnějších prvcích geometrie. Vzhledem k vytvoření schodovité struktury povrchu jsou na závěr nutné dokončovací operace (broušení, tmelení) [3] [13] [14].

FDM technologie tiskne nejen díly, ale je schopna vytvářet i pohyblivé části. Stroj může rozlišovat mezi jednotlivými CAD soubory a tím umožňuje tisk např. systému ozubených kol, který funguje přímo ze stroje. Může tisknout i objekty umístěné v jiném objektu. Nejčastější využití spočívá ve výrobě koncepčních a prezentačních modelů. Uplatnění také nachází pro výrobu prototypů na funkční testování. Vzhledem k dobrým mechanickým vlastnostem používaného materiálu je možné vyrábět modely i pro zátěžové zkoušky s působícím teplotním zatížením. Při nutnosti výroby většího množství kusů se metoda stává nevýhodnou a finančně náročnou. Pro výrobu objemově větších součástí je pomalá, proto má využití hlavně pro rychlou výrobu malých dílů v řádu centimetrů [3] [10] [14].

Pro výrobu se využívá několik druhů materiálů, mezi nejpoužívanější patří ABS a vosk. V případě ABS se jedná o plast, který se svými parametry blíží k sériově vstřikovanému ABS. ABS je termoplast, který je odolný a často využívaný pro vstřikolisy. Lze

využít i několika barevných provedení a vyrábět barevné prototypy. Vosk má uplatnění ve výrobě formy pro lití na vytavitelný model. Dalšími používanými termoplasty jsou PC a PPS, které nabízejí větší pevnost a teplotní odolnost. Dále např. Polyethylén (PE) nebo polyamid (PA). Díky možnosti využití konvenčních plastů, se tato metoda stala velmi atraktivní a populární [3] [4] [10].

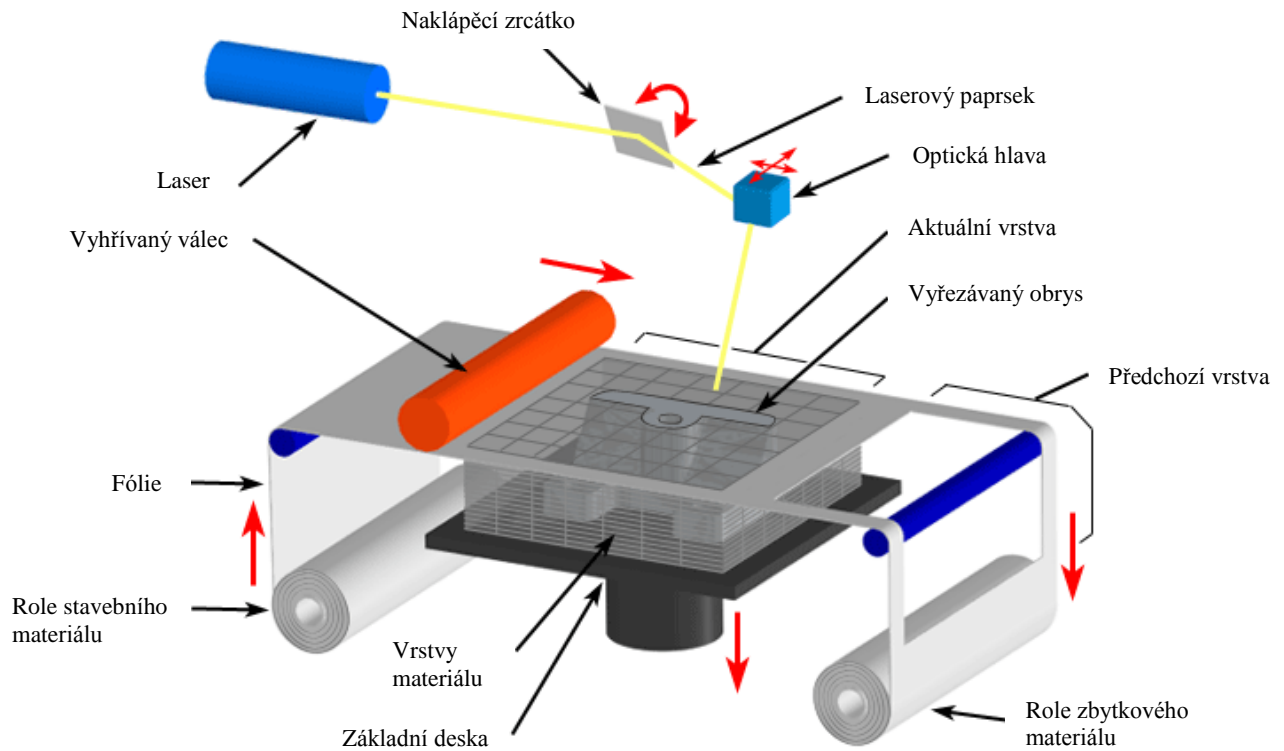
Velkou výhodou technologie FDM je, že její zařízení mohou být použita i v běžném kancelářském prostředí, neboť u nich není použit nebezpečný laserový paprsek a toxické materiály. Dalšími výhodami jsou vysoký počet dodávaných materiálů a jejich mechanické vlastnosti, možnost výroby funkčních modelů, minimální odpad materiálu, jednoduché odstranění podpurného materiálu [4] [14].

Mezi nevýhody lze zařadit pomalejší tisk ve srovnání s některými jinými metodami, drsnější povrch a nutnost dokončovacích operací. Dále nižší přesnost, nutnost tvorby podpor, možnost smrštění modelu a vhodnost pouze při výrobě nižšího počtu kusů [10] [14].

4.2.7 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Další využívanou metodou RP je technologie LOM. Jak je již z názvu patrné, využívá princip laminování, neboli vrstvení foliových materiálů a jejich spojení do jednoho celku. Využívanými materiály mohou být plasty, papír, ale i kovy a keramika. První systém pracující s touto technologií byl vyvinut a dodán firmou Helisys v roce 1991 [16].

Zařízení (*obr. 9*) je složeno z několika hlavních částí. Mezi tyto části patří pohyblivá pracovní deska, dva válce, napínající přes pracovní desku stavební materiál, vyhřívaný válec nad pracovní deskou, laser a optická soustava složená z pohyblivého zrcátka a hranolu.



Copyright © 2008 CustomPartNet

Obr. 9: Laminated Object Manufacturing [15]

Ke stavbě prototypu se zde využívá folií, které jsou na jedné straně opatřeny adhezním nátěrem, který umožní spojení jednotlivých vrstev. Proces výroby probíhá opět na pohyblivé pracovní ploše. Přes tu je natažen materiál umístěný mezi dvěma válci. První válec slouží jako podavač a odvíjí materiál, který je na něm umístěný. Druhý válec navíjí zbytkový materiál po vyřezání. Po natažení materiálu přes pracovní desku je použit vyhřívavý válec, ten přes celou plochu přejede a přitlačí novou vrstvu na předchozí. Vlivem působícího tepla a tlaku dojde k spojení obou vrstev. Dalším krokem je vyřezání celého obrysu součásti příslušné vrstvy pomocí CO₂ laseru. Ten je ze zdroje na správné místo směřován pomocí pohyblivého zrcátka a optické hlavy. Laser vždy v každém kroku vypálením oddělí obrys součásti, ale i obdélník o velikosti celé pracovní desky. Nepotřebný materiál mezi součástí a ohraničením pracovní plochy rozřeže na hrubší čtvercovou síť, aby mohl být po dokončení výroby snadněji odstraněn. Tento přebytečný materiál zároveň slouží i jako podpůrný materiál. Po dokončení vypalování se celý stůl posune v ose Z dolu o tloušťku natažené folie. Tloušťka folie je tedy rovna tloušťce jednotlivých vrstev. Po posunu stolu se navine zbytkový materiál na válec a tím je současně navinuta nová vrstva materiálu přes pracovní desku. Tato nová vrstva je

opět pomocí vyhřívaného válce „nalisována“ na vrstvu předchozí a celý proces výroby se opakuje, dokud není celá součást zhotovena. Po dokončení výroby je z pracovního prostoru stroje vyjmut celý kvádr materiálu. Vyráběná součást je umístěna uvnitř mezi odpadovým materiálem. Tento odpad je nutné ručně odstranit [3] [15].

Nejčastěji používaným materiálem je papír, lze však použít jakékoliv termoplasty. Materiál musí být ve formě tenkých folií o používané tloušťce od 0,05 mm do 0,25 mm. Výsledné součástky mají podobné vlastnosti, jako by byly vyrobeny ze dřeva. Proto tato technologie nachází uplatnění pro tvorbu vizualizačních modelů, které mají příjemný „dřevěný“ vzhled. Vzhledem k rychlosti výroby a rozměrům pracovního prostoru (cca 810x560x510 mm) je LOM technologie vhodná pro stavbu rozměrnějších součástí. A tak své široké uplatnění našla také ve slévárenství, kde její modely slouží k formování pískových forem. Přesto hlavní komerční poskytovatel LOM systému (firma Helisys) ukončil v roce 2000 svůj provoz. Tato technologie totiž nedokázala soutěžit s dalšími, rychle se vyvíjejícími metodami RP. Nicméně ještě existuje několik dalších společností, jejichž zařízení pracují na podobném principu [3] [16].

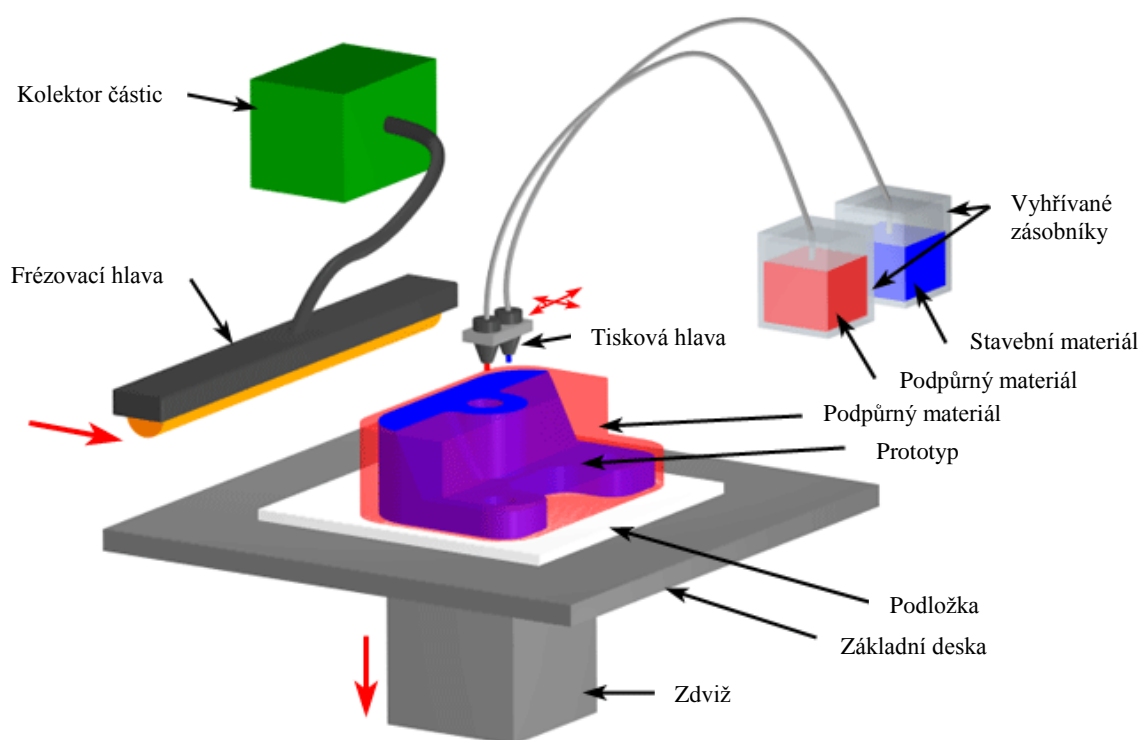
Za výhodu lze označit rychlost celého procesu stavby prototypu a velikost pracovního prostoru. Další výhodou je vysoká přesnost dosahující $\pm 0,1$ mm. Dále cena používaného materiálu, která je oproti jiným technologiím RP nízká a možnost využití základního materiálu i jako podpůrný materiál [15].

Hlavní nevýhodou je malé využití celého pásu materiálu a tím i vzniklé velké množství odpadu. Odpadní materiál je nutné z modelu odstraňovat ručně a to může být obtížné a časově náročné. Mohou také vznikat potíže v podobě špatného spojení mezi vrstvami [15].

4.2.8 InkJet a Multi-Jet Printing

Jedná se o podobnou technologii, jako je metoda FDM. Zde je však stavební materiál udržován v kapalném stavu uvnitř zařízení, než je následně použit pro tisk. To představuje hlavní rozdíl od metody FDM, ve které je materiál postupně dodáván ve formě drátu. Zařízení také využívá tiskové hlavy, fungující na principu 2D tiskárny. Z tohoto důvodu je označováno jako InkJet [19].

Zařízení (*obr. 10*) se skládá z tiskové hlavy a zásobníků materiálu. Dále z pohyblivé pracovní desky, na které probíhá výroba modelu a kolektoru částic napojeného na frézovací hlavu.



Copyright © 2008 CustomPartNet

Obr. 10: InkJet Printing [20]

Výroba modelu probíhá na posuvné pracovní desce. Nad touto deskou je umístěna tisková hlava, pohybující se v souřadném systému X a Y. Tisková hlava je zakončena dvěma tryskami. Jedna tryska dávkuje stavební materiál, druhá podpurný materiál. Materiál je do nich přiváděn ze dvou různých zásobníků, které jsou vyhřívány. Vyhřívání je použito, aby byl materiál stále v tekutém stavu a mohl se tiskovou hlavou okamžitě nanášet. Jako stavební materiál se využívá různých termoplastů, pro stavbu podpor je vyu-

žit vosk. Součást je stavěna postupným nanášením stavebního materiálu dle aktuálních dat. Termoplastický materiál ztuhne okamžitě po dopadu na předešlou vrstvu a tím se s ní spojí. Tloušťka jednotlivých vrstev se pohybuje od 0,013 mm do 0,2 mm. Po dokončení každé vyráběné vrstvy je použita frézovací hlava. Ta přes vrstvu přejede a tím ji zarovná a vyhladí. Odstraněný materiál je během frézování odsáván pomocí vakua do kolektoru. Po dokončení frézování se pracovní deska posune směrem dolů v ose Z o tloušťku jednotlivých vrstev. Takto se celý proces opakuje, dokud není součást vyrobena. Po její výrobě je nutné odstranit podpůrný materiál. Vosk, sloužící jako podpůrný materiál, lze odstranit roztavením. Další možností je použití vosku, který je rozpustný ve vodě [19] [20].

Multi-Jet Printing je zcela totožná technologie jako InkJet. Jediný rozdíl je, že Multi-Jet využívá speciální tiskové hlavy. Tato tisková hlava obsahuje 352 trysek a je rozprostřena přes celou šíři stavebního prostoru. Velký počet trysek zaručuje rychlé a rovnoměrné nanášení materiálu. Tisk probíhá tak, že každá tryska je řízena nezávisle na ostatních. To, kdy jsou jednotlivé trysky spuštěny, určuje řídicí systém. Použitím této speciální tiskové hlavy je odstraněna hlavní nevýhoda technologie InkJet a tím je rychlost tisku [19] [20].

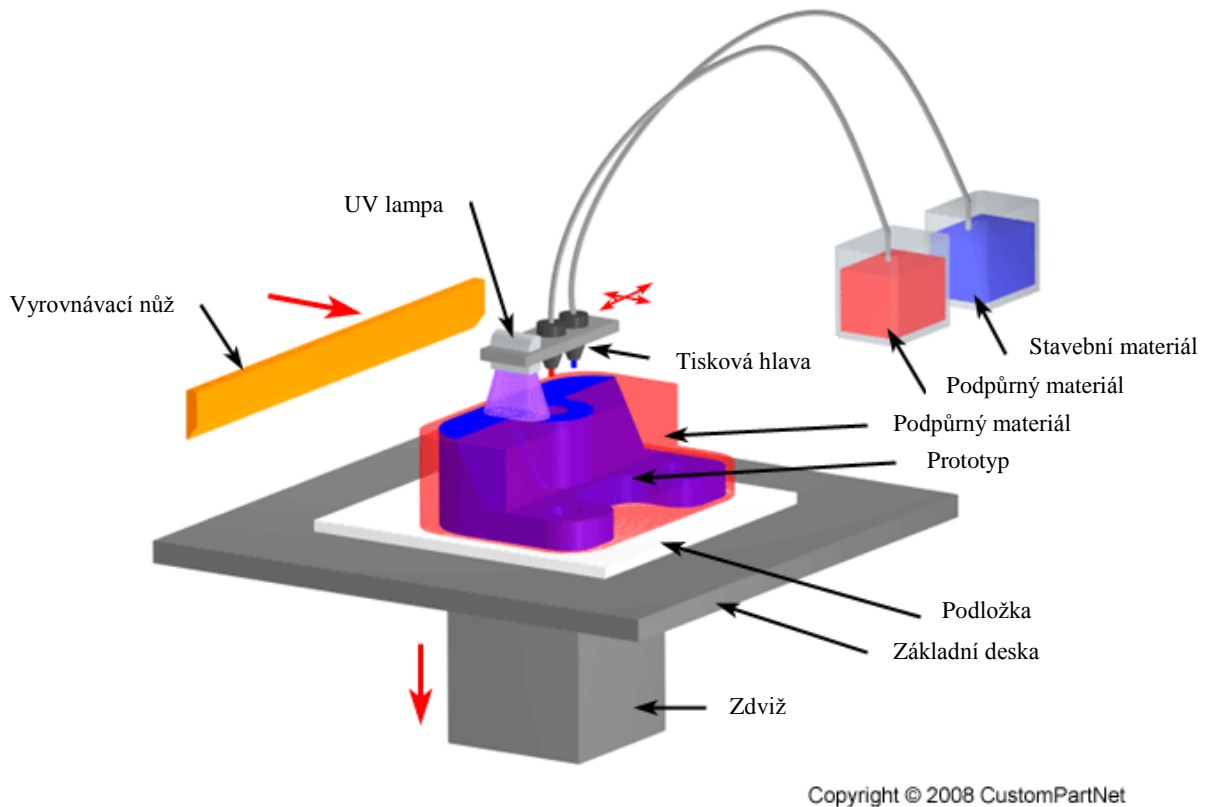
Tato metoda má své uplatnění pro výrobu rozměrově přesných prototypů. Z důvodu nízkých investičních nákladů a vysoké rychlosti výroby ji využívají slévárny pro výrobu forem přesného lití. Nejčastěji se využívá pro menší a tvarově složitější modely, jako jsou např. šperky, dekorace, zdravotnické prostředky atd. [19] [20].

Předností obou těchto technologií je použití frézovací hlavy. Ta zaručuje hladký povrch a dobrou přesnost výrobku. Výhodou je i snadné odstranění podpůrného materiálu. V případě Multi-Jet Printing je tisk velmi rychlý, u InkJet Printing se rychlost tisku stává jeho nevýhodou. Nevýhoda obou technologií je omezená volba materiálu [19] [20].

4.2.9 PolyJet

První zařízení PolyJet bylo představeno izraelskou firmou Objet Geometrie Ltd. v roce 2000. Jedná se o potenciálně slibnou náhradu za metodu Stereolitografie. Stejně jako u SLA se zde využívá vlastností materiálů na bázi fotopolymeru - vytvrzení pod UV světlem. Technika tisku je velmi podobná metodě InkJet Printing, protože také využívá tiskovou hlavu [3].

Zařízení (*obr. 11*) má většinu částí totožnou se zařízením InkJet. Těmito částmi jsou pracovní deska, tisková hlava a zásobníky materiálů. Hlavní odlišností je umístění UV lampy na tiskové hlavě, která slouží k vytvrzení stavebního materiálu. Pro zarovnávání jednotlivých vrstev se zde využívá vyrovnávací nůž.



Obr. 11: PolyJet [21]

Tato technologie kombinuje prvky Stereolitografie a InkJet Printing. Využívá současně dvou druhů materiálu, stavebního a podpurného. Oba materiály jsou uloženy v samostatných, vyhříváných zásobnících. Z nich jsou vedeny v tepelně izolovaném potrubí do tiskové hlavy, z které jsou následně nanášeny pomocí trysek na pracovní desku. Celá vrstva je vystavěna nanášením malých kapiček tekutého materiálu. Tloušť-

ka vrstvy je zde velmi malá a má přibližnou hodnotu 0,015 mm. Po dokončení celé vrstvy je nutné nanosený fotopolymer vytvrdit stejně jako u SLA. Vytvrzení probíhá nasvícením UV lampy umístěné na tiskové hlavě. Z tohoto důvodu se tato technologie někdy označuje jako Photopolymer Inkjet Printing. Jako podpůrný materiál se využívá také fotopolymer, jeho nasvícením však nedojde k takovému vytvrzení, jako u stavebního materiálu, aby mohl být později snadno odstraněn. Po vytvrzení vrstvy se celá zarovná vyrovnávacím nožem. Poté dojde k posunu pracovní desky směrem dolu o tloušťku vrstvy a celý proces se znovu opakuje, dokud není výstavba prototypu hotova. Po dokončení celé výroby se hotová součást vyjme z pracovního prostoru a pomocí tlakové vody je odstraněn podpůrný materiál [3] [21].

V roce 2003 bylo firmou 3D Systems vyvinuto téměř totožné zařízení, které používá jako stavební materiál fotopolymer. Liší se však v aplikaci podpůrného materiálu. Toto zařízení nevyužívá jako podpůrný materiál jiný fotopolymer, ale vosk. Tento podpůrný materiál lze později v operaci post-processingu snadno odstranit roztavením [21].

Stejně jako u InkJet Printing je nejčastější využití této technologie pro výrobu forem nebo pro testování přesnosti součástí. Další uplatnění má ve výrobě prototypových nástrojů, klenotů a zdravotnických prostředků [21].

Výhodami této technologie jsou velmi vysoká přesnost (± 0.04 mm) a dobré rozlišení povrchu součástí. Další výhodou oproti SLA je, že odpadá manipulace s toxickou pryskyřicí. Fotopolymery jsou dodávány ve formě cartridge. Stroje jsou čisté, tiché a lze je použít i v kancelářském prostředí. Vyrobené prototypy lze okamžitě po výrobě použít, odpadá jakékoliv dodatečné vytvrzování a nutnost post-processingové úpravy povrchu. Pro technologii se dodává velké množství stavebních materiálů se specifickými vlastnostmi [3] [21].

Nevýhodou jsou horší mechanické vlastnosti a horší kvalita povrchu oproti metodě SLA. Dále také nutnost pravidelné výměny tiskové hlavy a její poměrně vysoká pořizovací cena a dlouhá doba tisku jednotlivých dílů [3] [21].

4.3 Souhrn základních vlastností metod RP

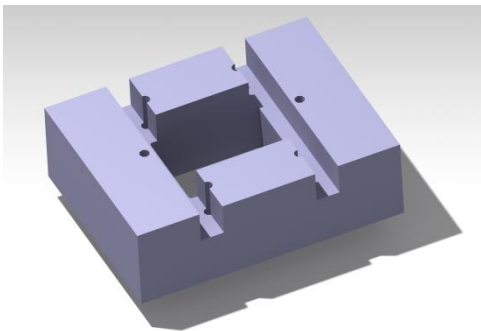
Technologie	Používané materiály	Tloušťka vrstvy [mm]	Nutnost podpůrného mat.	Metoda na bázi
SLA	Fotopolymery (pryskyřice)	0,05-0,15	NE	Fotopolymerů
SGC	Fotopolymery	0,1-0,5	ANO	
PolyJet	Fotopolymery	0,015-0,2	ANO	
SLS	Polyamid Polystyren Polykarbonát	0,15-0,2	NE	Práškových materiálů
3DP	Kovové prášky Keramické prášky Kompozity Elastomery	0,05-0,2	NE	
DMLS	Kovové prášky	0,02-0,04	ANO	
FDM	ABS ABS+ Vosk Termoplasty	0,1-0,4	ANO	Tuhých materiálů
LOM	Papír Plast Kov Keramika	0,05-0,25	NE	
Jet Printing	Termoplasty	0,013-0,2	ANO	

Tab. 1: Souhrn základních vlastností metod RP

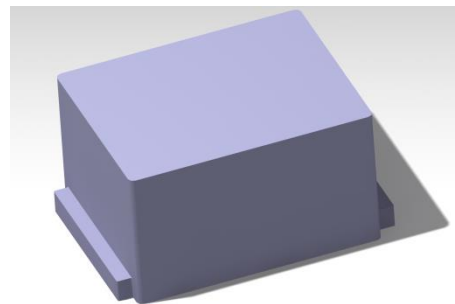
5 Experimentální část

5.1 Popis lisovacího nástroje

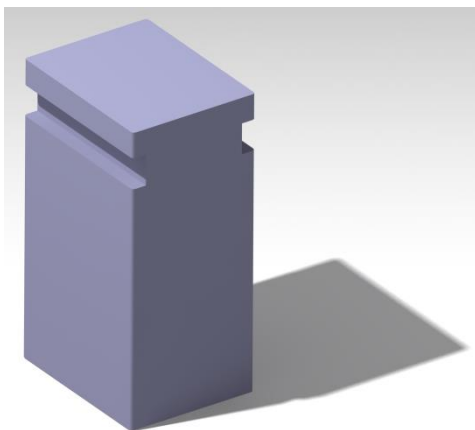
Při výrobě plechových výlisků se využívá lisovacího stojánu, který obsahuje tři výměnné části. Stojánek je univerzální a tvar výměnných komponent se mění dle výsledného výrobku. Výměnné komponenty jsou ohybová matrice (*obr. 12*), přidržovací blok (*obr. 13*) a ohybový razník (*obr. 14*). Aby byla zajištěna správná poloha ohýbaného plechového dílu (*obr. 15*), je ohybová matrice osazena sadou šesti kolíků. Tím je zaručena správnost rozměrů výsledného dílu. Matrice je uložena ve spodní části stojánu, se kterou je upevněna na pracovní plochu lisovacího stroje. Do matrice je vložen přidržovací blok, který je odpružený pomocí jedné pružiny a tlačného čepu. Tento přidržovací blok slouží pro vzájemné přidržení polotovaru mezi razníkem a matricí. Razník je uchycen v horní části stojánu mezi dva upínací dorazy umístěné na kotevní desce. Stojánek je opatřen vedením, po kterém se horní část stojánu pohybuje směrem dolů. Vlivem působící síly razníku na vložený plech dochází k výslednému ohybu.



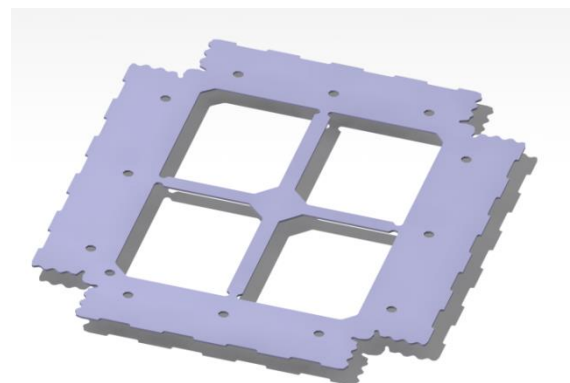
Obr. 12: Ohybová matrice



Obr. 13: Přidržovací blok



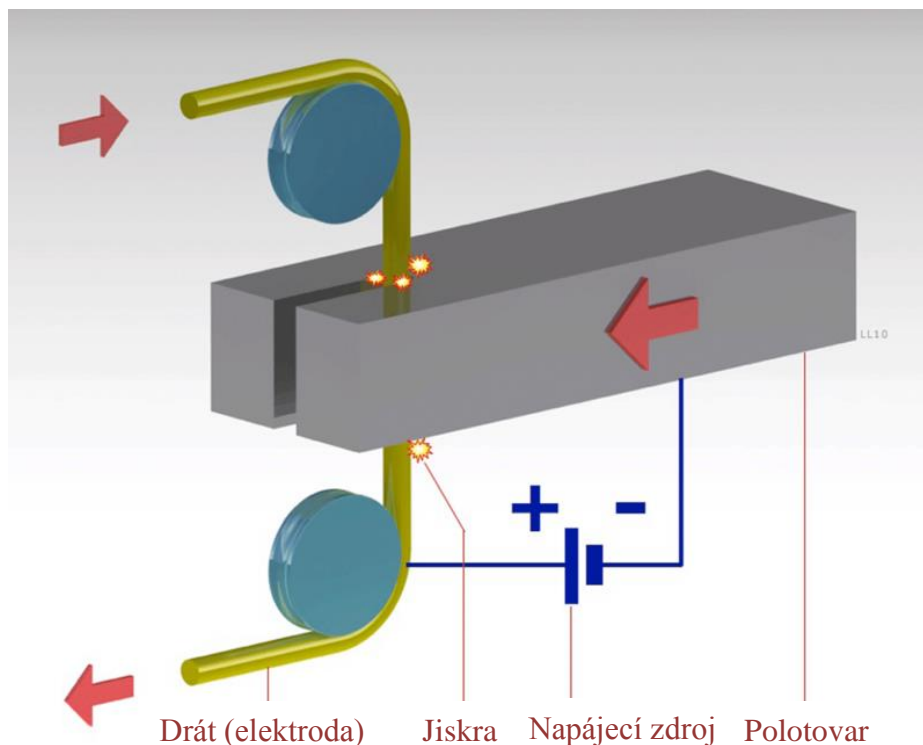
Obr. 14: Razník



Obr. 15: Ohýbaný díl

5.2 Současný způsob výroby nástrojů

V současné době jsou výměnné části vyráběny pomocí drátořezu z kalené nástrojové oceli. Jedná se o technologii elektroerozivního obrábění, při kterém se materiál odebrává drobnými elektrickými jiskrami mezi obrobkem a elektrodou v kapalném dielektriku. Výboje vznikají náhodně mezi vodivým obrobkem a elektrodou sloužící jako nástroj pro řezání. Elektroda se obrobku nedotýká a je od materiálu oddělena malou mezerou kapalného dielektrika. Tímto způsobem jsou z obrobku odstraňovány velmi malé objemy materiálu tavením a odpařením. Dráha drátu (elektrody) je řízena po kontuře budoucího výrobku, ten je nakonec celý oddělen od polotovaru. Princip výroby znázorňuje *obr. 16*.



Obr. 16: Princip elektroerozivního obrábění [27]

Hlavní výhoda spočívá v tom, že lze obrábět velmi tvrdé materiály, protože mezi obrobkem a nástrojem nepůsobí mechanické síly a stroje se tedy velmi snadno řídí pomocí CNC systémů. Vyrobený nástroj má velmi vysokou přesnost a kvalitu povrchu, z těchto důvodů se tato technologie využívá hlavně pro výrobu lisovacích nástrojů. Hlavní nevýhody spočívají v pomalém odběru materiálu (dlouhé časy výroby) a vysoké energetické náročnosti. Cílem aplikace metod RP je odstranit časovou náročnost výroby nástrojů.

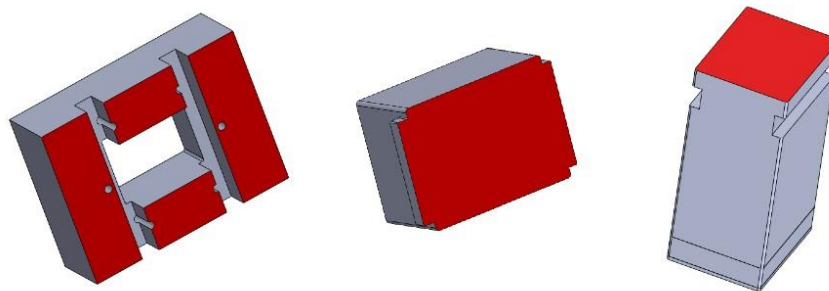
5.3 Výroba prototypových nástrojů metodami RP

Pro výrobu výměnné lisovací sady byly vybrány čtyři dostupné technologie RP. Jedná se o metody SLA, PolyJet, SLM a FDM. Zařízení pracující na technologii PolyJet, SLM a FDM jsou umístěna v laboratořích prototypové výroby TUL, na kterých výroba proběhla. Prototypový nástroj vyrobený metodou SLA byl dodán zahraniční pobočkou firmy Laird. Aby bylo možné porovnat více druhů materiálů technologie FDM, byly objednány další dvě sady u výrobce využívajícího 3D technologie. Každá technologie využívá jiný výrobní postup a jiné stavební materiály, z těchto důvodů získávají vyrobené prototypové nástroje rozdílné vlastnosti. Jejich vhodnost, či nevhodnost pro danou výrobu je potřeba otestovat ve skutečném výrobním procesu.

5.3.1 Orientace prototypů v prostoru tiskárny

Jedním z důležitých parametrů, které ovlivňují vlastnosti výsledného prototypu, je orientace modelu při výrobě. Součásti vyrobené 3D tiskárnou mají různé mechanické vlastnosti v různých směrech namáhání. Nejvyšší pevnost je ve směru podél vláken, naopak pevnost nejnižší je ve směru kolmo na vlákna. Z tohoto důvodu je nutné mít na paměti již při přípravě 3D tisku funkci vyráběného prototypu a jeho požadovanou pevnost. Aby bylo dosaženo požadovaných mechanických vlastností, je nutné zvolit vhodnou orientaci už při přípravě tisku. V případě, že se jedná o model, který slouží pouze pro účely prezentace a jeho mechanické vlastnosti nejsou důležité, lze vhodnou orientací ovlivnit jeho vizuální stránku.

Orientace výměnné lisovací sady je zvolena tak, aby použití podpůrného materiálu negativně neovlivnilo kvalitu funkčních ploch prototypů. Proto jsou na základní desku, na které probíhá postupná výroba součástí, umístěny plochy prototypů nemající funkční charakter. Na *obr. 17* jsou červenou barvou znázorněny plochy umístěné na základní desce tiskárny. Tato orientace bude zachována pro všechny výrobní metody.



Obr. 17: Orientace prototypů při výrobě

5.3.2 Výroba metodou FDM

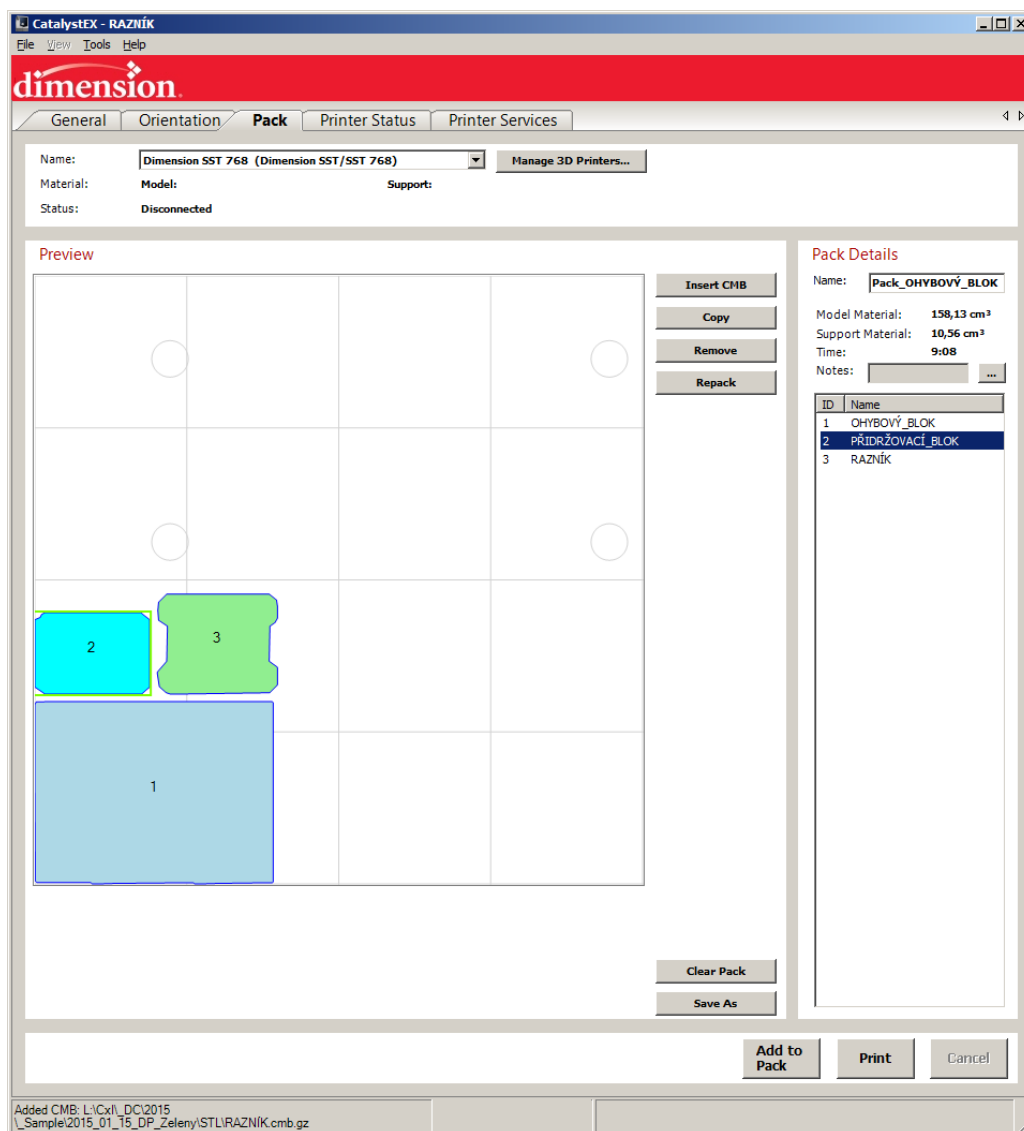
Pro výrobu výměnné lisovací sady bylo jako první využito technologie FDM. Výroba proběhla na zařízení Dimension SST 768 (*obr. 18*), které je umístěno v laboratořích prototypové výroby TUL.



Obr. 18: Zařízení Dimension SST 768

V prvním kroku je nutné vytvořit 3D modely součástí v libovolném programu. Po jejich zhotovení jsou modely převedeny do formátu STL, se kterým pracují všechny softwary pro obsluhu 3D tiskáren. Poté jsou soubory ve formátu STL naimportovány do příslušného softwaru dodaného výrobcem. V tomto případě byl použit program Catalyst EX (*obr. 19*). Po vložení souborů bylo nutné umístit všechny tři modely do pracovního prostoru tiskárny tak, jak budou později vyrobeny. Umístěné modely jsou „rozřezány“ na jednotlivé vrstvy, po kterých bude probíhat stavba. Tloušťka vrstev má hodnotu 0,254 mm. Dále jsou vygenerovány podpory. Ty jsou umístěny pod převislými částmi modelů, ale také mezi pracovní deskou a modelem, pro snadné vyjmutí hotového prototypu z pracovního prostoru tiskárny. Když jsou modely umístěny a vytvořeny jejich podpory, lze ze softwaru získat informace, jaké bude množství použitého stavebního a podpůrného materiálu a také o době stavby modelů. Po těchto krocích je možné přistoupit k samotné výrobě. Při zahájení výroby jsou informace ze softwaru odeslány do řídicího systému zařízení. Stavba modelu probíhá zcela automaticky a není nutný dohled obsluhy. Na pracovní desku je pomocí trysek v tiskové hlavě nanášen stavební a pod-

půrný materiál. Postupně jsou na sebe nanášeny jednotlivé vrstvy, dokud nejsou vyráběné prototypy zcela hotovy. Jako stavební materiál byl použit plast ABS. Po dokončení výroby jsou modely vyjmuty z pracovního prostoru a je potřeba odstranit podpůrný materiál. K tomu je použit roztok hydroxidu sodného, který materiál podpor rozpustí. Takto vytvořené prototypové nástroje již lze použít. Celá sada nástroje vyrobená technologií FDM – ABS je zobrazena v příloze I, Obr. 1.



Obr. 19: CatalystEX

- 1 – Ohybová matrice
- 2 – Přidržovací blok
- 3 – Razník

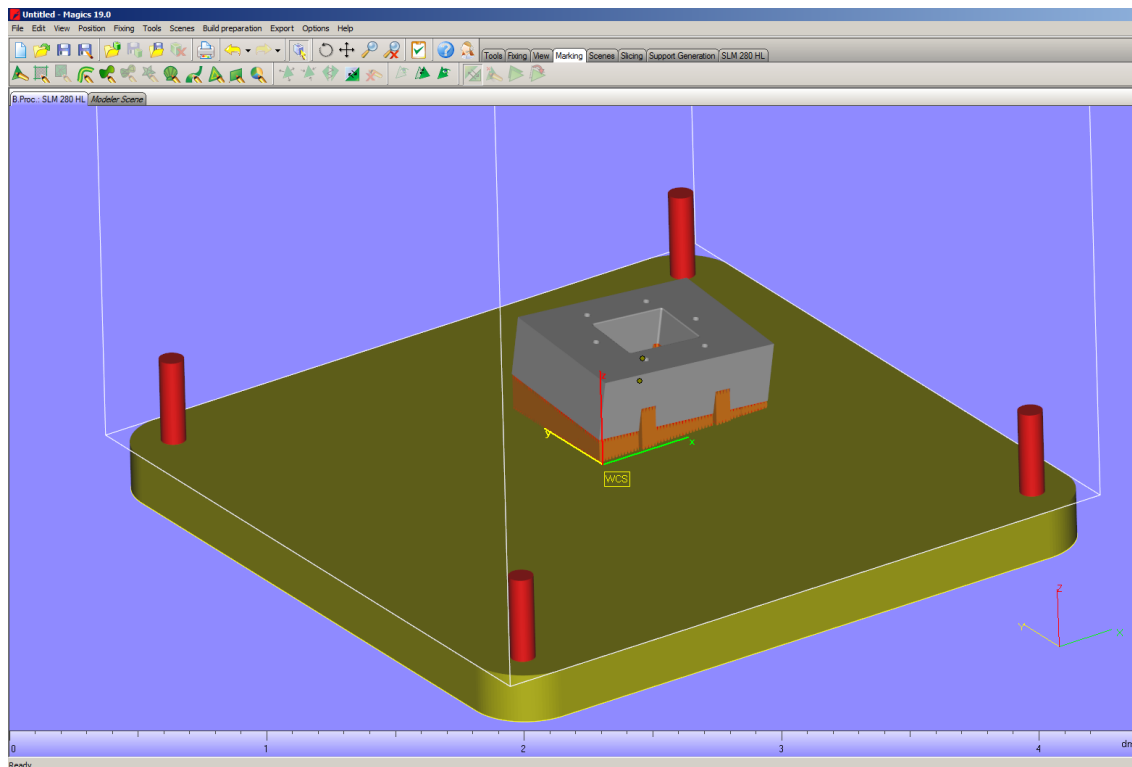
5.3.3 Výroba metodou SLM

Dalším výrobním postupem byla technologie SLM. Jedná se o spékání kovového prášku pomocí laserového paprsku. K výrobě bylo využito zařízení SLM 280 HL též umístěné v laboratořích prototypové výroby TUL (*obr. 20*).



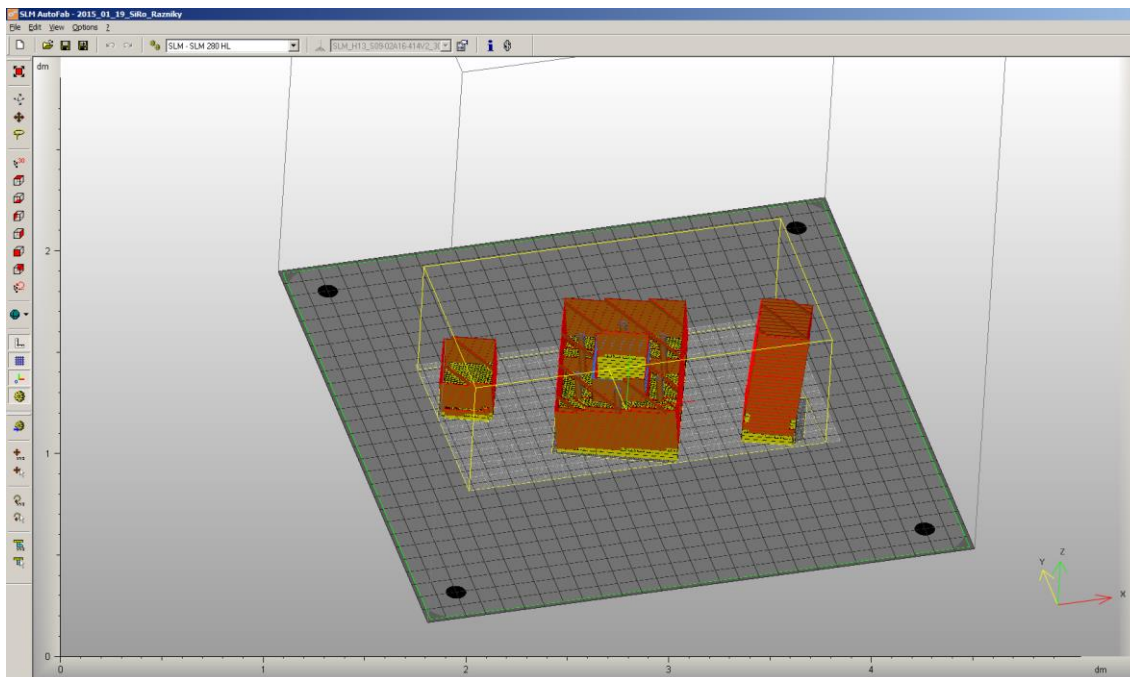
Obr. 20: Zařízení SLM 280 HL

Již vytvořené 3D modely jsou opět převedeny do STL formátu. Zde je potřeba dbát na to, aby byla vytvořena dostatečně hustá polygonální síť, která určuje přesnost výsledného výrobku. Takto vytvořené soubory jsou importovány do softwaru Magics (*obr. 21*). Ten slouží k tvorbě podpůrné konstrukce, která je u této technologie nutná. Podpory jsou vygenerovány automaticky, ovšem nutností je jejich kontrola a případná úprava (zesílení) dle zkušeností obsluhy. Pokud bude tento krok ignorován, může dojít ke zborcení a znehodnocení celé součásti. Pro každou součást se tedy postupně vytvoří podpůrná konstrukce. Aby nebylo obtížné vyjmutí výrobků z pracovního prostoru, jsou prototypy umístěné 4 mm nad ocelovou deskou, na které probíhá stavba. Prostor mezi deskou a prototypy je vyplněn podpůrným materiálem, pro jejich snadné odříznutí.



Obr. 21: Magics

Po vytvoření podpor jsou soubory importovány do dalšího softwaru, kterým je SLM AutoFab (obr. 22). Vložené modely je již nutné správně polohovat dle požadované orientace výroby. Postupně jsou do virtuálního pracovního prostoru tiskárny vloženy a naorientovány všechny 3 části výměnné sady. Dalším krokem je volba stavebního materiálu. Pro tuto sadu byla zvolena nástrojová ocel s označením H13. Stisknutím příkazu generation slices jsou modely ‚rozřezány‘ na vrstvy, po kterých bude probíhat stavba. Hodnota tloušťky vrstvy je závislá na použitém stavebním materiálu. V případě materiálu H13 je tloušťka vrstev 30 μ m. Poté již lze spustit výrobu dílů. Díly jsou vyráběny postupným spékáním kovového prášku laserovým paprskem. Když výroba skončí, je nutné nechat výrobky v pracovním prostoru tiskárny vychladnout. Po vychladnutí jsou vyjmuty z tiskárny s celou ocelovou deskou. Z ní je nutné prototypy odříznout a dále pomocí dokončovacích operací odstranit veškerý podpůrný materiál. Celá sada nástroje vyrobená technologií SLM – H13 je zobrazena v příloze I, Obr. 2.



Obr. 22: SLM AutoFab

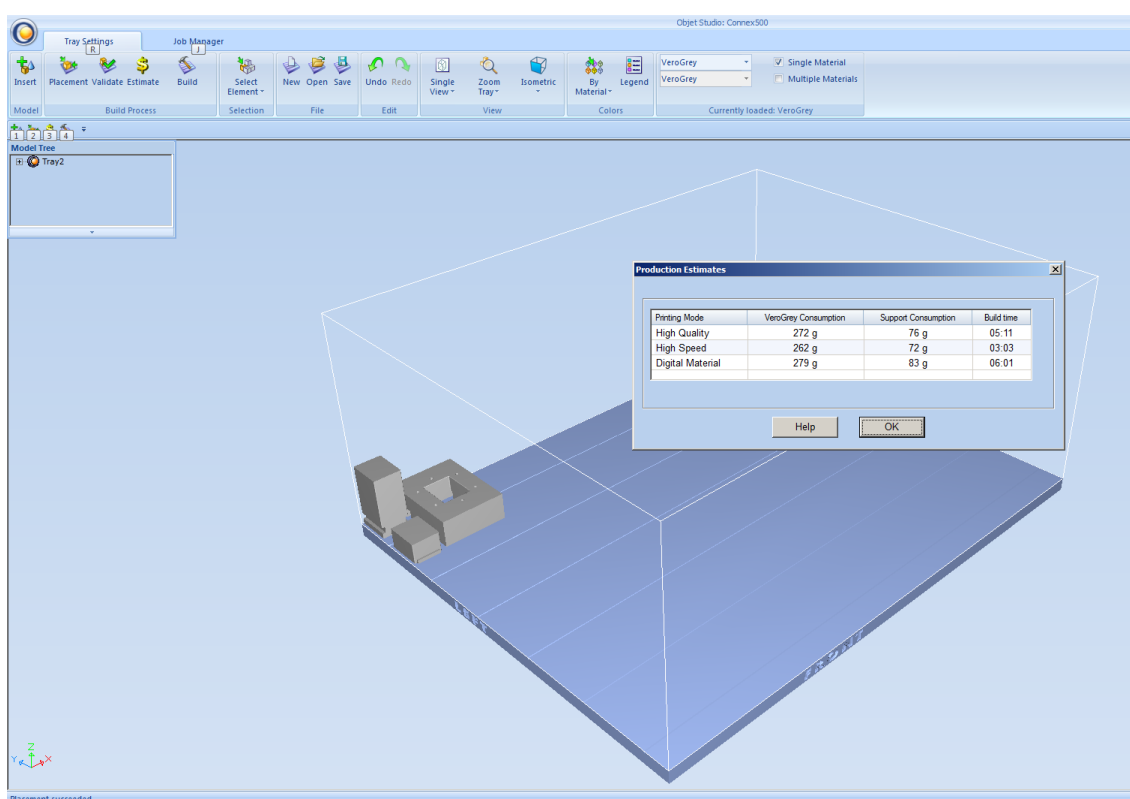
5.3.4 Výroba metodou PolyJet

Další výroba lisovací sady se uskutečnila na zařízení Objet Connex 500 (obr. 23) využívající technologii PolyJet. Jedná se o technologii využívající fotopolymery, které jsou nanášeny tryskovou hlavou. Fotopolymer je po každé vrstvě vytvrzen pomocí UV lampy.



Obr. 23: Zařízení Objet Connex 500

Vytvořené 3D soubory převedené do STL formátu jsou vloženy do softwaru Objet Studio (obr. 24). V něm probíhá veškerá příprava modelů před samotnou výrobou. Nejprve jsou všechny 3D modely umístěny tak, jak bude v pracovním prostoru tiskárny probíhat jejich výroba. Dále je nutné vytvořit podpory dílů. Volit je možné mezi těžkými a lehkými podporami. Těžké jsou rozmístěny pod součástmi hustěji a používají se u dílů, kde požadujeme vyšší přesnost. Naopak u lehkých podpor je podpůrného materiálu méně a své využití mají v případě, že přesnost výrobku není až tolik důležitá. Při výrobě lisovacích nástrojů jsou použity těžké podpory, protože rozměrová přesnost je jeden z požadovaných parametrů výsledného prototypu.



Obr. 24: Objet Studio

Dalším důležitým krokem je volba stavebního materiálu. Zde byl použit materiál VeroGray. Software dále umožňuje volbu tří módů tisku. Jedná se o módy High Quality, High Speed a Digital Material. Volba módu určuje jaké množství stavebního a podpůrného materiálu bude použito, jaká bude tloušťka jednotlivých vrstev a také celkovou dobu tisku. První mód je zaměřen na výrobu s vysokou přesností, používá malé tloušťky vrstev. Druhý mód slouží k co nejrychlejší výrobě bez ohledu na přesnost. Poslední mód umožňuje kombinaci dvou různých stavebních materiálů, jeho použití je časově nejnáročnější. Vzhledem k požadované přesnosti prototypů byl zvolen první mód. Hodnota

tloušťky jednotlivých vrstev je 16 μm . Poté je již možné zahájit tisk. Na desku je tryskami nanášena vrstva tekutého stavebního materiálu. Po nanášení dojde k jeho vytvrzení pomocí UV lampy a následuje další vrstva, která se spojí s předešlou. Když je tímto opakujícím se procesem výroba hotova, je možné vyjmout vyrobené prototypy z pracovního prostoru tiskárny. Z hotových dílů je však ještě nutné odstranit podpůrný materiál. Ten byl odstraněn vodou tryskající pod vysokým tlakem. Takto dokončené prototypy již lze použít. Sada nástroje je zobrazena v příloze I, Obr. 3.

5.3.5 Dodané prototypové nástroje

Další prototypová sada byla vyrobena technologií SLA. Její výroba byla zajištěna pomocí zahraniční pobočky firmy Laird sídlící ve Spojených státech. Pro výrobu byl použit materiál PEAK. Vyrobena nástrojová sada technologií SLA - PEAK je zobrazena v příloze I, Obr. 4.

Poslední dvě sady prototypových nástrojů byly objednány u českého výrobce využívajícího 3D technologie. Na výrobu obou sad byla použita technologie FDM, ale rozdílné druhy materiálů. Použité materiály byly doporučeny jako vhodné pro výrobu lisovacích nástrojů. Jedná se o materiál Ultem 9085 a Polykarbonát. Pro výrobu obou sad nástrojů bylo využito zařízení Fortus 450 (obr. 25). Obě vyrobené sady jsou zobrazeny v příloze I, Obr. 5 a Obr. 6.



Obr. 25: Fortus 450 [28]

5.4 Rozměrová přesnost nástrojů

V případě výroby lisovacích nástrojů je potřeba dosáhnout vysoké přesnosti pohybující se v rámci setin milimetrů. Z tohoto důvodu byly nástroje vyrobené metodami RP změřeny a určena jejich rozměrovou přesnost oproti stávající konvenční výrobě.

Pro toto měření byl využit souřadnicový měřicí stroj EXCEL 4520 (*obr. 26*). Jedná se o měřicí zařízení s robustní mostovou konstrukcí, na které jsou kladeny vysoké požadavky rovinnosti a kolmosti. Díky tomu lze provést měření výrobku s velmi malou odchylkou. K měření je použita dotyková sonda, kterou se nejprve určí základní bod v prostoru. Poté jsou na součásti určovány polohy dalších bodů v souřadném systému X, Y, Z. Těmito jednotlivými body jsou změřeny základní rozměry prototypového nástroje. Na konci měření je vystaven protokol o měření, který obsahuje všechny naměřené hodnoty jednotlivých součástí. Naměřené hodnoty jsou znázorněny v *tab. 3*.

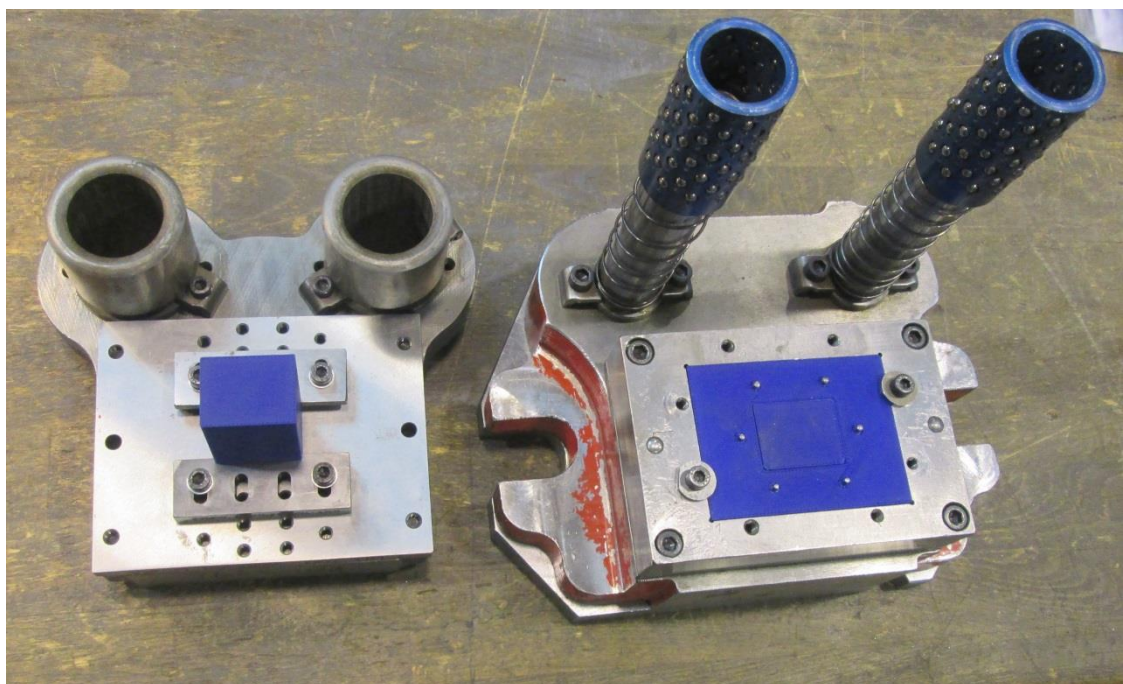


Obr. 26: SMS EXCEL 4520

5.5 Zkušební výroba prototypovými nástroji

Pro ověření přesnosti a správné funkce jednotlivých nástrojů je nutný test ve skutečném výrobním procesu. Nutností je pomocí všech prototypových nástrojů vyrobit několik funkčních vzorků, které budou následně analyzovány, zda dosahují rozměrové přesnosti dle výrobního výkresu. Aby bylo možné srovnání se stávající výrobou, byla použita také jedna lisovací sada vyrobena pomocí nyní používaného drátořezu. Pro test byly použity dva druhy plechových dílů. Jeden byl opatřen rohem, druhý byl bez rohu. Pomocí prototypových nástrojů proběhla výroba pěti kusů od obou druhů.

Nejprve je nutné osadit všechny ohybové matrice šesti kolíky, které slouží ke správnému vložení plechového polotovaru. Dalším krokem je upnout výměnnou sadu do univerzálního lisovacího stojánku, který se skládá ze dvou částí. Do horní části je upnut razník, do spodní části je vložena ohybová matrice a přidržovací blok. Horní část stojánku se usadí na vedení spodní části a tím je celý univerzální stojánek připraven k umístění na pracovní stůl lisu. Umístěn je přímo pod beran lisovacího stroje. Po dokončení všech výše zmíněných kroků je možné přistoupit k testu první sady prototypových nástrojů. První testovaná sada byla vyrobena technologií FDM z materiálu ABS. Na *obr. 27* je zobrazen univerzální stojánek, do kterého je již upnuta výměnná lisovací sada FDM.



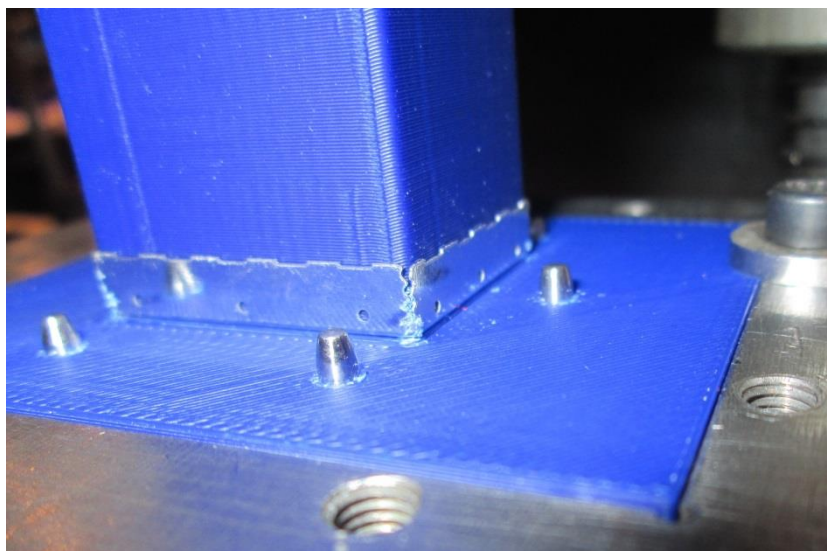
Obr. 27: Upnutá sada FDM - ABS



Obr. 28: Ruční pákový lis

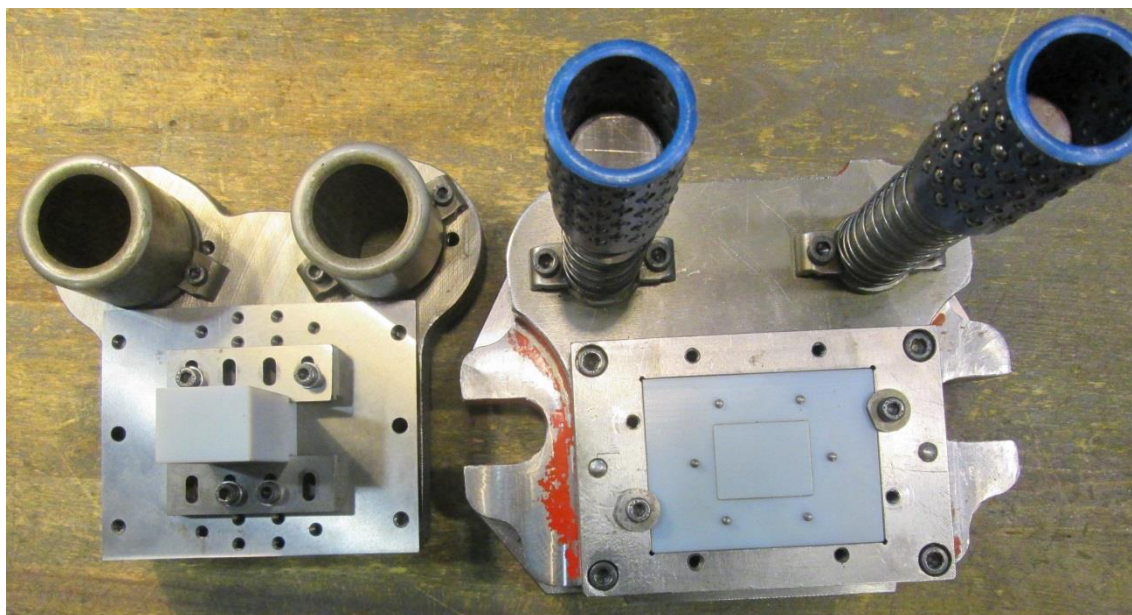
Pro lisování byl použit ruční pákový lis (*obr. 28*), který se v dané firmě běžně používá k testování prototypových nástrojů. Lis je opatřen pákou, při jejímž otočení dochází k přenosu rotačního pohybu na posuvný pohyb beranu pomocí šroubového mechanismu. Beran se při otáčení pohybuje směrem dolů a tím tlačí vrchní část stojánku s razníkem na spodní část stojánku, ve které je umístěna matrice s plechovým dílem. Po dostatečném pootočení dojde vlivem razníku k vtlačení plechového dílu do otvoru matrice a tím k jeho ohnutí. Aby byla obsluha lisu jednoduchá a nebylo nutné použití velké síly, je páka na lisu opatřena dlouhým ramenem, které potřebnou sílu značně snižuje.

Po umístění univerzálního stojánku na pracovní stůl lisu je do prostoru mezi kolíky vložen plechový díl, který je následně pootočením páky ohnut. Poté je páka vrácena do původní polohy a celý stojánek přemístěn mimo lis. Horní část univerzálního stojánku je sundána a z razníku je ručně stažen hotový výrobek. Takto jsou postupně vyrobeny všechny plechové výlisky. Vyrobené díly budou v dalším průběhu testování změřeny, aby bylo možné posoudit jejich rozměrovou přesnost. Na *obr. 29* je zobrazen detail hrany jednoho z ohnutých plechových dílů při použití sady FDM - ABS.

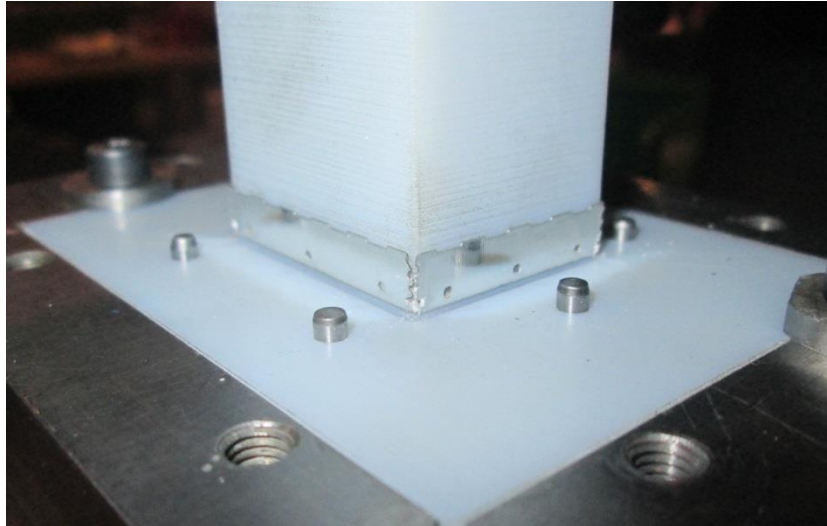


Obr. 29: Detail dílu FDM - ABS

K dalšímu testu byla připravena sada vyrobená technologií PolyJet. Celý postup přípravy je zcela totožný s již popsáním testem technologie FDM. Celá sada se tedy opět upnula do univerzálního stojáčku (*obr. 30*) a ten se celý umístil na pracovní stůl lisu. Znovu bylo vyrobeno celkem deset kusů výlisků. *Obr. 31* zobrazuje vzniklou hranu ohnutého plechového dílu při použití sady PolyJet.



Obr. 30: Upnutá sada PolyJet



Obr. 31: Detail dílu PolyJet

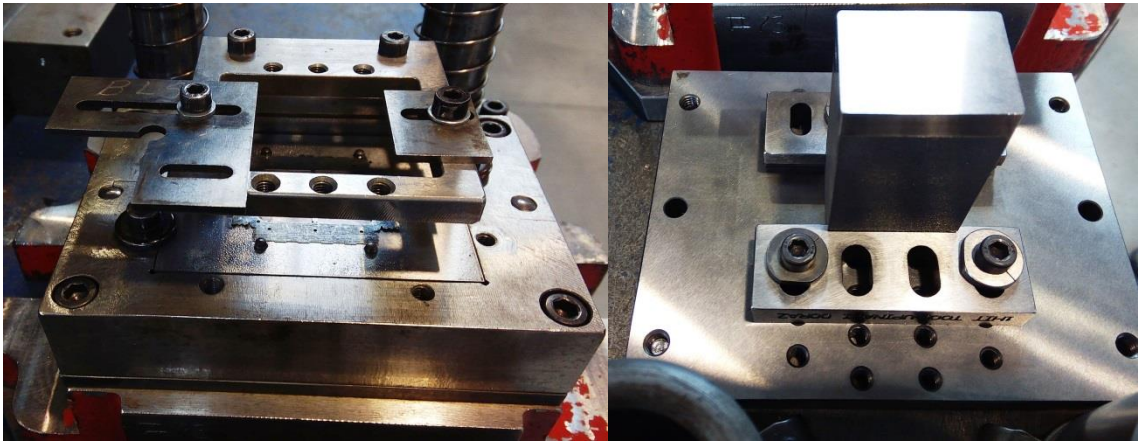
V dalším testu se přistoupilo k sadě vyrobené technologií SLA. Při přípravách na testování se však projevila jedna z nevýhod této technologie a tou je křehkost konečných výrobků. Bylo potřeba upnout razník do horní části stojánku. Razník je upínán tak, že do dvou jeho drážek po stranách jsou zasunuty dorazy. Ty se následně utáhnou pomocí dvou šroubů, aby nedošlo k uvolnění během lisování. Při jejich utahování však došlo k odlomení jedné horní části razníku. Z tohoto důvodu již nebylo možné tento razník otestovat. Vzhledem k této skutečnosti nelze technologii SLA považovat za vhodnou pro výrobu lisovacích nástrojů. Zničený razník je zobrazen na *obr. 32*.



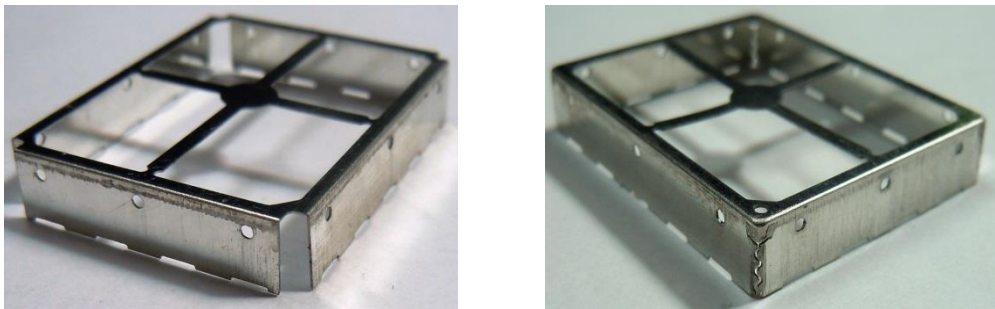
Obr. 32: Zlomený razník SLA

Před upnutím sady SLM do univerzálního stojánu byla nutná velká úprava povrchu vyrobených součástí. Důvodem této operace je hrubý povrch způsobený vlivem spékání kovového prášku pomocí laserového paprsku. Povrchy všech dílů SLM byly tedy obroušeny a spasovány do sebe.

Po dokončovací operaci bylo možné upnutí do univerzálního stojánu. Aby šel snadněji sejmout vyrobený výlisek z razníku, byla na univerzální stojánek umístěna stírací deska. Celá sestava je zobrazena na obr. 33. Na obr. 34 jsou znázorněny vzniklé hrany u ohnutých plechových výlisků.



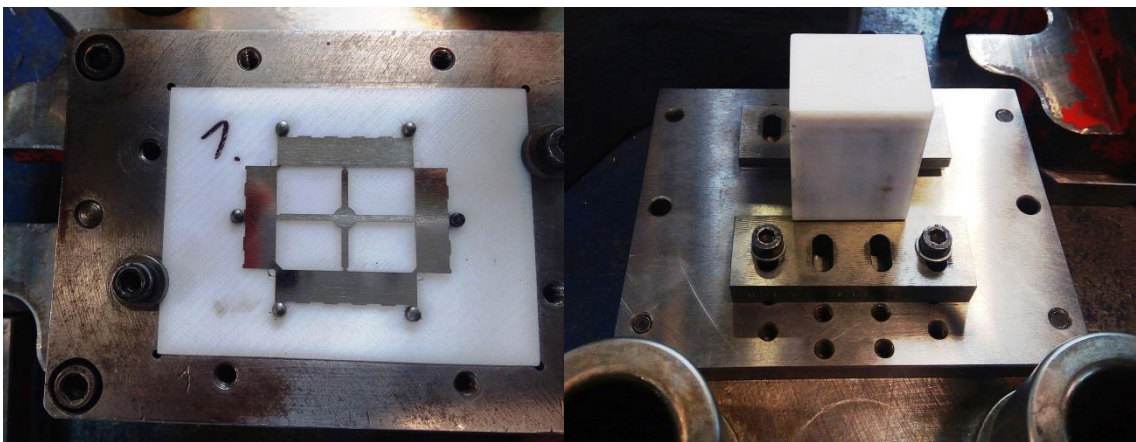
Obr. 33: Upnutá sada SLM



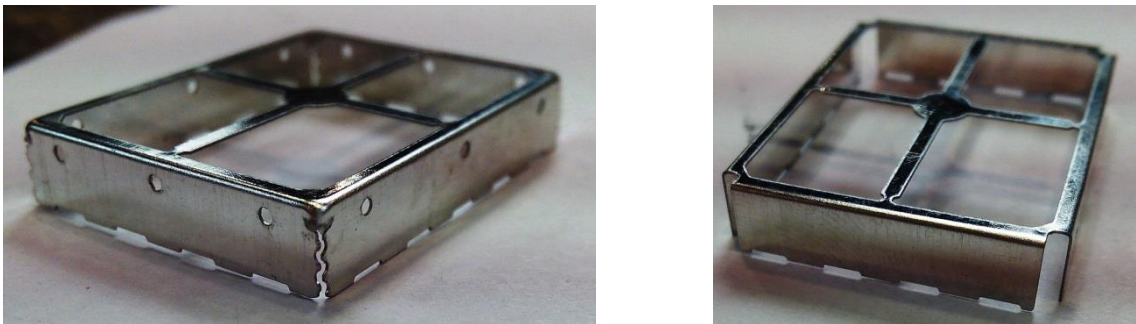
Obr. 34: Detail dílu SLM

Při přípravě testu lisovací sady z materiálu ULTEM 9085 vyrobené technologií FDM bylo zjištěno, že není možné slícovat razník s matricí. Povrch a výrobní rozměry razníku byly příliš nepřesné. Z tohoto důvodu nebylo možné celou sadu otestovat.

Poslední zbylá testovací sada byla vyrobena z polykarbonátu technologií FDM. Sada byla upnutá do univerzálního stojánku a následně otestována. *Obr. 35* ukazuje sadu upnutou ve stojánku a na *obr. 36* je znázorněn výsledný plechový výlisek s rohem a bez rohu.

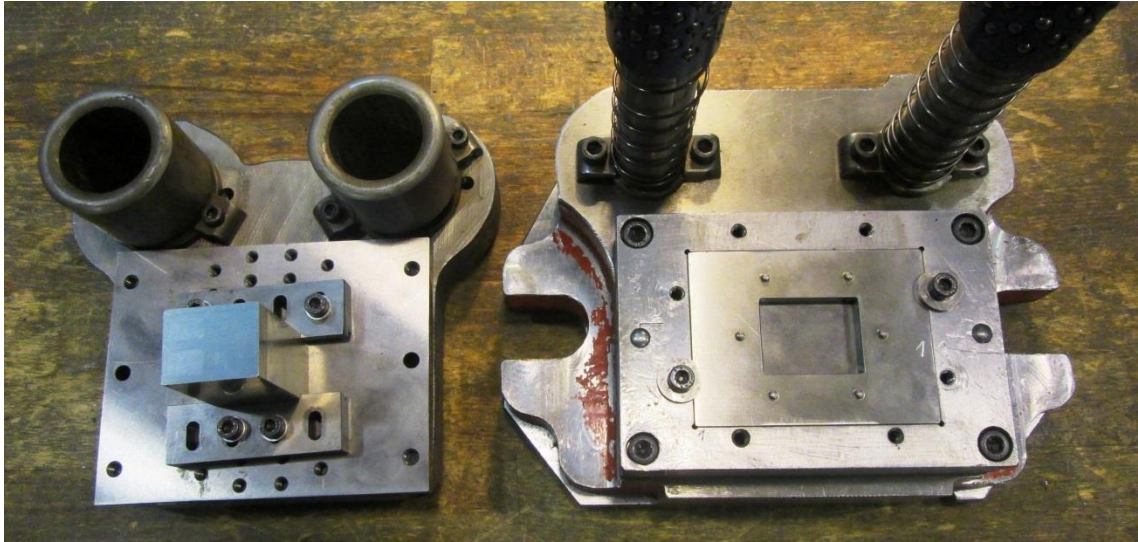


Obr. 35: Upnutá sada FDM - polykarbonát

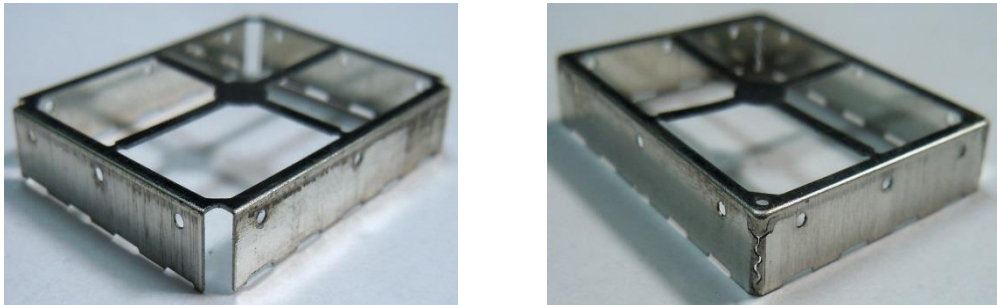


Obr. 36: Detail dílu FDM – polykarbonát

Na závěr proběhla výroba plechových výlisků pomocí současně používané sady vyrobené drátořezem. Používaným materiálem je kalená nástrojová ocel. Plechové výlisky vyrobené touto sadou budou sloužit k porovnání rozměrů s ostatními výlisky vyrobenými technologiemi RP. Na *obr. 37* je vidět upnutá ocelová sada a na *obr. 38* jí vyrobené plechové výlisky.


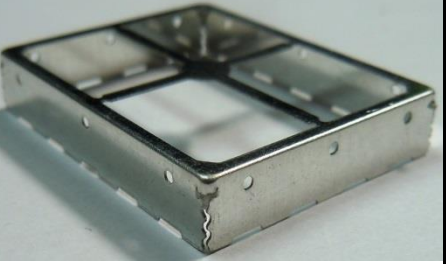






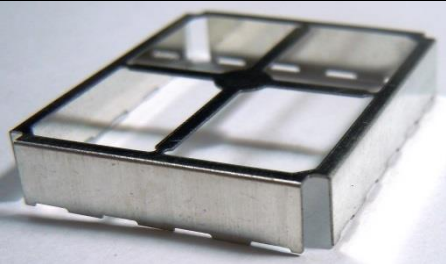



Obr. 37: Upnutá sada ocel



Obr. 38: Detail dílu ocel

Při porovnání *obr. 38* a *obr. 29, 31, 34, 36* je na první pohled patrné, že hrana plechových výlisku není zcela dovřená. Takto vyrobený plechový díl je považován za vadný, protože by svou funkci neplnil správně. Tato výrobní nepřesnost je způsobena hranou razníku. Razník vyrobený konvenčním postupem má funkční hrany zcela ostré, zatímco hrany razníků vyrobených technologiemi RP jsou mírně zaoblené. Kvůli mírnému zaoblení razníků dochází během ohybu k nedostatečnému vytažení bočních hran plechu a tím zůstává hrana nedovřená. Z tohoto důvodu je zřejmé, že je nutné použít ocelový razník a není možné ho nahradit plastovými materiály. Dalším cílem testů tedy bylo ověřit funkčnost ohybových matic s použitím ocelového razníku. Proto byla potřeba provést testování ohybu znovu, pomocí matic a přidržovacích bloků vyrobených metodami RP a razníku vyrobeného drátořezem z nástrojové oceli. Využity byly všechny ohybové matrice vyrobené pro toto testování. Jedná se tedy o matrice vyrobené technologií FDM (ABS, Polykarbonát, ULTEM 9085), SLA (PEAK), PolyJet (VeroGray). Zhotovené výlisky kombinovanými sadami jsou zobrazeny v *tab. 2*.

PB,OM : POLYJET	OR : OCEL		
		BEZ ROHU	S ROHEM
PB,OM : PC	OR : OCEL		
		BEZ ROHU	S ROHEM
PB,OM : ABS	OR : OCEL		
		BEZ ROHU	S ROHEM
PB,OM : SLA	OR : OCEL		
		BEZ ROHU	S ROHEM
PB,OM : ULTEM	OR : OCEL		
		BEZ ROHU	S ROHEM

Tab. 2: Vylisky – kombinované sady

6 Vyhodnocení výsledků

V této kapitole jsou uvedeny veškeré naměřené hodnoty, které byly získány během provedených testů a následně jsou porovnány se stávajícím výrobním procesem. Nejprve jsou uvedeny rozměry prototypových nástrojů a poté rozměry výlisků výrobních těmito nástroji. Veškerá měření byla provedena na SS EXCEL 4520, viz kapitola 4.4. Na závěr kapitoly je uvedeno srovnání cen nástrojů a doby potřebné pro výrobu jednotlivých nástrojů.

6.1 Rozměry prototypových nástrojů

V *tab. 3* jsou uvedeny naměřené rozměry prototypových nástrojů vyrobených metodami RP a rozměry nástroje vyrobeného stávající metodou (drátořezem). Tyto údaje jsou vždy uvedeny pro všechny tři části výměnné lisovací sady. Tedy pro ohybový razník (OR), ohybovou matici (OM), a přidržovací blok (PB).

TECHNOLOGIE	MATERIÁL	ROZMĚR OR [mm]		ROZMĚR OM [mm]		ROZMĚR PB [mm]	
		DÉLKA	ŠÍŘKA	DÉLKA	ŠÍŘKA	DÉLKA	ŠÍŘKA
DRÁTOŘEZ	nástrojová ocel	32,540	25,540	32,940	25,940	32,940	25,940
FDM	ABS	32,670	25,820	32,970	25,920	32,930	25,910
FDM	ULTEM 9085	32,852	25,492	32,851	26,016	32,894	25,867
FDM	polykarbonát	32,852	25,492	33,005	25,938	32,924	25,933
POLYJET	VeroGray	32,670	25,820	32,730	25,840	33,080	25,910
SLA	PEAK	32,290	25,820	33,033	25,940	32,700	25,470
SLM	nástrojová ocel	32,500	25,500	32,799	25,787	32,765	25,734

Tab. 3: Rozměry prototypových nástrojů

6.2 Porovnání rozměrů prototypových nástrojů

V *tab. 4* je uvedeno porovnání rozměrů nástrojů vyrobených metodami RP. Jako referenční hodnoty k porovnání slouží rozměry nástroje vyrobeného drátořezem. Porovnávané hodnoty jsou uvedeny v *tab. 3*. Z důvodu nutnosti použití kombinované sady bude nejspíše pomocí metod RP vyráběna pouze ohybová matrice (OM) a přidržovací blok (PB). Při porovnání těchto dvou částí se nejpřesněji jeví technologie FDM s použitým materiálem ABS.

TECHNOLOGIE	MATERIÁL	ODCHYLKA OR [mm]		ODCHYLKA OM [mm]		ODCHYLKA PB [mm]	
		DÉLKA	ŠÍŘKA	DÉLKA	ŠÍŘKA	DÉLKA	ŠÍŘKA
FDM	ABS	+0,130	+0,280	+0,030	-0,020	-0,010	-0,030
FDM	ULTEM 9085	+0,312	-0,048	-0,089	+0,076	-0,046	-0,073
FDM	polykarbonát	+0,312	-0,048	+0,110	-0,002	-0,016	-0,007
POLYJET	VeroGray	+0,130	+0,280	-0,210	-0,1	+0,140	-0,030
SLA	PEAK	-0,250	+0,280	+0,093	0	-0,240	-0,470
SLM	H13	-0,040	-0,040	-0,141	-0,153	-0,175	-0,206

Tab. 4: Srovnání rozměrů prototypových nástrojů

6.3 Rozměry výlisků

V *tabulkách 5 a 6* jsou uvedeny rozměry vyrobených plechových výlisků. Pro výrobu výlisků uvedených v *tabulce 5* bylo použito celých sad prototypových nástrojů, to znamená, že ohybová matrice, přidržovací blok a razník byly vyrobeny ze stejného materiálu.

V *tabulce 6* jsou uvedeny rozměry plechových výlisků, které byly vyrobeny kombinací prototypových nástrojů. Pro lisování tedy byly použity ohybové matrice vyrobené metodami RP a razník vyrobený drátořezem. Z tohoto testu byla vynechána pouze ohybová matrice SLM, protože se jedná o téměř identický materiál s matricí vyrobenou současným výrobním postupem.

V každém testu bylo ohýbáno pět kusů plechových výlisků s rohem a pět kusů bez rohu. V obou tabulkách jsou zaznamenány hodnoty pro oba typy výrobku.

SADA	POČET DÍLŮ	S ROHEM [mm]		BEZ ROHU [mm]	
		DÉLKA	ŠÍŘKA	DÉLKA	ŠÍŘKA
DRÁTOŘEZ	1. DÍL	32,99	26,10	33,13	26,11
	2. DÍL	33,06	26,07	33,12	26,2
	3. DÍL	33,04	26,07	32,95	26,05
	4. DÍL	33,10	26,03	33,01	26,02
	5. DÍL	33,10	26,05	32,80	26,00
FDM - ABS	1. DÍL	33,19	26,12	33,45	26,19
	2. DÍL	33,27	26,12	33,35	26,27
	3. DÍL	33,26	26,16	33,43	26,40
	4. DÍL	33,23	26,18	33,30	26,26
	5. DÍL	33,36	26,04	33,36	26,30
FDM - PC	1. DÍL	33,34	26,16	33,16	26,12
	2. DÍL	33,25	26,08	33,29	26,23
	3. DÍL	33,25	26,19	33,23	26,13
	4. DÍL	33,27	26,06	33,31	26,09
	5. DÍL	33,29	26,14	33,28	26,23
POLYJET	1. DÍL	33,31	26,68	33,54	26,89
	2. DÍL	32,95	26,04	33,52	26,87
	3. DÍL	33,27	26,58	33,66	27,031
	4. DÍL	33,39	26,80	33,47	26,89
	5. DÍL	33,33	26,65	33,45	26,89
SLM	1. DÍL	32,91	25,97	32,94	25,90
	2. DÍL	32,91	25,94	32,86	25,90
	3. DÍL	32,93	25,94	32,93	25,93
	4. DÍL	32,91	25,93	33,11	25,77
	5. DÍL	32,94	25,98	32,98	25,99

Tab. 5: Rozměry vylisků – celé sady

OM	POČET DÍLŮ	S ROHEM [mm]		BEZ ROHU [mm]	
		DÉLKA	ŠÍŘKA	DÉLKA	ŠÍŘKA
FDM - ABS	1. DÍL	32,94	26,01	32,81	25,87
	2. DÍL	33,01	26,06	32,82	25,84
	3. DÍL	33,06	26,08	32,82	25,86
	4. DÍL	32,98	26,03	32,82	25,85
	5. DÍL	33,00	25,82	32,88	25,87
FDM - PC	1. DÍL	33,14	26,13	33,16	26,11
	2. DÍL	33,13	26,07	33,14	26,19
	3. DÍL	33,13	26,06	33,17	26,12
	4. DÍL	33,14	26,09	33,13	26,16
	5. DÍL	33,13	26,08	33,17	26,13
FDM - ULTEM 9085	1. DÍL	33,08	26,08	32,63	26,01
	2. DÍL	33,16	26,17	33,01	26,06
	3. DÍL	33,19	26,13	33,06	26,08
	4. DÍL	33,10	26,06	32,98	26,03
	5. DÍL	33,12	26,10	32,00	25,82
POLYJET	1. DÍL	33,05	26,00	32,78	26,12
	2. DÍL	32,87	26,00	33,13	26,22
	3. DÍL	33,08	26,05	33,23	26,19
	4. DÍL	33,02	26,04	33,07	26,20
	5. DÍL	33,13	26,04	33,23	26,48
SLA	1. DÍL	33,14	25,81	32,81	25,90
	2. DÍL	33,01	26,08	32,90	26,02
	3. DÍL	33,03	25,95	32,81	25,95
	4. DÍL	33,03	26,11	32,95	26,10
	5. DÍL	33,10	26,15	32,97	25,96

Tab. 6: Rozměry vylisků – kombinované sady

6.4 Porovnání rozměrů výlisků

V *tabulkách 7 a 8* jsou porovnány naměřené rozměry vyrobených plechových dílů. Jako referenční hodnota slouží předepsaný tolerovaný rozměr. Porovnávané hodnoty jsou uvedeny v *tabulce 5 a 6*

První tabulka (*tab. 7*) porovnává rozměry výlisků vyrobených celými sadami prototypových nástrojů. V druhé tabulce (*tab. 8*) jsou porovnány rozměry výlisků vyrobených kombinovanou lisovací sadou. Použité matrice byly vyrobeny jednotlivými metodami RP a razník byl ocelový.

Uvedené rozměry jsou v obou tabulkách barevně rozlišeny. Ty co splňují předepsaný rozměr s tolerancí, jsou označeny zeleně a zbylé nesplňující předepsaný rozměr, jsou označeny červeně. Dle tohoto rozdělení je patrné, že výlisky vyrobené kombinovanými sadami jsou obecně přesnější z důvodu použití ocelového razníku. To potvrzuje již zmiňovaný závěr, že pro lisování bude nutné použít ocelový razník.

Dále si lze povšimnout, že výlisky opatřené rohem dosahují vyšší přesnosti, než výlisky bez rohu. To je způsobeno mírným pružením materiálu po jeho ohnutí. Všechny výlisky jsou ohnuty postupným vtlačení plechového dílu do matrice. Ovšem v případě výlisků bez rohu dojde po vyjetí razníku z matrice k odpružení materiálu a mírnému vrácení ohnutých částí zpět. To způsobuje vyšší naměřené odchylky. U výlisků s rohem tomuto navrácení brání právě zoubkovaný roh, kde při správném ohnutí dojde k zaklesnutí zoubků do sebe a vzájemnému držení ohnutých částí výlisku. Vzhledem k tomuto faktu bude dále přesnost výroby nástrojů posuzována pouze podle výlisků opatřených rohem.

Za nejpřesněji vyrábějící lisovací sadu lze označit tu, která byla vyrobena pomocí metody SLM. Tento závěr šlo již dopředu očekávat, protože daná sada je celá vyrobena z nástrojové oceli. Vzhledem k již získanému poznatku, že bude nutná kombinace prototypových nástrojů, lze za nejvhodnější pro přesnost výroby označit technologii FDM s použitím materiálu ABS a technologii PolyJet.

SADA	POČET DÍLŮ	TEORETICKÝ ROZMĚR [mm]		ODCHYLKA S ROHEM [mm]		ODCHYLKA BEZ ROHU [mm]	
		DÉLKA	ŠÍŘKA	DÉLKA	ŠÍŘKA	DÉLKA	ŠÍŘKA
DRÁTOŘEZ	1. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	-0,01	+0,10	+0,13	+0,11
	2. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,06	+0,07	+0,12	+0,20
	3. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,04	+0,07	-0,05	+0,05
	4. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,10	+0,03	+0,01	+0,02
	5. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,10	+0,05	-0,2	0,00
FDM - ABS	1. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,19	+0,12	+0,45	+0,19
	2. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,27	+0,12	+0,35	+0,27
	3. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,26	+0,16	+0,43	+0,40
	4. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,23	+0,18	+0,30	+0,26
	5. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,36	+0,04	+0,36	+0,30
FDM - PC	1. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,34	+0,16	+0,16	+0,12
	2. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,25	+0,08	+0,29	+0,23
	3. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,25	+0,19	+0,23	+0,13
	4. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,27	+0,06	+0,31	+0,09
	5. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,29	+0,14	+0,28	+0,23
POLYJET	1. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,31	+0,68	+0,54	+0,89
	2. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	-0,05	+0,04	+0,52	+0,87
	3. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,27	+0,58	+0,66	+1,03
	4. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,39	+0,80	+0,47	+0,89
	5. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,33	+0,65	+0,45	+0,89
SLM	1. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	-0,09	-0,03	-0,06	-0,10
	2. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	-0,09	-0,06	-0,14	-0,10
	3. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	-0,07	-0,06	-0,07	-0,07
	4. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	-0,09	-0,07	+0,11	-0,23
	5. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	-0,06	-0,02	-0,02	-0,01

Tab. 7: Srovnání rozměrů vylisků – celé sady

OM	POČET DÍLŮ	TEORETICKÝ ROZMĚR [mm]		ODCHYLKA S ROHEM [mm]		ODCHYLKA BEZ ROHU [mm]	
		DÉLKA	ŠÍŘKA	DÉLKA	ŠÍŘKA	DÉLKA	ŠÍŘKA
FDM - ABS	1. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	-0,06	+0,01	-0,19	-0,13
	2. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,01	+0,06	-0,18	-0,16
	3. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,06	+0,08	-0,18	-0,14
	4. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	-0,02	+0,03	-0,18	-0,15
	5. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	0,00	-0,18	-0,12	-0,13
FDM - PC	1. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,14	+0,13	+0,16	+0,11
	2. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,13	+0,07	+0,14	+0,19
	3. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,13	+0,06	+0,17	+0,12
	4. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,14	+0,09	+0,13	+0,16
	5. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,13	+0,08	+0,17	+0,13
FDM - ULTEM 9085	1. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,08	+0,08	-0,37	+0,01
	2. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,16	+0,17	+0,01	+0,06
	3. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,19	+0,13	+0,06	+0,08
	4. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,10	+0,06	-0,02	+0,03
	5. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,12	+0,10	-1,00	-0,18
POLYJET	1. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,05	0,00	-0,22	+0,12
	2. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	-0,13	0,00	+0,13	+0,22
	3. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,08	+0,05	+0,23	+0,19
	4. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,02	+0,04	+0,07	+0,20
	5. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,13	+0,04	+0,23	+0,48
SLA	1. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,14	-0,19	-0,19	-0,10
	2. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,01	+0,08	-0,10	+0,02
	3. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,03	-0,05	-0,19	-0,05
	4. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,03	+0,11	-0,05	+0,10
	5. DÍL	33 ± 0,1	26 ± 0,1	+0,10	+0,15	-0,03	-0,04

Tab. 8: Srovnání rozměrů vylisků – kombinované sady

6.5 Porovnání časů potřebných pro výrobu nástrojů

TECHNOLOGIE – MATERIÁL	ČAS VÝROBY [HOD.]	
	SADA	MATRICE
FDM – ABS	9:08	5:25
POLYJET – VEROGRAY	5:25	3:32
SLM – H13 (NÁSTROJOVÁ OCEL)	34:03	NETISKLO SE
SLA – PEAK	6:15	3:50
FDM – ULTEM 9085	3:30	2:08
FDM – POLYKARBONÁT	2:27	1:19
DRÁTOŘEZ (současný způsob)	10:00	5:00

Tab. 9: Srovnání časů výroby

V tabulce 9 jsou uvedeny orientační časy potřebné pro výrobu prototypových nástrojů. Pro možnost srovnání je na posledním řádku tabulky uveden čas potřebný pro výrobu současnou metodou. Časy jsou vždy pro výrobu celé sady nástroje a pro výrobu samotné matrice. Udán není pouze čas matrice technologie SLM, kde výroba samotné matrice neproběhla. Uvedené časy jsou pouze informativní a mohou se výrazně měnit podle druhu použitého stroje, kterých je na trhu dostupné velké množství. Tyto časy odpovídají zařízením použitých pro výrobu, které jsou popsány v kapitole 5.3.

Ke všem zobrazeným časům, mimo SLM, je ještě nutné přičíst čas pro přípravu výroby, přibližně jednu hodinu a čas pro konečné odstranění podpor jednu až tři hodiny. U technologie SLM jsou tyto časy výrazně vyšší, zde je potřeba pro přípravu výroby přibližně pět hodin a pro dokončovací operace, zahrnující odřezávání od ocelové desky a odlamování podpor, čtyři až pět hodin. Pro použití nástroje jako lisovací sady je dále nutné přičíst přibližně dvě hodiny strávené úpravou povrchů prototypů, aby bylo možné všechny tři díly lisovacího nástroje spasovat do sebe.

Z tabulky je patrné, že výroba metodou SLM je velmi zdlouhavá a další zmíněné operace tuto dobu ještě prodlužují. Při použití této metody by nedošlo k úspoře času výroby prototypových nástrojů, ale spíše k jeho navýšení. Z tohoto důvodu je zřejmé, že tato technologie nemůže být vhodná. Z pohledu časové úspory se nejlépe jeví technologie FDM s použitím materiálu ULTEM 9085 či polykarbonátu. Zde dochází oproti současnému způsobu výroby k výrazné úspoře času jak při výrobě celé sady, tak při výrobě samotné matrice.

6.6 Porovnání cen nástrojů

TECHNOLOGIE – MATERIÁL	CENA [Kč]
FDM – ABS	3 200,-
POLYJET – VEROGRAY	8 300,-
SLM – H13 (NÁSTROJOVÁ OCEL)	51 700,-
SLA – PEAK	4 200,-
FDM – ULTEM 9085	7 020,-
FDM – POLYKARBONÁT	4 455,-

Tab. 10: Srovnání cen nástrojů

V tabulce 10 jsou zobrazeny náklady na výrobu prototypových nástrojů. Uvedená cena vždy odpovídá výrobě celé sady, tedy ohybové matrici, přidržovacímu bloku a razníku. Výsledné ceny jsou pouze orientační a mohou se lišit dle dodavatele materiálu. Do cen výměnných lisovacích sad nejsou započítány náklady na údržbu zařízení, energetickou náročnost ani na obsluhu zařízení.

Z těchto údajů je patrné, že nástrojová ocel H13 mnohonásobně převyšuje ceny ostatních sad a při zhotovení více kusů se výroba stává velmi nákladnou a neekonomickou, z tohoto důvodu není vhodnou volbou. Nejlevněji lze celou sadu pořídit při použití technologie FDM a materiálu ABS. Ten je dobrým kompromisem mezi cenou materiálu a jeho mechanickými vlastnostmi.

7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo najít možnost zefektivnění procesu výroby prototypových nástrojů ve společnosti Laird aplikací metod Rapid prototyping. Tuto možnost ověřit a navrhnout vhodnou technologii výroby, která by získala časovou úsporu celého testování prototypových nástrojů a zároveň zajistila správnou funkci vyráběných nástrojů.

Pro testování bylo vybráno několik technologií RP používající různé materiály. Pomocí těchto technologií byly vyrobeny lisovací nástroje a ty následně testovány. Během testování byly získány údaje jak o lisovacích nástrojích, tak o výsledných výliscích jimi vyrobenými.

Tyto údaje byly na závěr vyhodnoceny tak, aby z nich bylo možné navrhnout vhodnou variantu výroby RP pro specifickou výrobu lisovacích nástrojů.

Z údajů uvedených v kapitole 6 je patrné, že razník je nutné i nadále vyrábět z nástrojové oceli. Při použití jiných materiálů nemá razník dostatečnou tvrdost a kvalitu funkčních hran, aby zcela ohnul hrany plechového výlisku. Z *tab. 9* je zřejmé, že nejvíce času z celé sady zabírá výroba ohybové matrice. Její výrobu je možné nahradit pomocí technologií RP a tím urychlit celou výrobu výměnné lisovací sady.

Dle *tab. 7* se z pohledu přesnosti výroby nejlépe jeví technologie SLM. Tato technologie je však velmi nákladná cenou materiálu, cenou stroje, servisem zařízení a také energetickou náročností. Rychlostí výroby je také ze všech technologií zdaleka nejhorší. Z těchto důvodů není možné tuto výrobní metodu doporučit.

Při posouzení přesnosti výroby a ceny materiálu doporučuji zvolit technologii FDM s použitím materiálu ABS. Dle *tab. 9* by se mohlo zdát, že časová úspora výroby oproti stávající je u této technologie zcela minimální. Je však nutné mít na paměti, že rychlost výroby je z velké části závislá na daném typu zařízení. A protože technologie FDM je jedna z nejrozšířenějších, je na trhu dostupné velké spektrum dodávaných zařízení, což je jedna z dalších výhod této metody. Dále lze využít schopnosti zařízení pracovat po zahájení výroby zcela automaticky, bez nutnosti obsluhy oproti stávající výrobě, kde je přítomnost obsluhy nezbytná. Po dokončení výroby dojde k automatickému vypnutí zařízení. Díky této možnosti, lze docílit dalších časových

úspor. Čas výroby lze tedy přesunout mimo pracovní směny např. přes noc. Výhodné je i velké množství dostupných materiálů a tím širší oblast použití zařízení. Volbou technologie FDM lze získat dobrý kompromis mezi rychlostí, přesností výroby a odolností materiálu.

Při použití technologie FDM na výrobu matic lze využít možnosti tisku libovolných tvarů a upravit stávající geometrii matrice tak, aby bylo možné odstranit některé operace, které jsou nutné před testováním nástrojů. Mezi tyto operace je možné uvést např. nutnost opatřit matici šesti kolíky, které drží plechový díl na místě. Tuto operaci lze odstranit jednoduchou úpravou matrice, a to přidáním šesti výstupků plnicích stejnou funkci.

Z výše zmíněných důvodů věřím, že mnou doporučená technologie FDM pomůže urychlit celý proces výroby a testování prototypových nástrojů a zároveň otevře nové možnosti výroby nástrojů zcela uzpůsobených pro aktuální potřeby firmy Laird.

Seznam použité literatury

- [1] Conrad Electronic. <http://www.conrad.cz> [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.conrad.cz/3d-novinky-co-je-to-3d-tisk-predstaveni-3d-tiskarny-k8200.t81>>.
- [2] Česká pozice. <http://ceskapozice.lidovky.cz> [online]. 2014 [cit. 2015-03-03]. Dostupné z WWW: <http://ceskapozice.lidovky.cz/prinese-3d-tisk-dalsi-prumyslovou-revoluci-fk6-/tema.aspx?c=A140611_123950_pozice-tema_kasa>.
- [3] Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. <http://enac-oc.epfl.ch> [online]. 2000 [cit. 2015-03-03]. Dostupné z WWW: <<http://enac-oc.epfl.ch/files/content/sites/enacco/files/3D%20CAD%20CAM%20and%20Rapid%20PrototypingV1.1.pdf>>.
- [4] Rapid Prototyping. <http://robo.hyperlink.cz> [online]. 2000 [cit. 2015-03-03]. Dostupné z WWW: <<http://robo.hyperlink.cz/rapid/>>.
- [5] CHUA, Chee Kai, LEONG, Kah Fai, LIM, Chu Sing. *Rapid Prototyping: Principles and Application* [online]. 3rd ed. New Jersey:World Scientific, C.©2010. ISBN 13 978-981-277-0. [cit. 2015-10-03] Dostupné z WWW: <http://books.google.cz/books?id=4OYcyiDUpsQC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbgbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>.
- [6] Cad. <http://www.cad.cz> [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2316-metody-rapid-prototyping.html>>.
- [7] Cad . <http://www.cad.cz> [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2715-vyuziti-rapid-prototyping-technologie.html>>.
- [8] Zare prototyping. <http://www.zare.it> [online]. [cit. 2015-03-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.zare.it/stereolitografia>>.
- [9] TUL. <http://www.kvs.tul.cz> [online]. 2012 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z WWW: <http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/P%C5%99ehled%20technik%20vyu%C5%BE%C3%ADvan%C3%BDch%20p%C5%99i%20Rapid%20Prototyping.pdf>.

- [10] MM spektrum. <http://www.mmspektrum.com> [online]. 2001 [cit. 2015-03-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-technologie-rapid-prototyping.html>>.
- [11] Kyle Stetz. <http://www.kylestetzerp.wordpress.com> [online]. 2009 [cit. 2015-03-18]. Dostupné z WWW: <<https://kylestetzerp.wordpress.com/2009/05/20/selective-laser-sintering-sls/>>.
- [12] Custompart.net <http://www.custompartnet.com> [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>>.
- [13] MM spektrum. <http://www.mmspektrum.com> [online]. 2008 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>>.
- [14] Kyle Stetz. <http://www.kylestetzerp.wordpress.com> [online]. 2009 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z WWW: <<https://kylestetzerp.wordpress.com/2009/05/20/fused-deposition-modeling-fdm/>>.
- [15] Kyle Stetz. <http://www.kylestetzerp.wordpress.com> [online]. 2009 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z WWW: <<https://kylestetzerp.wordpress.com/2009/05/20/laminated-object-manufacturing-lom/>>.
- [16] Custompart.net. <http://www.custompartnet.com> [online]. [cit. 2015-03-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>>.
- [17] Custompart.net. <http://www.custompartnet.com> [online]. [cit. 2015-03-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>>.
- [18] Kyle Stetz. <http://www.kylestetzerp.wordpress.com> [online]. 2009 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z WWW: <<https://kylestetzerp.wordpress.com/2009/05/20/three-dimensional-printing-3dp/>>.
- [19] Kyle Stetz. <http://www.kylestetzerp.wordpress.com> [online]. 2009 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z WWW: <<https://kylestetzerp.wordpress.com/2009/05/20/inkjet-and-multijet-printing/>>.

- [20] Custompart.net. <http://www.custompartnet.com> [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing>>.
- [21] Custompart.net. <http://www.custompartnet.com> [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer>>.
- [22] Kyle Stetz. <http://www.kylestetzerp.wordpress.com> [online]. 2009 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z WWW: <<https://kylestetzerp.wordpress.com/2009/05/20/solid-ground-curing-sgc/>>.
- [23] Wikipedia. <http://www.en.wikipedia.org> [online]. 2015 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Solid_Ground_Curing>.
- [24] EfunDa. <http://www.efunda.com> [online]. 2015 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z WWW: <http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/sgc.cfm>.
- [25] 3T RPD. <http://www.3trpd.co.uk> [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.3trpd.co.uk/dmls.htm>>.
- [26] Kyle Stetz. <http://www.kylestetzerp.wordpress.com> [online]. 2009 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z WWW: <<https://kylestetzerp.wordpress.com/2009/05/20/direct-metal-laser-sintering-dmls/>>.
- [27] Wikipedia. <http://www.cs.wikipedia.org> [online]. 2015 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrojiskrov%C3%A9_obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD>.
- [28] 3D printing in Canada. <http://3dprintingcanadablog.com> [online] 2015 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z WWW: <http://3dprintingcanadablog.com/2014/11/fortus_450mc/#.VVt9ZEa2rSk>.
- [29] Stratasys. <http://www.stratasys.com> [online] [cit. 2015-05-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.stratasys.com/materials/fdm/ultem-9085>>.
- [30] Stratasys. <http://www.stratasys.com> [online] [cit. 2015-05-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.stratasys.com/materials/fdm/pc>>.

[31] Is tech. <http://www.istech.cz> [online] 2013 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.istech.cz/3d-tiskarna/material-abs-plus/>>.

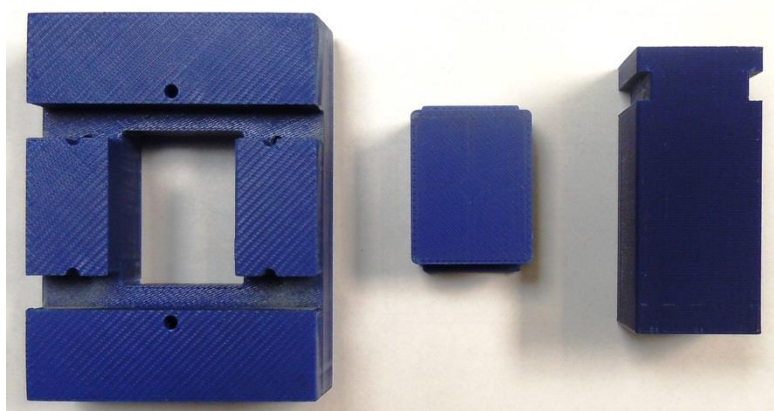
[32] Growit. <http://www.growit3d.com> [online] [cit. 2015-05-15]. Dostupné z WWW: <http://www.growit3d.com/wp-content/uploads/2011/08/polyjet_verogray_final.pdf>.

[33] Paramount. <http://www.paramountind.com> [online] [cit. 2015-05-15]. Dostupné z WWW: <http://www.paramountind.com/pdfs/PI_3DS_Accura_PEAK_US.pdf>.

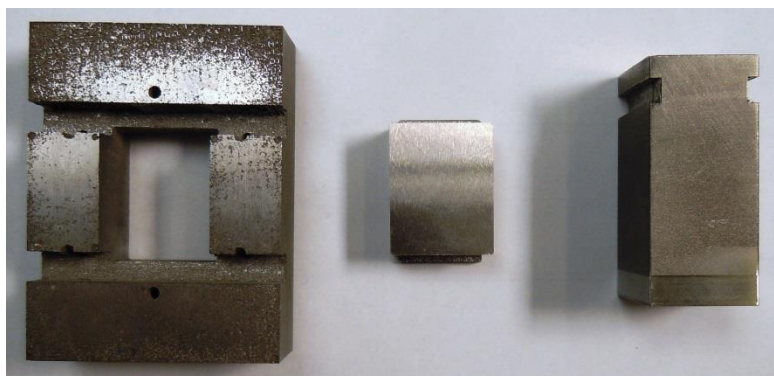
Seznam příloh

Příloha I: Výměnné sady prototypových nástrojů	- 2 -
Příloha II: Základní mechanické vlastnosti použitých materiálů.....	- 4 -

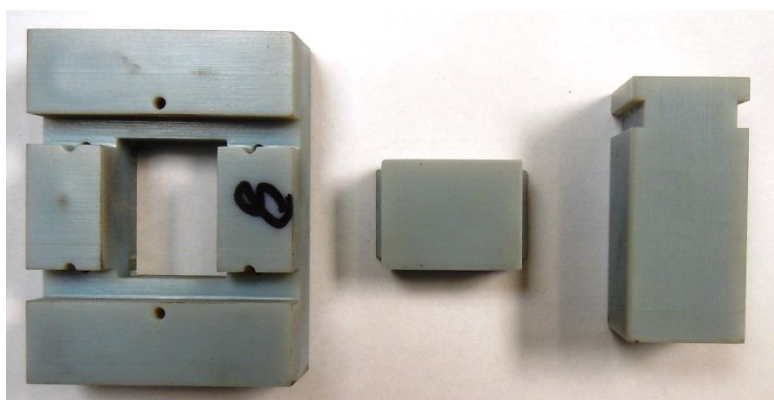
Příloha I: Výměnné sady prototypových nástrojů



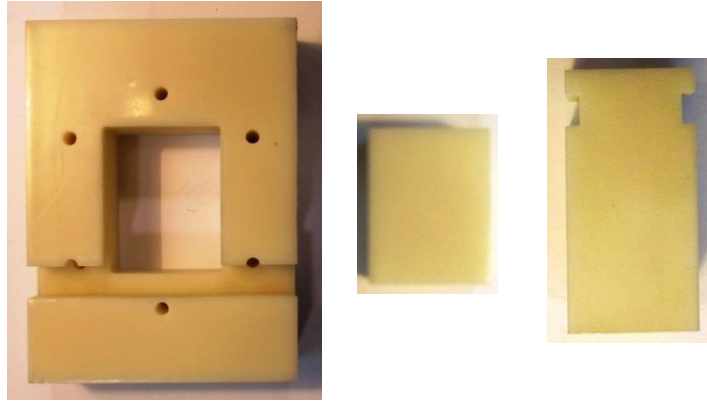
Obr. 1: Sada FDM – ABS



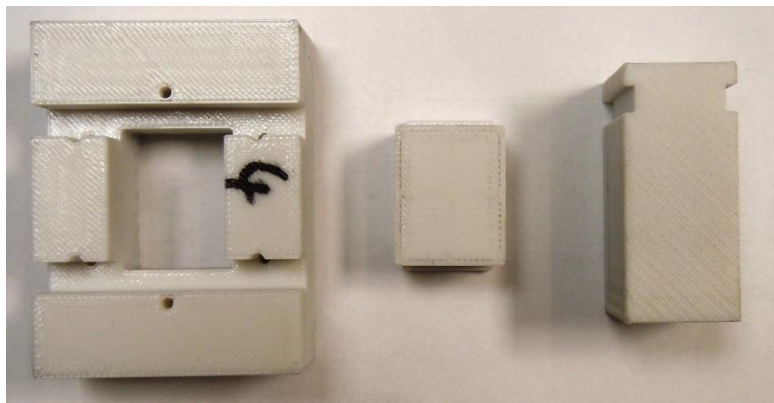
Obr. 2: Sada SLM – H13



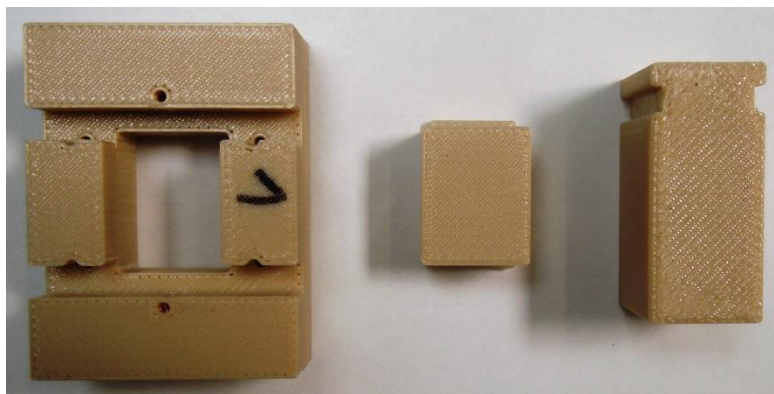
Obr. 3: Sada PolyJet – VeroGray



Obr. 4: Sada SLA – PEAK



Obr. 5: Sada FDM – PC



Obr. 6: Sada FDM – Ultem 9085

Příloha II: Základní mechanické vlastnosti použitých materiálů

ULTEM 9085 [29]	
Pevnost v tahu	71,6 MPa
Pevnost v ohybu	115,1 MPa
Modul pružnosti tahu	2 200 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2 500 MPa
Poměrné prodloužení	6%

Polykarbonát [30]	
Pevnost v tahu	68 MPa
Pevnost v ohybu	104 MPa
Modul pružnosti tahu	2 300 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2 200 MPa
Poměrné prodloužení	5%

ABS [31]	
Pevnost v tahu	37 MPa
Pevnost v ohybu	53 MPa
Modul pružnosti tahu	2 320 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2 250 MPa
Poměrné prodloužení	3%

VeroGray [32]	
Pevnost v tahu	60 MPa
Pevnost v ohybu	95 MPa
Modul pružnosti tahu	3 000 MPa
Modul pružnosti v ohybu	3 000 MPa
Poměrné prodloužení	5%

PEAK [33]	
Pevnost v tahu	57 - 78 MPa
Pevnost v ohybu	77 - 126 MPa
Modul pružnosti tahu	4 220 - 4 790 MPa
Modul pružnosti v ohybu	4 180 - 4 790 MPa
Poměrné prodloužení	1,3 - 2,5%