



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ CAD APLIKACÍ PRO RAPID PROTOTYPING

CAD APLICATIONS IN RAPID PROTOTYPING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ondřej PEŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Oskar ZEMČÍK, Ph.D.

BRNO 2012

ABSTRAKT

Tato práce popisuje a srovnává vlastnosti CAD aplikací s ohledem na použití pro technologii rapid prototyping. První část seznamuje se základními principy a metodami technologie 3D tisku a mapuje současný vývoj v této oblasti. Ve druhé části jsou popsány porovnávané CAD aplikace a jejich možnosti. Závěrečná část je věnována klíčovým vlastnostem CAD systémů. Je provedeno porovnání dostupných variant, zhodnocení a doporučení.

Klíčová slova

CAD aplikace, rapid prototyping, formát STL, reverzní inženýrství, 3D modelování

ABSTRACT

This thesis describes and compares the characteristics of CAD applications with respect to the use of rapid prototyping technology. The first part introduces the basic principles and methods of 3D printing technology and outlines current developments in this area. The second section describes the comparison CAD applications and their capabilities. The last section is devoted to key features of CAD systems. It is a comparison of available options, evaluation and recommendations.

Key words

CAD applications, rapid prototyping, STL format, reverse engineering, 3D modeling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PEŠEK, O. *Využití CAD aplikací pro rapid prototyping*. Brno 2012. Bakalářská práce.
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Využití CAD aplikací pro rapid prototyping** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 25.5.2012

Ondřej Pešek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Oskaru Zemčikovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ	7
OBSAH.....	8
ÚVOD.....	9
1 Technologie rapid prototyping.....	10
1.1 Proces výroby modelu	10
1.2 Rozdělení jednotlivých metod	11
1.2.1 Na kapalně bázi.....	11
1.2.1.1 Stereolitografie (SLA)	11
1.2.1.2 PolyJet.....	13
1.2.1.3 Perfactory.....	14
1.2.2 Na principu tuhé báze	15
1.2.2.1 Fused Deposition Modeling (FDM)	15
1.2.2.2 Laminated Object Manufacturing (LOM)	16
1.2.2.3 Multi-Jet Modeling System (MJM)	17
1.2.3 Na bázi prášku	18
1.2.3.1 Selective Laser Sintering (SLS).....	18
1.2.3.2 3D Printing.....	19
2 CAD aplikace.....	21
2.1 Historie CAD	21
2.2 Porovnávání CAD aplikace.....	22
2.2 STL formát.....	24
2.2.1 Export STL	24
2.3 Reverzní inženýrství (RE).....	26
2.3.1 Import a editace naskenovaných dat.....	27
3 Klíčové vlastnosti CAD aplikací	31
3.1 3D modelování.....	31
3.2 Export formátu STL.....	31
3.3 Import a editace univerzálních formátů a dat získaných 3D skenováním	32
3.4 Doporučení.....	33
ZÁVĚR	34
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	35
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	37

ÚVOD

V současné době je nejen ve strojírenství kladen důraz na rychlou výrobu prototypů. K naplnění tohoto požadavku velmi dobře slouží technologie Rapid Prototyping. Tato technologie je úzce spjata s využíváním CAD softwarů, které zajišťují vstupní data pro systémy RP.

Cílem této práce je srovnání vlastností vybraných CAD programů s ohledem na použití pro 3D tisk. V první části jsou popsány jednotlivé metody RP a jejich možnosti. Druhá část je věnována vlastnostem CAD aplikací. Jsou zde rozebrány dva přístupy pro získání dat pro vlastní tisk modelů. Zvláštní pozornost je věnována specifické oblasti reverzního inženýrství. Je také popsáno testování algoritmů pro převod do formátu STL a možnosti různých doplňkových programů pro práci s formáty, souvisejícími s 3D tiskem. V závěru je provedeno zhodnocení jednotlivých klíčových vlastností s ohledem na použití pro systémy RP.

1 TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

Vývoj technologie RP je úzce spjat s vývojem počítačových aplikací a jejich využíváním v průmyslové výrobě. První komerční RP systém pochází z roku 1988. V zásadě jde o technologii výroby prototypů a modelů, realizovanou ve velmi krátkém čase, využívající 3D data k popsání objektu. Pro tuto technologii je typické vytváření materiálu po vrstvách. Jednotlivé metody se liší použitým materiálem a způsobem vrstvení. Mezi největší výhody technologií RP patří krátké výrobní časy, nezávislost na tvarové složitosti a nízké náklady při malých sériích. Hlavními nevýhodami jsou mechanické a fyzikální vlastnosti modelů a nutnost následných povrchových úprav [1].

1.1 Proces výroby modelu

Přesto, že v současné době existuje mnoho různých metod, používaných v systémech RP, výrobní postup je ve všech případech následující:

1. Vytvoření 3D modelu
2. Převod dat
3. Kontrola a příprava
4. Stavba modelu
5. Postprocessing

Celý proces začíná u přípravy 3D modelu. Tato fáze často tvoří časově nejnáročnější úsek. Základním předpokladem je vlastnictví kvalitního CAD softwaru a dobré hardwarové vybavení. V této fázi je potřeba vzít v úvahu orientaci modelu, nutnost použití podpor, složitost geometrie (tenké stěny, otvory, mezery, převislé prvky a další). Druhým způsobem, jak získat 3D data, je metoda reverzního inženýrství. Zkoumaný objekt se naskenuje a získaná data se následně upraví v CAD aplikaci.

Následujícím krokem je převod dat do formátu STL, který aproximuje plochu modelu na trojúhelníky, které následně reprezentují objekt. Stejně tak se v případě potřeby převádí podpory vlastního modelu. Tento krok je zpravidla nejjednodušší a časově nejméně náročný. Formát STL je součástí všech vyspělých CAD aplikací a je standardem pro RP.

V další fázi jde o kontrolu převedených dat a velmi často realizovanou opravu chyb, které vznikají při zmíněné konverzi.

Pro většinu RP systémů je další krok plně automatizovaný. Je běžné a velmi výhodné, že vlastní výroba modelu může probíhat bez účasti obsluhy. Doba stavby modelu se pohybuje řádově v hodinách a je závislá na velikosti, náročnosti a počtu tisknutých dílů.

Posledním krokem je postprocessing. Jde především o odstraňování přebytečných částí modelů, pryskyřicových výplní dutin, podpor, přebytečného prášku, vytvrzování, pískování a dodatečné povrchové úpravy, prováděné s cílem dosáhnout určité estetické hodnoty výrobku [1], [3].

1.2 Rozdělení jednotlivých metod

V této kapitole jsou popsány vybrané metody technologie RP, rozdělené do jednotlivých kategorií. Je potřeba zmínit, že v dnešní době existuje celá řada dalších metod, které jsou založené na stejných, nebo podobných principech, využívající podobné stavební materiály, dosahující větší, či menší přesnosti.

1.2.1 Na kapalně bázi

Většina metod, spadající do této kategorie, vytváří modely v nádobě s kapalnou pryskyřicí. Organická pryskyřice je vytvrzována světelným paprskem, který dopadá blízko povrchu a vytváří tenkou vrstvu materiálu. Po dokončení první vrstvy modelu se platforma sníží o určitý krok dolů, aby mohla být následně vytvořena další vrstva. Takovýmto způsobem se pokračuje dál, dokud není celý model hotový. Poté se může nádoba vyčerpat a model vyjmout [1].

1.2.1.1 Stereolitografie (SLA)

Technologie firmy 3D Systems, která je považována za průkopníka technologií RP díky svému prvnímu komerčnímu systému z roku 1988, umožňuje vytváření 3D plastových objektů přímo z CAD dat. Jak je vidět na obrázku 1, proces probíhá v nádobě s tekutou pryskyřicí (fotopolymer) a pohybující se plošinou, jejíž povrch je těsně pod hladinou pryskyřice. V případě potřeby se používají podpory pro stabilizaci objektu při tisknutí. Řídící jednotka systému, do kterého je 3D CAD model nahrán a převeden do formátu STL, rozděluje

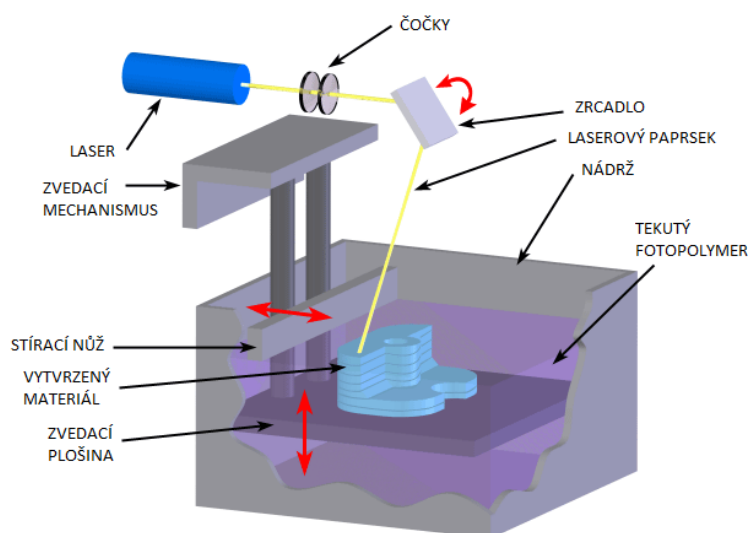
model a podpory na průřezy o tloušťce 0,025-0,5mm. Počítačem řízený optický snímací systém poté řídí laserový paprsek tak, aby při dopadu na hladinu materiál vytvrzoval. Tomuto ději se říká fotopolymerizace a pro technologie RP je typické použití UV záření. Po dokončení celé vrstvy se plošina posune o krok směrem dolů tak, aby byl povrch pevného polymeru pod hladinou pryskyřice. Před vytvářením další vrstvy může být povrch setřen stěračem za účelem nanesení vrstvy pryskyřice a celý proces pokračuje, dokud není celý díl hotov. Tiskárny firmy 3D Systems dosahují přesnosti modelů až $\pm 0,127\text{mm}$ pro počáteční nanesenou tloušťku (přibližně 2,5cm). Díky tloušťce paprsku $0,0705 \pm 0,0127\text{mm}$ lze v režimu vysokého rozlišení dosáhnout velmi kvalitních povrchů. Se dvěma zabudovanými komorami je možné tisknout modely o velikosti až 737 x 635 x 533mm. V současnosti je možné tisknout materiály jako je ABS, polykarbonát, nylon, polyetylen, polypropylen [1], [2].

Výhody:

Nepřetržitý provoz bez nutnosti dozoru, možnost tisku velmi malých i objemnějších modelů, vysoká přesnost a kvalita povrchů, široká škála použitelných materiálů [1].

Nevýhody:

Vyžaduje použití podpor, které jsou vytvářeny spolu s hlavní strukturou, následný časově náročný postprocessing (odstranění podpor a nežádoucích částí modelu), nutnost následného vytvrzení k dosažení celistvosti struktury [1].



Obr.1 Princip Stereolitografie [4]

1.2.1.2 PolyJet

Technologie PolyJet firmy Objet, která byla založena v roce 1988, funguje na bázi tryskání nejmodernějších fotopolymerních materiálů ve vrstvách tenkých 0,016mm a umožňuje vytvářet modely velmi vysoké kvality přímo z 3D dat. 3D model se nahraje do softwaru Objet Studio, který převede CAD data na STL nebo SLC soubor. Je zapotřebí zvolit orientaci objektu na podložce a zajistit vložení kazet s náplní do zařízení. Jedna kazeta obsahuje materiál vlastního modelu a druhá materiál podpory. Tryskací hlava, pohybující se pouze v osách x a y, nanáší požadované množství materiálu na podložku a ten je okamžitě vytvrzován působením UV záření. Samotný princip tisku je stejný jako u inkoustové tiskárny. Po dokončení první vrstvy se podložka posune o krok dolů a celý proces se opakuje [1], [5].

Výhody:

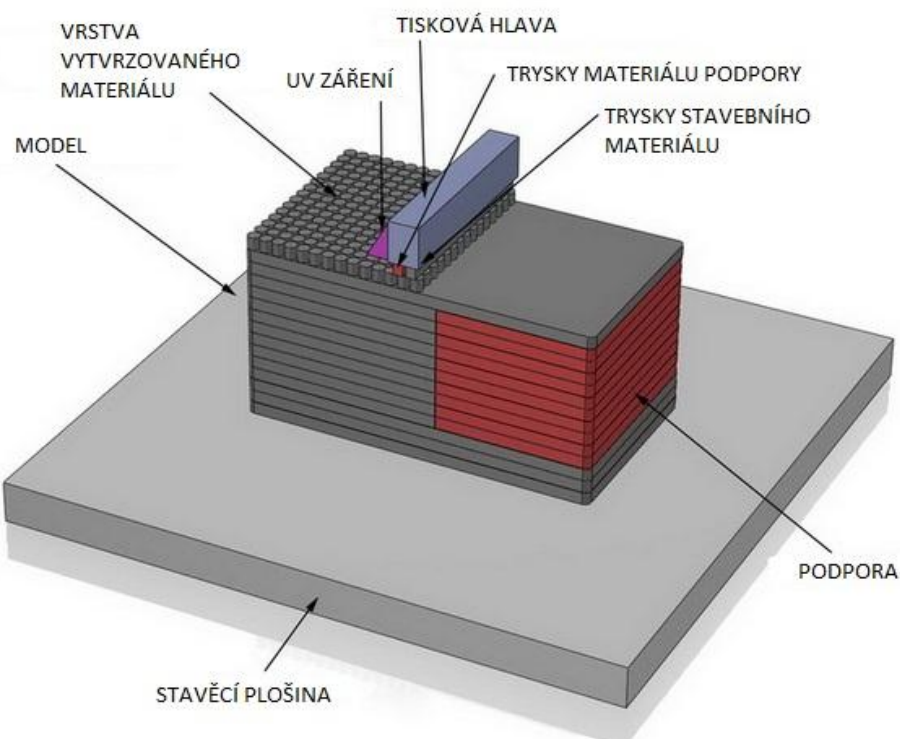
Vysoká kvalita a přesnost modelů, rychlost procesu, velmi hladký a kvalitní povrch i bez následného postprocessingu, široká škála použitelných materiálů, jednoduché použití (vyměňování kazet), možnost výměny jednotlivých trysek, bezpečný a čistý provoz (netoxický fotopolymerický materiál podpory, možnost umístění v kancelářském prostředí) [1].

Nevýhody:

Postprocessing (materiál podpory se odstraňuje vodním paprskem, existuje nebezpečí poškození velmi malých modelů s tenkými stěnami) [1].

PolyJet Matrix:

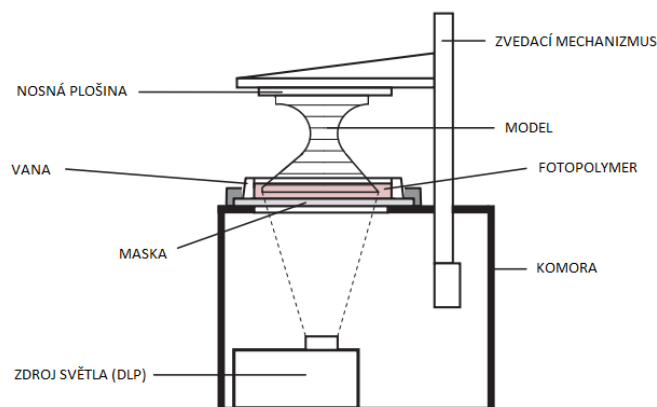
První technologie, umožňující současné dávkování dvou fotopolymerních materiálů. Je možné stavět modely s různými mechanicko-fyzikálními v jednom výrobním procesu. Tato technologie firmy Objet nabízí možnost výběru materiálů, jejichž vlastnosti se velmi podobají vlastnostem finálně aplikovaného materiálu [7].



Obr.2 Princip technologie PolyJet [6]

1.2.1.3 Perfactory

Princip této metody od firmy Envisiontec je založen na metodě SLA. Je ovšem odlišný ve způsobu vytvrzování pryskyřice. Fotopolymerizace je zajištěna technologií DLP (promítání obrazu na tzv. masku). Druhým rozdílem je opačný pohyb nosné plošiny. Po vytvoření první vrstvy se plošina posune o krok nahoru. Díky tomuto způsobu není potřeba použití podpor. Software tohoto zařízení umožňuje automatickou konverzi z nahraných CAD dat do formátu STL, což je velmi přínosné. Mezi výhody patří vysoká rychlost stavění, vhodnost pro kancelářské prostředí, minimální odpad (úspora pryskyřice) a malé smrštění. Největší nevýhodou je omezení velikosti tisknutých modelů. Metoda nachází uplatnění např. v lékařství a stomatologii [1].



Obr.3 Princip technologie Perfactory [8]

1.2.2 Na principu tuhé báze

1.2.2.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

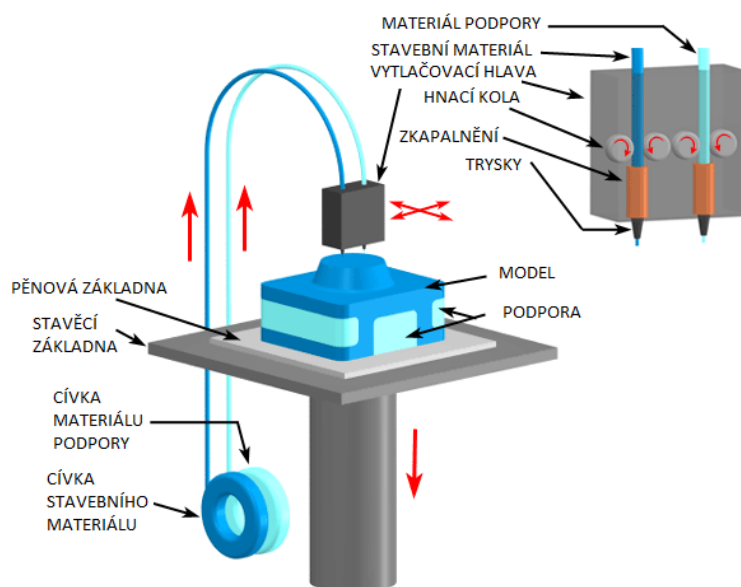
Firma Stratasys, která svůj první RP systém představila v roce 1922, je celosvětovým lídrem v distribuci těchto zařízení. Proces výroby tradičně začíná u nahrání 3D dat do zařízení. Tento systém používá formáty STL a IGES. Po zvolení orientace software používaný touto metodou automaticky vytvoří případnou podporu a rozdělí objekt na jednotlivé řezy o tloušťce minimálně 0,127mm. Stavební materiál je ve formě tenkého vlákna (drátu), uloženého v kazetě, popřípadě v cívce. Princip spočívá ve vtlačování drátu do vytlačovací hlavice, která materiál ohřeje na požadovanou teplotu a následně přes trysku nanáší na podložku, resp. vrstvu, vytvořenou v předchozím kroku, kde materiál okamžitě tuhne. Mechanismus FDM systému umožňuje dávkovat stavební materiál i materiál určený pro vytvoření podpory [1], [9].

Výhody:

Výroba plně funkčních dílů, minimální odpad, jednoduché odstraňování podpor, výroba relativně velkých dílů (až 914 x 610 x 914mm), jednoduchá výměna stavebních materiálů (i během procesu výroby) [1], [9].

Nevýhody:

Malá přesnost, pomalý proces, obtížně předvídatelné smrštění, riziko deformace modelu [1].



Obr.4 Princip technologie FDM [9]

1.2.2.2 Laminated Object Manufacturing (LOM)

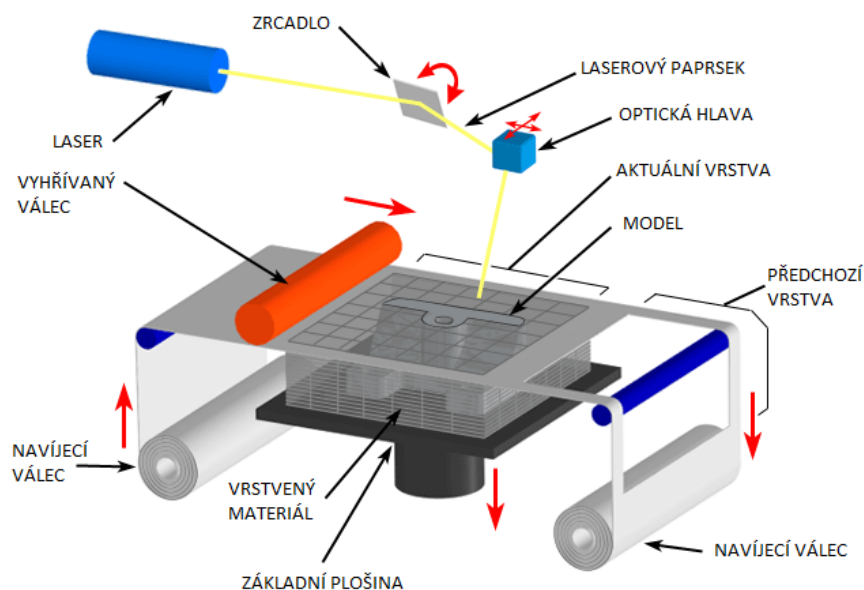
Technologie LOM, vyvinutá v roce 1985, je založená na vrstvení materiálu v podobě fólie a následné řezání laserem. Proces začíná nahráním CAD dat do zařízení, ve kterém software rozdělí model na jednotlivé řezy, definuje obvod a ze zbytku vytvoří podporu. Při procesu stavění modelu se z cívky odvíjí materiál potažený lepidlem, který je poté spojen s předchozí vrstvou pohybem vyhřívacího válce. Laser následně vytvoří obvod vrstvy a stavěcí základna se posune o krok dolů, aby se mohl celý proces zopakovat. Nejpoužívanějším stavebním materiálem je sulfátový papír. Je ovšem možné použít plasty, kovy, dokonce i keramické pásy [1], [10].

Výhody:

Široké spektrum použitelných materiálů, rychlý proces stavění modelu, vysoká přesnost, není nutné použití přídavných podpor a následného vytvrzování, hotové modely nejsou deformované.

Nevýhody:

Nutnost precizní kontroly a nastavení laserového paprsku, slabá celistvost modelů, nevhodné pro vytváření tenkých stěn, obtížné a zdlouhavé odstraňování podpor.



Obr.5 Princip technologie LOM [10]

1.2.2.3 Multi-Jet Modeling System (MJM)

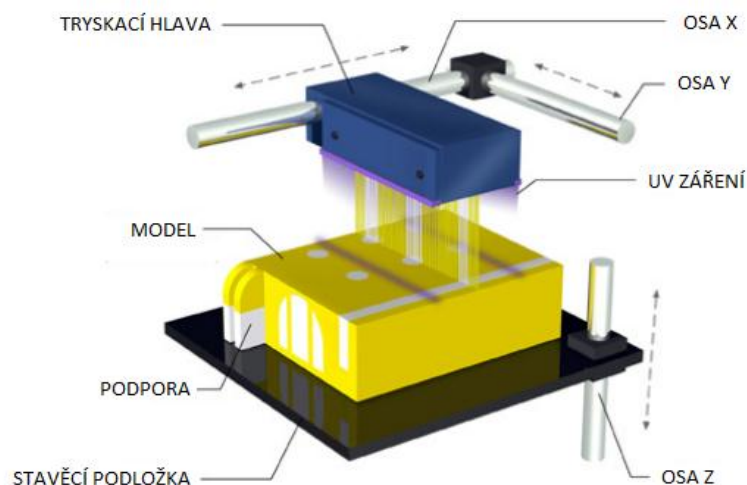
Princip této technologie firmy 3D System spočívá v nanášení jednotlivých vrstev materiálu pomocí speciální tiskové pracovní hlavy. Nahraný CAD model se opět pomocí speciálního softwaru rozdělí na jednotlivé řezy, určí se orientace a vytvoří se podpory. Velkou výhodou je, že program ProJet Accelerator provádí tyto první kroky automaticky, dokonce opraví i případné chyby, vzniklé převodem do formátu STL. Tisková hlava, obsahující několik stovek trysek, se pohybuje nad základní deskou a nanáší termo-polymerní materiál, který je posléze vytvrzován působením UV záření. Po vytvoření vrstvy se základní deska posune o krok dolů, aby se mohla začít tvořit vrstva další, zatímco tisková hlava se pohybuje v ose x, v případě nutnosti v ose y. Přesnost dosahovaná při výrobě modelů touto metodou je oproti většině RP systémů velmi vysoká [1].

Výhody:

Efektivní a jednoduché používání, vysoká přesnost, nízká cena používaných materiálů, rychlý proces stavění modelu, vhodnost pro použití v kancelářském prostředí.

Nevýhody:

Omezená velikost vytvářených modelů (max. 298 x 185 x 203mm), omezený výběr používaných materiálů.



Obr.6 Princip technologie MJM [8]

1.2.3 Na bázi prášku

1.2.3.1 Selective Laser Sintering (SLS)

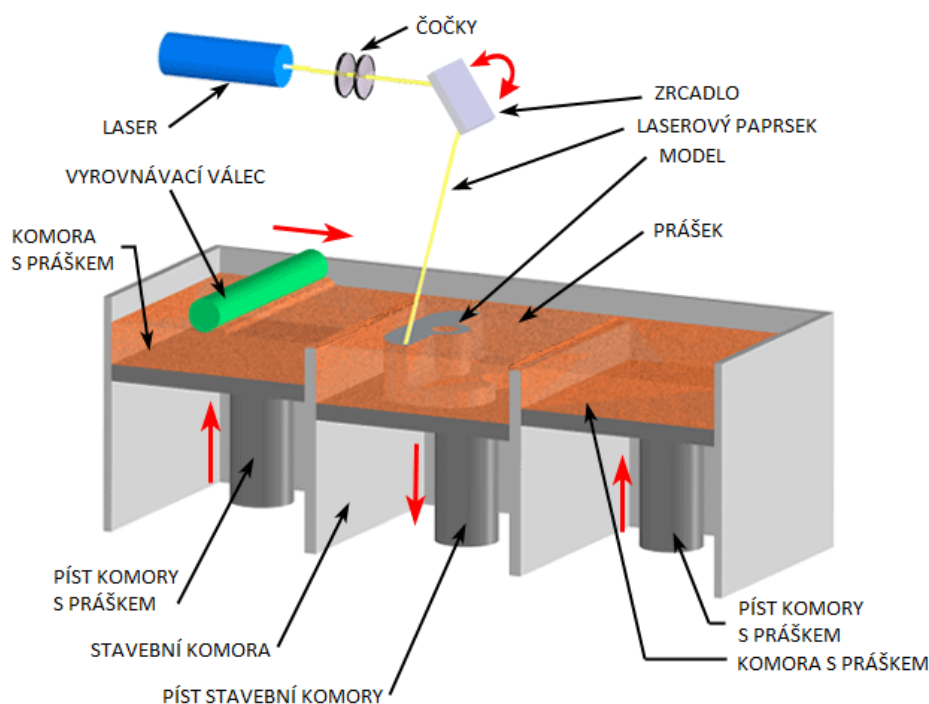
Proces výroby modelu touto technologií firmy 3D System jako obvykle začíná u nahrání CAD dat do softwaru zařízení, kde je objekt rozdělen na jednotlivé vrstvy. Následuje nanesení tepelně tavitelného prášku do komory, kde probíhá vlastní stavba modelu. Interakce laserového paprsku s práškem způsobí jeho roztavení a následné přetvoření částic na pevnou hmotu. Laser působí pouze v místech, náležících geometrii modelu, obklopující prášek slouží jako podpora. Po vytvoření vrstvy se komora posune o krok dolů a pomocí nanášecího mechanismu se na již vytvořenou vrstvu nahrne další vrstva prášku. Při dalším kontaktu laseru s práškem a již vytvořenou pevnou hmotou dochází k tzv. spékání a je zapotřebí v komoře udržovat vysokou teplotu. Energie, potřebná na spékání materiálu, je přibližně 300-500 krát větší než pro fotopolymerizaci. K zabránění oxidace a explozi je potřebné prostředí s inertním plynem. Potřebné je rovněž dobré chlazení komory. Po dokončení procesu stavby se model vyjme, nevyužitý prášek jednoduše odpadá a následuje případný postprocessing, nebo úprava povrchu, např. pískování, lakování [1], [11].

Výhody:

Stabilita a celistvost modelů, široká škála použitelných materiálů (termoplasty, kovy, keramika), není nutné dodatečné vytvrzování a používání podpor.

Nevýhody:

Velké rozměry zařízení, velká spotřeba energie, špatná jakost povrchu.



Obr.7 Princip technologie SLS [11]

1.2.3.2 3D Printing

Tato metoda firmy Z Corporation byla vyvinuta a patentována v roce 1993 a užívá tekuté pojivo k tužení vrstev naneseného prášku. Jak je vidět na obr. 12, vyrovnávací válec nahrne prášek do pracovní komory a vytvoří tenkou vrstvu, na kterou je později dávkováno tekuté pojivo. Proces je velice podobný, jako u metody SLS, s tím rozdílem, že místo laseru se ke spojování a tužení částic prášku používá tisková hlava, která umožňuje dávkování různých druhů barev ve formě kapek tekutého pojiva na místa, popisující geometrii tisknutého předmětu. Nevyužitá vrstva prášku slouží jako podpora. Když je vrstva dokončena, komora se posune o krok dolů, aby se mohla nanést další vrstva prášku a celý proces se opakuje. Po

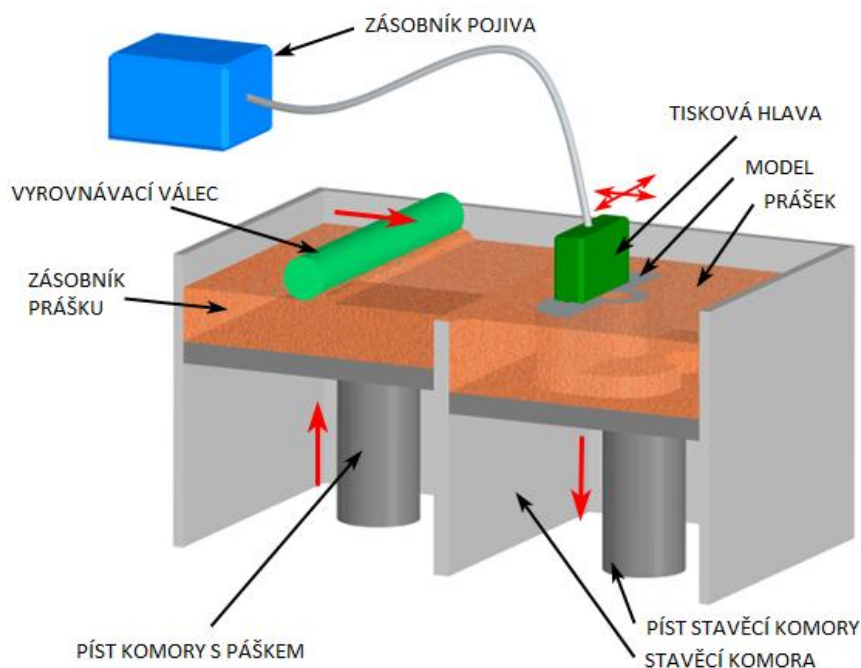
dokončení celého modelu se komora zvedne, zbývající prášek se odsaje, model se vyjme a následuje případná povrchová úprava. Tato technologie, připomínající princip inkoustových tiskáren, umožňuje tisk kovových, kompozitních, elastomerických a keramických materiálů [1], [12].

Výhody:

Vysoká rychlost tisknutí, široké použití modelů, jednoduché použití, minimální odpad, možnost tisknout barevné modely.

Nevýhody:

Špatná jakost povrchu, omezené použití pro testování funkčních schopností.

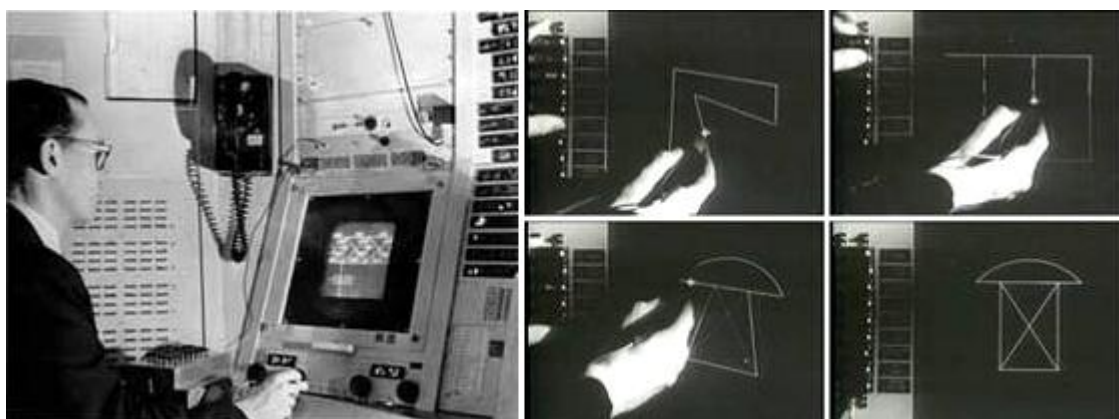


Obr.8 Princip technologie 3D Printing [12]

2 CAD APLIKACE

2.1 Historie CAD

Počátek kreslení na počítači je spojen s vynálezem světelného pera v roce 1950. Vytvořený obraz tehdy zůstával elektrostaticky zachycen na stínítku obrazovky, která byla zároveň využívána jako paměť. Uplatnění našel tento vynález v radarovém systému protivzdušné obrany. Později bylo světelné pero nahrazeno tabletem. Za začátek historie CAD je považováno vytvoření kreslicího programu Sketchpad v roce 1962 studentem Ivanem Sutherlandem. Nejednalo se však ještě o komerční produkt. Pro toto období je typické použití velkých počítačů, vektorově zobrazujících terminálů a softwaru, psaným primitivním způsobem v assembleru na děrnou pásku, ze které se načítal do počítače. Vysoká cena ovšem bránila širšímu použití a vlastnictví takových zařízení bylo výsadou automobilek, leteckých společností a vývojových laboratoří [13], [14].



Obr.9 Počátky kreslení na počítači pomocí světelného pera [13]

První komerčně dostupný CAD systém vydala společnost Digigraphics division of Control Data v roce 1964. Jednalo se o následníka systému The Electrical Drafting Machine od firmy ITEK. Ve stejném roce byl v General Motor Research Laboratories navržen první CAD/CAM systém, používající interaktivní grafiku. Bylo možné zadávat popis automobilu, rotaci a pohled pod různými úhly. Projekt byl však i přes jeho užitečnost pozastaven. Během následujících let bylo vydáno několik dalších obdobných programů. V roce 1972 byl vydán první objemový 3D modelovací program. Nejednalo se o klasický CAD software, ale program pro vykonávání analýz nukleárního radiačního záření, 3D modely v něm však byly podobné modelům budoucích 3D softwarů [13].

Konec vektorové grafiky a začátek používání rastrové, tak jak ji známe dnes, je spojen s rokem 1978, kdy byly vymyšleny výpočetní algoritmy pro zobrazování skrytých ploch a byl specifikován 3D průmyslový standart IGES pro výměnu dat mezi konstrukčními systémy, který je uznáván dodnes. V roce 1980 se v programu typu Arch Model objevila možnost modelování těles s trojrozměrnou grafikou ploch a renderováním. Do té doby samotný model existoval pouze v drátěné podobě, iluze plochy modelu se vytvářela sítí čar. Z konce 80. let pochází mnoho dnes stále ještě známých a používaných 2D i 3D CAD systémů, jako např. AutoCAD a CATIA. V polovině 90. let se zrodila myšlenka parametrického modelování. Podstata spočívala v hrubém naskicování tvaru, zakótování a v následném postupném zpřesňování návrhu přes parametry až do konečné podoby. V roce 1988 společnost PTC spustila komerční prodej systému Pro/Engineer, jehož koncepci parametrického modelování rychle přebraly další produkty, např. SolidWorks, SolidEdge, Unigraphics [13], [14].

2.2 Porovnávání CAD aplikace

Výběr CAD programů pro porovnání byl proveden tak, aby byly zastoupeny softwary nižší, střední i vyšší třídy. Významnou roli také hrálo hledisko dostupnosti a využívání jednotlivých programů v průmyslové výrobě nebo pro výuku. Všechny níže zmíněné aplikace byly dostupné jako školní nebo zkušební verze.

Alibre Design 2012

Alibre Design je zástupce nižší třídy. Jedná se o 3D parametrický modelář, disponující i některými pokročilými modelovacími nástroji jako např. Booleovské operace, 3D skica, skořepina a další. Nástroje pro práci s plochami jsou zde zastoupeny v malé míře. Ve verzi Professional jsou k dispozici nástroje pro tvorbu výkresů, plechové díly, knihovna dílů a převod do univerzálních formátů (STEP, IGES). Export STL souboru umožňuje i základní balík Personal. Verze Expert nabízí moduly Alibre Motion, Alibre CAM a import souborů jiných CAD aplikací [17].

Dostupné varianty a ceny:

Alibre Design Personal 4 700Kč; Alibre Design Professional 24 000Kč; Alibre Design Expert 47 900Kč. Ceny jsou uvedeny bez DPH [17].

SolidWorks 2012

V současnosti nejúspěšnější strojírenský 3D CAD systém na českém trhu. Tento parametrický 3D modelář nabízí výkonné objemové i plošné modelování, nástroje pro plechové díly, svařence, formy, práci s neomezeně rozsáhlými sestavami a automatické generování výrobních výkresů. Uživatelské rozhraní je velmi intuitivní. SolidWorks je k dispozici ve třech variantách (Standard, Professional a Premium). Verze Professional nabízí oproti Standardu navíc např. knihovnu normalizovaných součástí a fotorealistické zobrazení. Ve verzi Premium je navíc např. pohybová simulace a modul pro import naskenovaných dat (viz kapitola 2.3.1) [19].

Dostupné varianty a ceny:

SolidWorks Standard 165 000Kč; SolidWorks Professional; SolidWorks Premium 248 000Kč. Ceny, uvedené firmou SolidVision, jsou bez DPH.

Autodesk Inventor 2012

Autodesk Inventor patří mezi celosvětově nejprodávanější CAD aplikace pro strojírenskou 3D konstrukci. V současné době je tento parametrický modelář nabízen v celé řadě balíků. Ve verzi Standart jsou obsaženy tradiční výkonné nástroje pro modelování, tvorbu výkresové dokumentace a práci se sestavami. Inventor Professional nabízí navíc např. knihovny normalizovaných spojovacích dílů a potrubí, pevnostní analýzy a v nové verzi 2013 se objeví možnost načtení mračna bodů z formátu PCG. Autodesk Inventor je možné zakoupit v základní verzi za 3 900€ (cca 98 500Kč) a Professional za 8 000€ (cca 202 000Kč). Informace o cenách poskytla firma CAD Studio [18].

Catia

Program Catia, vyvíjený společností Dassault Systèmes, je multiplatformní komerční PLM/CAD/CAM/CAE software s dlouholetou tradicí. Vyznačuje se průmyslovou univerzálností, může být použit pro nejrůznější oblasti strojírenství. V leteckém a automobilovém průmyslu je světově nejpoužívanějším CAD systémem. CATIA disponuje širokým spektrem modulů, které umožňují pokrýt návrhářskou práci od tvorby designu, vlastní konstrukce, přes různé analýzy, simulace a optimalizace až po tvorbu výkresové

dokumentace a NC programů. Podporuje také práci více konstruktérů v rámci jednoho projektu, zejména verze V6 je založena na PLM platformě. V současné době jsou dostupné verze V4, V5, V6. Základní konfigurace Catia Team PLM, založená na platformě P1 obsahuje moduly pro modelování dílů a sestav, povrchové modelování, tvorbu výkresové dokumentace, práci s univerzálními formáty, správu dat a spolupráci konstruktérů na jednom projektu. Pro technologie RP a RE jsou připraveny speciální moduly, které v kombinaci s aplikacemi pro tvarování a styling, určené pro splnění nejvyšších požadavků v oblasti volného i parametrického designu, představují opravdovou špičku v této oblasti [20], [21].

Dostupné varianty a ceny:

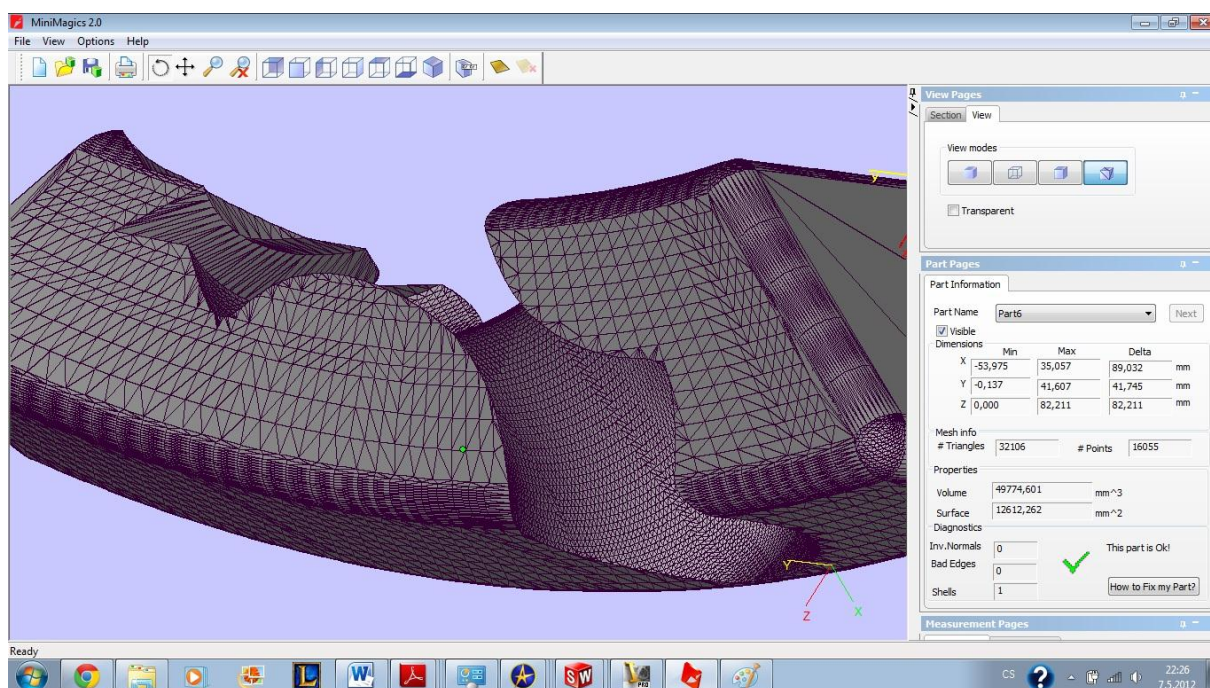
Základní konfigurace Catia Team PLM, založená na platformě P1, je k dispozici za 11 000€ (cca 277 750Kč). Pravidelný roční poplatek za upgrade, údržbu a servis činí 1980€ (cca 50 000Kč). Balíček pro RE, Catia Reverse Engineering, stojí 16 800€ (cca 424 200Kč). Pravidelný roční poplatek za upgrade, údržbu a servis tohoto balíčku činí 3 024€ (cca 76 400Kč). Ceny uvedené distributorem, společností Technodat, jsou bez DPH.

2.2 STL formát

Formátu STL, vytvořeném firmou 3D Systems, je věnována velká pozornost především proto, že je v podstatě standardním formátem pro systémy RP. Tento soubor se skládá z trojúhelníkových plošek, reprezentujících povrch objektu. Existují dva druhy formátu, ASCII a binární. Formát ASCII je větší, než binární, ale je člověkem čitelný [1].

2.2.1 Export STL

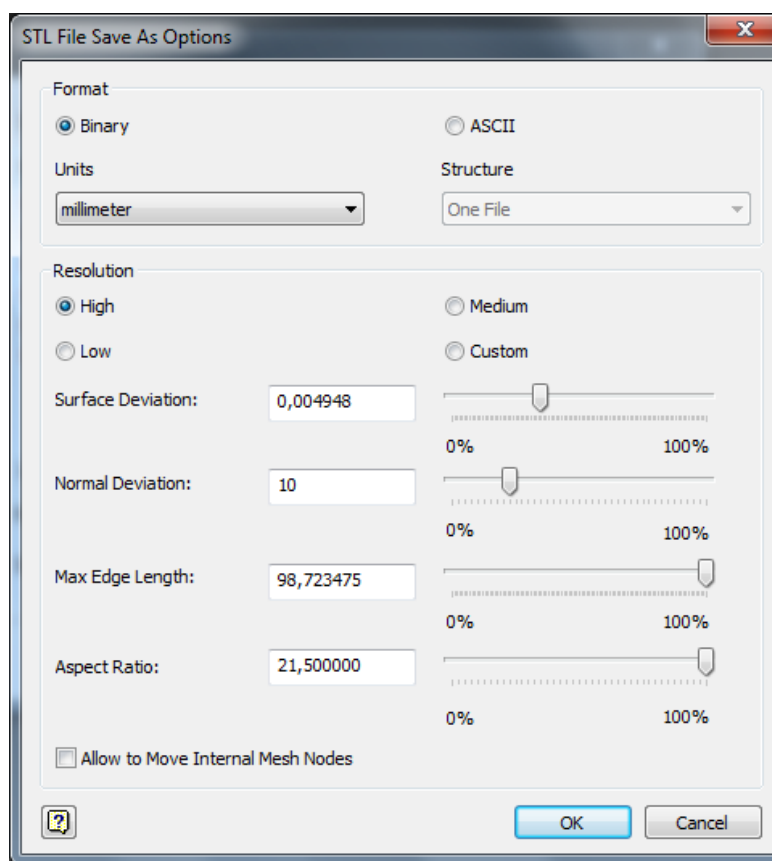
Nedokonalý převod do tohoto formátu často způsoboval nemalé problémy. Objevovaly se chyby jako mezery, chybějící plošky, zdeformované a překrývající se trojúhelníky. Pro zjištění a opravení případných chyb existuje řada softwarů. Některé tyto profesionální aplikace, jako např. software Magics, jsou součástí vybavení některých RP systémů. Pro testování algoritmu převodníků nejnovějších verzí porovnávaných CAD aplikací byl použit software MiniMagics 2.0, jehož 30ti denní zkušební verze je ke stažení na internetu.



Obr.10 Ukázka ověření kvality formátu STL v softwaru MiniMagics 2.0 [1]

Pro porovnání byly v testovaných CAD aplikacích vymodelovány tělesa s nejrůznější geometrií (kulové plochy, skořepiny, plochy vytvořené spojením více různých profilů apod.). Ty byly následně exportovány do formátu STL a importovány do softwaru MiniMagics. Bylo zjištěno, že kvalita převodu oproti starším verzím softwarů je výborná. Nedochází již k výše zmíněným chybám.

Všechny programy umožňují vlastní nastavení jednotlivých parametrů, které ovlivňují kvalitu, rozlišení a velikost výstupního souboru, viz obr.11.



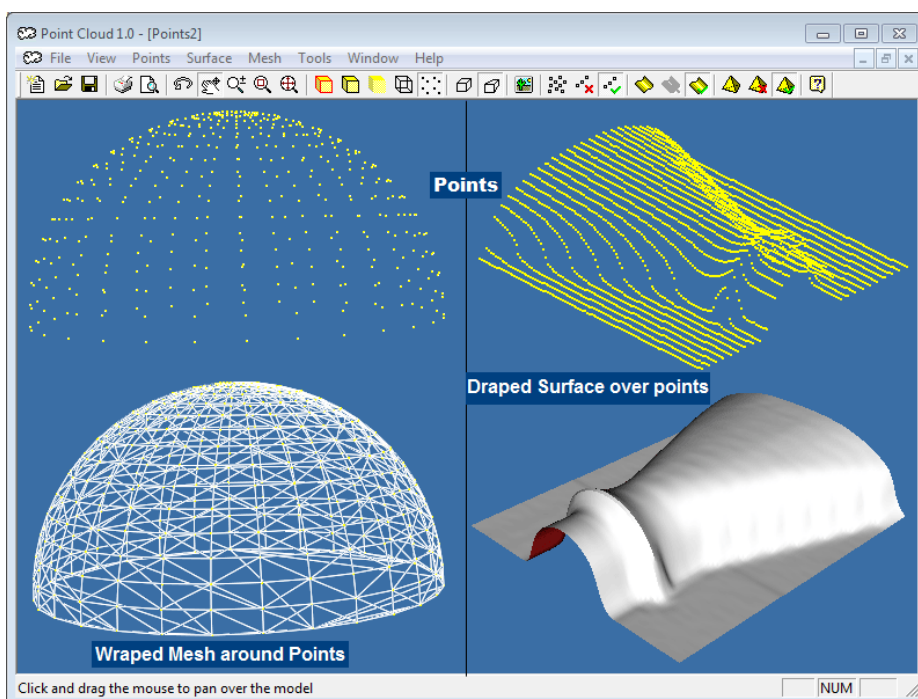
Obr.11 Možnost nastavení parametrů exportu do formátu STL v Autodesk Inventor Professional 2012

2.3 Reverzní inženýrství (RE)

Reverzní inženýrství je proces měření, analyzování a testování s cílem sestrojení stejné nebo podobně fungujícího předmětu. Je to technologie opětovného vynalezení, odkrytí principu funkce zkoumaného předmětu. V dnešní době nachází metody RE využití ve většině průmyslových odvětví, jako např. automobilový a letecký průmysl, architektura a stavební průmysl, zdravotnictví, elektrotechnika, ale třeba i ve forenzních vědách. Na zlepšení a zjednodušení RE má významný podíl vývoj technologie 3D skenování. Jedním z prvních kroků v RE je rekonstrukce předmětu z dat získaných skenry nebo sondami. Proces může být rozdělen do čtyř fází: získání dat, rozdělení ploch na mnohoúhelníky, zjemnění a vytvoření modelu. Kvalita finálních modelů závisí na nasbíraných datech, použitých matematických metodách a zamýšleném použití [15].

2.3.1 Import a editace naskenovaných dat

Pro práci s naskenovanými daty existují ve vyspělých CAD aplikacích jednotlivé moduly, umožňující import a následnou editaci formátu STL, mračen bodů a souborů sítě. Pokud programy tuto možnost postrádají, je možné nainstalovat přídatné moduly od firmy Sycode, umožňující načtení souboru STL, které ovšem nejsou zdarma. Cena takového modulu pro import STL se pohybuje v rozmezí 150-300\$. Firma Sycode se zabývá vývojem samostatně fungujících programů nebo přídatných modulů do CAD systémů. K dispozici je např. i program Point Cloud, který umožňuje vytvoření modelu z tzv. mračen bodů (viz obr. 12) a následné uložení do STL nebo podobných formátů.

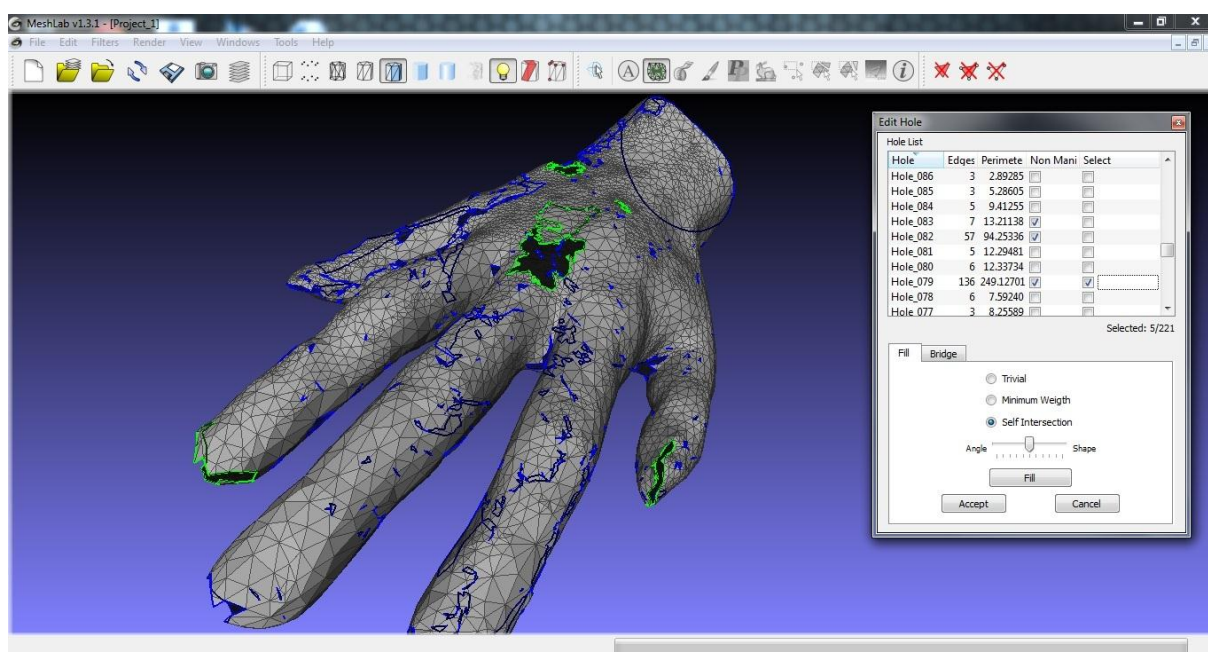


Obr.12 Program Point Cloud [16]

MeshLab:

Velmi mocným nástrojem je freewarový program MeshLab. Jedná se o software, umožňující zpracování a úpravu nestrukturovaných 3D trojúhelníkových sítí. Systém je zaměřen na pomoc při zpracování souborů vznikajících především 3D skenováním a poskytuje soubor nástrojů na úpravu, čištění, kontrolování, renderování a konverzi takovýchto druhů sítí. Čistícími filtry lze odstraňovat duplicitní a neodkazované vrcholy, sjednocovat

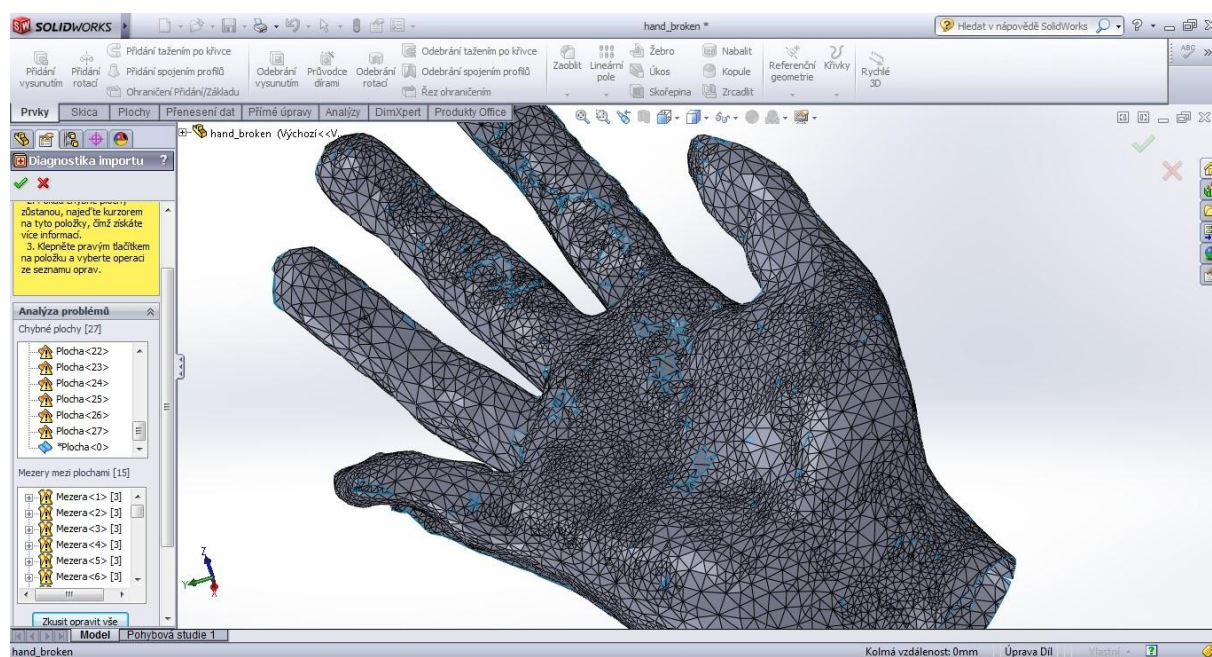
normály, mazat plochy a automaticky vyplňovat díry. Remesh filtry umožňují vysoce kvalitní zjednodušování, rozdělávání ploch, rekonstrukci plochy z mračna bodů a vyhlazování. Dále jsou k dispozici nástroje pro různé analýzy, měření, vizualizace a malování. Lze tedy konstatovat, že použití MeshLabu v kombinaci s vyspělým CAD programem umožňuje téměř dokonalou kontrolu nad vytvářením prototypů. Upravený objekt je možné uložit jako STL a s ním dále pracovat nebo přímo tisknout.



Obr.13 Vyplňování děr v programu MeshLab

SolidWorks:

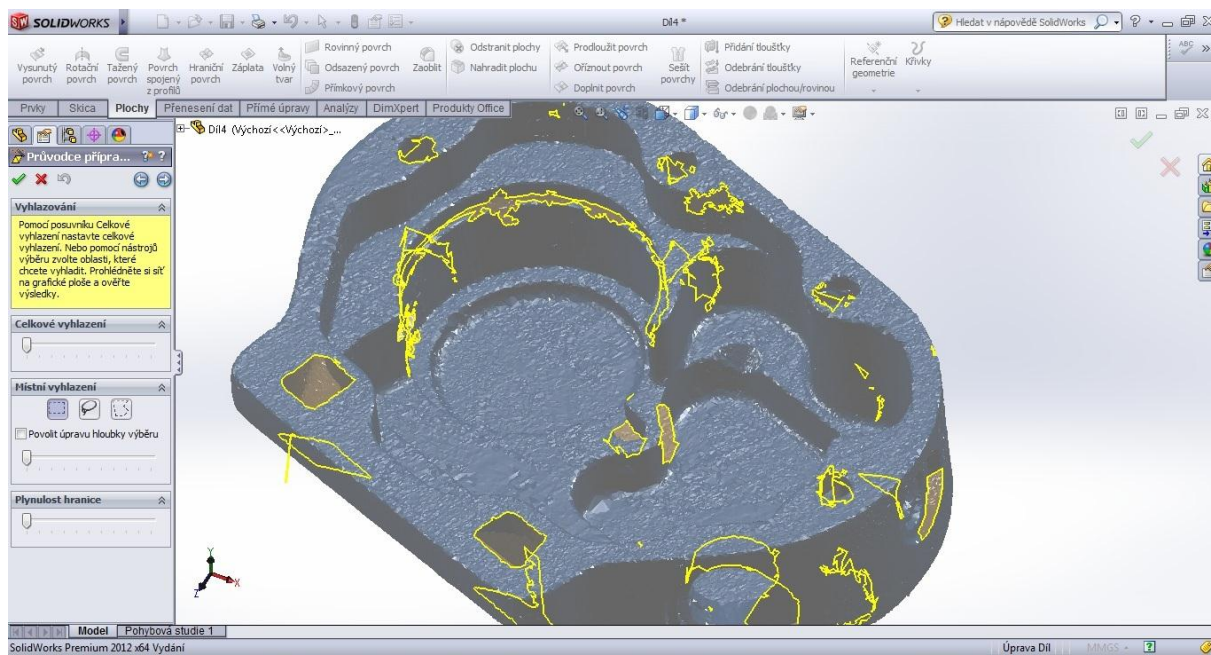
STL soubor je v SolidWorks Standard možné načíst jako objemové nebo povrchové tělo a pomocí diagnostiky importu automaticky opravit případné chyby (viz obr. 12). Někdy je ovšem výhodnější model přijmout i s chybami a výsledný model upravovat pomocí základních i pokročilých modelovacích nástrojů, jako např. sešití povrchů, zaplátování a další. Takto se dá s modelem pracovat, stejně jako s formáty STEP a IGES.



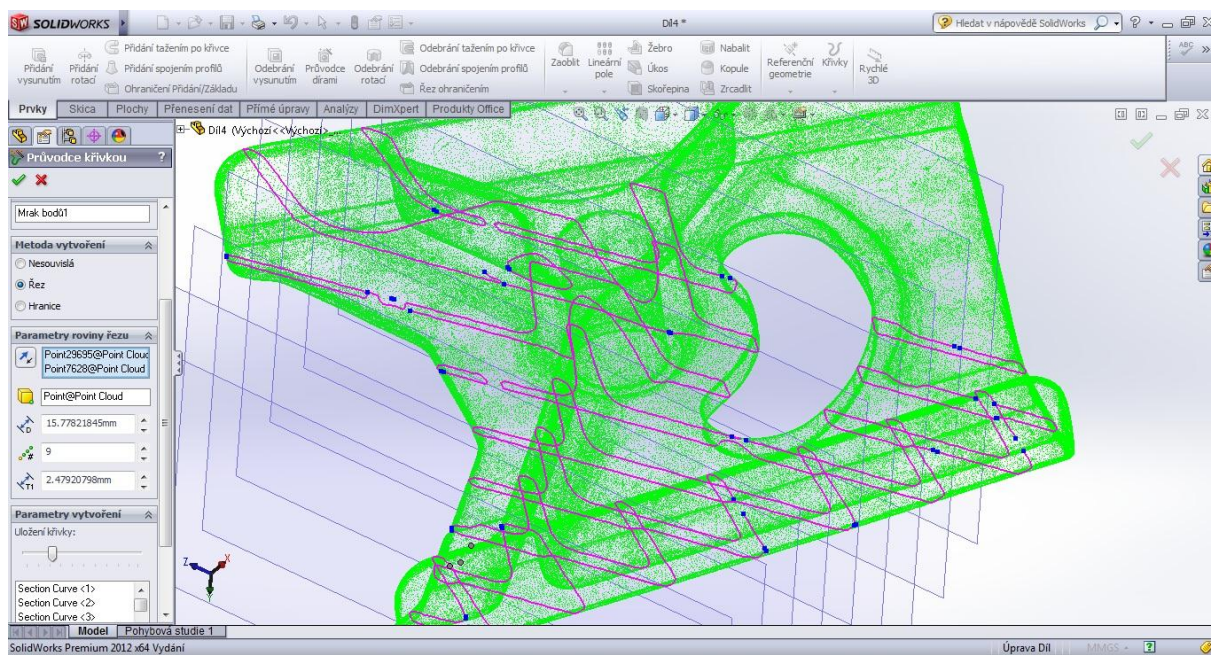
Obr.14 Import souboru STL do SolidWorks

Modul Scan To 3D:

Tento modul je obsažen ve verzi SolidWorks Premium a slouží k základním úpravám polygonální sítě (*.nrm; *.scn; *.3ds; *.obj; *.stl; *.ply a další) a mračna bodů (*.txt; *.xyt; *.asc; *.vda; *.igs). Tyto soubory lze pomocí průvodce převést na plošný nebo objemový model a pracovat s ním dostupnými nástroji. Po načtení souboru se může zvolit orientace, odstranit okolní šum a nadbytečná data a celý mrak bodů zjednodušit (procentuálně upravit celkovou velikost). Dále je možné provést lokální nebo celkové vyhlazení a automatické vyplnění děr. Po dokončení těchto kroků je možné vybrat mezi automatickým a řízeným modelováním. V režimu automatické modelování si SolidWorks sám vytvoří návrh neparametrických ploch na objektu a uživatel může v případě nesprávného přichycení manuálně plochy upravit. V řízeném modelování uživatel ovlivňuje tvorbu ploch od začátku, k vybraným úsekům se přichytává požadovaný tvar plochy. K dispozici je dále analýza odchylek. Ta slouží ke kontrole odchylek polygonálních sítí a nově vytvořených ploch. Další užitečnou funkcí je Průvodce křivkou. Křivky získané z řezů nebo hranic importovaného objektu slouží k opětovnému modelování pomocí tradičních nástrojů.



Obr.15 Ukázka možností Modulu Scan To 3D



Obr.16 Ukázka možností Modulu Scan To 3D

3 KLÍČOVÉ VLASTNOSTI CAD APLIKACÍ

S ohledem na použití pro systémy RP byly zvoleny následující klíčové vlastnosti CAD aplikací:

- 3D modelování (základní i pokročilé modelovací nástroje jako např. Booleovské operace, 3D skica, plošné nástroje, skořepina, tažení profilu po křivce a další)
- Export do formátu STL
- Import a editace univerzálních formátů a dat získaných 3D skenováním (mračna bodů, STL, soubory sítě, STEP, IGES a další)

3.1 3D modelování

Základním předpokladem pro výrobu prototypu pomocí systémů RP je vytváření 3D modelů, které významně ovlivňují možnosti modelovacích nástrojů a uživatelské rozhraní. Uživatelské prostředí jednotlivých porovnávaných aplikací se od sebe navzájem principiálně tolik neliší. Výjimkou je software Catia, který může být pro uživatele, zvyklého pracovat v prostředí jako je Inventor nebo SolidWorks, poněkud složitý. Možnosti modelovacích nástrojů v podstatě odpovídají kategoriím, do kterých jednotlivé programy patří a tedy i jejich cenám. Příjemným překvapením jsou ovšem možnosti nízkonákladového softwaru Alibre Design, který při tvorbě tvarově jednodušších modelů obstojí před konkurencí vyspělejších programů a je tedy vhodný pro nasazení do výroby prototypů, kde se nepředpokládá tisk tvarově složitých součástí. Pro výrobu tvarově složitých modelů jsou vhodné softwary střední třídy jako Autodesk Inventor a Solidworks. SolidWorks ovšem disponuje lepšími nástroji pro práci s plochami. Nejvyšším požadavkům na tvarovou náročnost tisknutých modelů vyhoví software Catia, který uplatňuje svoje výkonné nástroje především v leteckém a automobilovém průmyslu.

3.2 Export formátu STL

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.2.1, export 3D dat z porovnávaných CAD aplikací do formátu STL nepředstavuje takový problém, jako tomu bylo dříve díky nedokonalým algoritmům jednotlivých převodníků. V případě výskytu chyby v exportovaném souboru pro

tisk je možné nasazení programů (např. MeshLab nebo Magics), které umožňují jednoduchou opravu. Je tedy zřejmé, že kombinace CAD softwaru a některého ze zmíněných programů zajišťuje velmi dobrou kontrolu nad přípravou výroby prototypu. Pro samotný tisk může být velmi přínosné nastavení jednotlivých parametrů pro převod do formátu STL. Zejména pro velmi přesné RP systémy je důležité vysoké rozlišení a kvalita vstupního souboru.

Tab.1 Parametry a možnosti exportu STL

	Parametry a možnosti
Alibre Design	Normálová odchylka, maximální velikost buňky, povrchová odchylka
SolidWorks	ASCII/binární, milimetry/palce, úhlová a délková odchylka
Inventor	ASCII/binární, milimetry/palce, normálová odchylka, povrchová odchylka, maximální délka hrany, poměr stran, možnost pohybu vnitřních uzlů sítě
Catia	Maximální délka hrany, rozdělování a slučování sítě, reorganizace trojúhelníků, vyplňování děr, lokální/globální úpravy sítě. Tyto možnosti nabízí modul STL Rapid Prototyping, obsažený v Catia Reverse Engineering.

3.3 Import a editace univerzálních formátů a dat získaných 3D skenováním

Import a úprava univerzálních formátů jako jsou STEP nebo IGES je pro softwary střední a vyšší třídy samozřejmostí i v základních verzích. STL formát je možné načíst pomocí doplňkových modulů (viz kapitola 2.3.1) a editovat pomocí dostupných nástrojů, pokud tedy není import základním vybavením daného programu. Pro import a úpravu mračna bodů a soubory sítě existují speciální moduly, které se vyskytují zpravidla v nejvyšších verzích jednotlivých programů. Z porovnávaných softwarů tyto možnosti nabízí SolidWorks a Catia.

Tab.2 Porovnání možností importu

	Import STEP a IGES	Import STL	Import a úprava naskenovaných dat
Alibre Design	Ano, ve verzi Professional a Expert	Ano, pomocí doplňkových modulů (Sycode)	Ne
SolidWorks	Ano, v nejnižší verzi	Ano	Ano, ve verzi Premium
Inventor	Ano, v nejnižší verzi	Ano, pomocí doplňkových modulů (Sycode), v připravované verzi 2013 bude import standardem	Ne, ale v připravované verzi 2013 bude speciální modul pro RE
Catia	Ano	Ano, modul STL Rapid Prototyping	Ano, modul Reverse Engineering

3.4 Doporučení

Vzhledem k výše popsaným vlastnostem a možnostem CAD aplikací je možné provést některá obecná doporučení. Pro výrobu tvarově jednoduchých strojírenských prototypů (např. ozubená kolečka, příruby a různé upínací díly) je vhodné použití softwaru Alibre Design Professional z důvodu výborného poměru cena/výkon. Za předpokladu tisku tvarově složitých modelů je třeba volit software vyšší kategorie. Základní balíčky Inventoru a SolidWorks mají dostatečné možnosti na splnění požadavků pro modelování složitých strojírenských součástí. Software Catia je vhodné použít zejména pro výrobu tvarově velmi složitých prototypů (např. karosářské díly, kloubní náhrady apod.). Pro práci s naskenovanými daty je lze doporučit softwaru SolidWorks Premium a speciální konfiguraci softwaru Catia. Vzhledem k vysoké ceně Catie je potřeba zvážit nutnost nasazení tohoto softwaru. Je ovšem zřejmé, že tento program nabízí nejlepší nástroje pro práci v této specifické oblasti.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce je zaměřena na současné možnosti technologií 3D tisku a vlastnosti CAD aplikací. První část je zaměřena na seznámení s technologií Rapid prototyping. Zde jsou popsány vybrané stěžejní metody a principy, reprezentující jednotlivé kategorie. Pozornost je také věnována možnostem uplatnění jednotlivých metod a hlavním výhodám a nevýhodám. V další části jsou představeny porovnávané CAD aplikace, jejich možnosti a varianty. Výběr byl proveden s ohledem na dostupnost a využívání v průmyslové výrobě tak, aby byly zastoupeny programy nižší, střední i vyšší třídy.

Vzhledem k tomu, že pro vlastní 3D tisk je podstatná kvalita STL formátu, je problematice exportu, importu a editaci právě tohoto formátu věnována další část práce. Pro otestování kvality převodu 3D modelu do formátu STL byl vybrán program MiniMagics. Do něj byly importovány modely nejrůznější geometrické a tvarové složitosti, vytvořené zmíněnými CAD aplikacemi. Výsledky jsou velmi uspokojivé. Lze konstatovat, že převod je u všech softwarů prakticky bezchybný, což představuje pokrok ve vývoji modulů, zajišťujících export do STL. Je ovšem zapotřebí zmínit, že případné chyby lze odstranit použitím profesionálních aplikací nebo některých freewarových programů.

Další část je věnována importu a editaci formátu STL, univerzálních formátů a dat, získaných 3D skenováním. Zde jsou zmíněny možnosti doplňkových modulů a programů pro import a editaci STL a byl představen modul pro reverzní inženýrství, který byl prakticky vyzkoušen.

V závěru práce jsou popsány klíčové vlastnosti CAD aplikací a je provedeno jejich zhodnocení s ohledem na použití pro systémy RP. Jsou také provedena obecná doporučení pro použití jednotlivých CAD softwarů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. CHUA, C.K., K.F. LEONG a C.S. LIM. *Rapid Prototyping : Principles and Applications*. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2010. ISBN 978-981-277-897-0[cit.2012-04-29].
2. Services. *ProtoCAM* [online]. [11 April 2012] [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.protocam.com/html/slapro.html>
3. Additive Fabrication. *CustomPartNet* [online]. © 2009 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
4. Stereolithography. *CustomPartNet* [online]. © 2009 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
5. *Objet* [online]. © 2012 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/>
6. Additive Manufacturing Technologies. *New Zealand Rapid Manufacturing Association* [online]. © 2011 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.ciri.org.nz/nzrma/technologies.html>
7. PolyJet. *E-Prototypy* [online]. © 2010 [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://www.e-prototypy.cz/nabidka/3d-tisk/polyjet>
8. *Rapid Prototyping : Principles and Applications* [online]. 3. vyd. 2010 [cit. 2012-05-01]. ISBN 978-981-277-897-0. Dostupné z: http://www.worldscibooks.com/etextbook/6665/6665_chap03.pdf
9. Fused Deposition Modeling. *CustomPartNet* [online]. © 2009 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
10. Laminated Object Manufacturing. *CustomPartNet* [online]. © 2009 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
11. Selective Laser Sintering. *CustomPartNet* [online]. © 2009 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
12. 3D Printing. *CustomPartNet* [online]. © 2009 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>

13. Historie CADu. *FREE.tCAD.cz* [online]. ©1993-2012 [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: http://free.tcad.cz/cad_historie.html
14. Stručná historie CAD/CAM až po současnost. *Fakulta informatiky Masarykovy univerzity* [online]. ©2002 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2002/xkubin2_CAD-CAM.htm
15. WANG, Wego. *Reverse Engineering : Technology of Reinvention*. 1. vyd. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2011. ISBN 978-1-4398-0630-2.
16. Point Cloud. *Sycode* [online]. ©2008 [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: http://www.sycode.com/products/point_cloud/index.htm
17. Alibre Design. *SoliCAD* [online]. ©2008 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.solicad.com/CZ/CAD-Software/Alibre-Design/porovnani>
18. Inventor. *CAD Studio* [online]. ©2012 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.cadstudio.cz/inventor>
19. SolidWorks. *SolidVision* [online]. ©2012 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.solidvision.cz/solidworks/>
20. Catia. *Technodat* [online]. ©2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.technodat.cz/catia>
21. *Product Lifecycle Management* [online]. ©2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.catia.cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
RP	[-]	Rapid prototyping
SLA	[-]	Stereolitography
FDM	[-]	Fused Deposition Modeling
SLS	[-]	Selective Laser Sintering
MJM	[-]	Multi-Jet Modeling
LOM	[-]	Laminated Object Manufacturing
CAD	[-]	Computer-Aided Design
3D	[-]	Three dimensional
STL	[-]	Standard Tessellation Language
STEP	[-]	Univerzální CAD formát
IGES	[-]	Univerzální CAD formát
ABS	[-]	Termoplast
PLM	[-]	Product Lifecycle Management
CAM	[-]	Computer-Aided Manufacturing
CAE	[-]	Computer-Aided Engineering

