



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## **METODY RYCHLÉHO PROTOTYPOVÁNÍ POUŽITELNÉ VE SLÉVÁRENSTVÍ**

RAPID PROTOTYPING METHODS SUITABLE FOR FOUNDRY TECHNOLOGY

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**HANA KADLECOVÁ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2010/11

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Hana Kadlecová

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

### **Metody rychlého prototypování použitelné ve slévárenství**

v anglickém jazyce:

### **Rapid prototyping methods suitable for foundry technology**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ve slévárenství je jedním z prioritních úkolů nalezení postupů vedoucích ke zkrácení doby mezi poptávkou a předložením prototypového odlitku. Mezi tyto postupy patří především metody RP v kombinaci s technologií vytavitelného modelu.

Cíle bakalářské práce:

Literární přehled metod rychlého prototypování vhodných pro slévárenské aplikace.

Seznam odborné literatury:

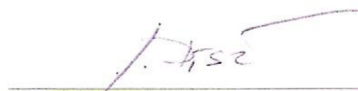
1. WIMPENNY, D. RP – a route to rapid castings. In Proceedings of the 11th World Congress on Investment Casting. Edinburgh: ICI, 2004, p. 120-135.
2. CHARVÁT, O. a HORÁČEK, M. Možnosti aplikace metod Rapid Prototyping s použitím technologie vytavitelného modelu. In Sborník - XIII. mezinárodní konference. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, Slovensko, 2007, s. 53-65.
3. PAVELKA, T. Přehled pokročilých technik Rapid Prototyping a jejich využití v oblasti lékařství. Bachelor thesis. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2006. 36 p.
4. HORÁČEK, M., CHARVÁT, O., et al. Rapid wax patterns obtained by RP and silicone mould technologies. In Proceedings of the 48th Foundry Conference. Ljubljana: Društvo livarjev Slovenije, 2009, p. 57-65.
5. HORÁČEK, M., CHARVÁT, O. and MICHALEC, P. Combination of Rapid Prototyping and Investment Casting Technologies - a route to "Rapid Castings". In Proceedings of the 47th International Foundry Conference. Ljubljana: Društvo livarjev Slovenije, 2007, p. 48-54.
6. CHARVÁT, O., HORÁČEK, M. and PAVELKA, T. Production of Knee Replacement by Using RP Technology. In Proceedings of the 9th International Foundrymen Conference. Sisak: Faculty of Metallurgy Sisak, 2009, p. 63-69. ISBN 953-97821-9-8.


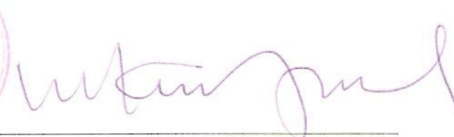
Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

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

  
  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## ABSTRAKT

Rapid Prototyping je nezbytnou součástí odvětví moderního slévárenství. Cílem této bakalářské práce je přehled moderních technologií Rapid Prototyping (RP). Dále se tato práce zabývá nejdůležitějšími aplikacemi ve slévárenském průmyslu se zaměřením na metodu vytavitelného modelu.

### Klíčová slova

Rychlé Prototypování, Slévárenství, Stereografie, Selective Laser Sintering, Fused Deposition Modeling, Laminated Object Manufacturing, Three-Dimensional Printing, Vytavitelný model

## ABSTRACT

Rapid Prototyping is an essential part of functioning of the modern foundry. The aim of this bachelor thesis is an overview of modern technologies of Rapid Prototyping (RP) techniques. Furthermore, this work addresses the most important applications in the foundry industry with a focus on investment casting technology.

### Key words

Rapid Prototyping, Foundry industry, Stereography, Selective Laser Sintering, Fused Deposition Modeling, Laminated Object Manufacturing, Three-Dimensional Printing, Lost Wax

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KADLECOVÁ, H. *Metody rychlého prototypování použitelné ve slévárenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 42 s., Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Metody rychlého prototypování použitelné ve slévárenství* vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 27. 5. 2011

.....

HANA KADLECOVÁ

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině za podporu během celého mého studia.

## OBSAH

<b>ABSTRAKT .....</b>	<b>5</b>
<b>PROHLÁŠENÍ .....</b>	<b>6</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ.....</b>	<b>7</b>
<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>1 RAPID PROTOTYPING .....</b>	<b>11</b>
1.1. Preprocessing.....	12
1.2. Processing.....	12
1.3. Postprocessing .....	12
<b>2 STARŠÍ TECHNOLOGIE VÝROBY MODELŮ.....</b>	<b>13</b>
2.1. Stereolitografie – SLA .....	13
2.2. Selective Laser Sintering – SLS .....	14
2.3. Fused Deposition Modeling – FDM .....	15
2.4. Laminated Object Manufacturing – LOM .....	16
2.5. Three-Dimensional Printing – 3DP .....	17
2.6. Solid Ground Curing - SGC.....	18
2.7. Inkjets technologie .....	19
2.7.1. Multi-Jet Modeling – MJM .....	19
2.7.2. Ballistic Particle Manufacturing – BPM.....	19
<b>3 NOVÉ TECHNOLOGIE VÝROBY MODELŮ .....</b>	<b>20</b>
3.1. Model Maker 3D Plotting .....	20
3.2. Printed Computer Tomography – PCT.....	20
3.3. Denesis 3D Printer .....	20
3.4. Hot Plot .....	20



3.5.	Direct Laser Forming - DLF.....	21
3.6.	Shape Meeting.....	21
3.7.	Direct Shell Production Casting - DSPC.....	21
3.8.	Photochemical Machining.....	22
3.9.	Solid Imaging System.....	22
3.10.	Landform Topographics.....	22
3.11.	Design-Controlled Automated Fabrication - DESCAF .....	22
3.12.	Solid Object Ultraviolet Laser Plotting - SOUP.....	23
3.13.	Model-Maker System.....	23
3.14.	Incre.....	23
3.15.	Multiphase Jet Solidification - MJS .....	23
3.16.	Masking and Depositing - MD* .....	24
3.17.	Computer-Operated Laser Active Modeling.....	24
3.18.	Solid Creation System - SCS.....	24
4	<b>RAPID PROTOTYPING VE SLÉVÁRENSTVÍ .....</b>	<b>25</b>
4.1.	<b>Nepřímá výroba forem.....</b>	<b>27</b>
4.1.1.	Metoda vytavitelného modelu – Lost Wax.....	27
4.1.2.	Metoda vypařitelného modelu – Full Mould.....	31
4.1.3.	Metoda spalitelného modelu – Lost Foam .....	32
4.1.4.	Metoda spalitelného modelu – Replicast.....	32
4.1.5.	Lití do skořepinových forem – metoda Croning.....	33
4.2.	<b>Přímá výroba forem .....</b>	<b>34</b>
4.2.1.	Přímá výroba pískových forem a skořepin .....	34
4.2.2.	Přímá výroba keramických forem a skořepin .....	36
5	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>37</b>
6	<b>SEZNAM POUŽITELNÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>38</b>
7	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>41</b>
8	<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>41</b>

## ÚVOD

V dnešní době jsou velmi často kladeny požadavky na rychlost, kvalitu výrobku, dále z ekonomického hlediska na nejlevnější výrobu a to nejen ve strojírenském průmyslu ale také v ostatních odvětví vědy a techniky.

Hlavním znakem technologie RP, jak už naznačuje název, je co nejkratší doba mezi zadáním zakázky na konkrétní výrobek a zároveň vyrobením prvního prototypového výrobku, a to v co nejlepší kvalitě a za použití nejvhodnější technologie. Tento faktor v dnešní době hraje důležitou roli ve slévárenství, proto je hlavním požadavkem zadavatele zakázky v současné době. U některých technologií RP je obtížné dosáhnout kvalitního povrchu vytvářeného modelu. Tyto technologie umožňují rychlou výrobu funkčních prototypů z CAD modelu. Tím se výrazně zkrátí doba od návrhu po zavedení výrobku do výroby.

Rapid Prototyping má široké uplatnění v oboru slévárenství a to v oblasti lití na vytavitelný nebo vypařitelný model. RP technologie nemá využití jen v oboru slévárenství, ale také se uplatňuje v automobilovém, leteckém průmyslu, lékařských oborech, v umění či v architektuře.



**Obř. 1:**Využití technologie Rapid Prototyping [1]

## 1 RAPID PROTOTYPING

Rapid Prototyping - RP je progresivní skupina technologií, která vytváří fyzické modely, prototypy a komponenty nástrojů přímo na základě 3D dat. Tato 3D data vznikají často v 3D programových systémech CAD, určených pro konstrukční a návrhové procesy. Pro technologii RP je specifické, že se fyzický model vytváří postupně po jednotlivých vrstvách materiálu. Jednotlivé vrstvy jsou postupně přidávány již k dříve vytvořeným. Na rozdíl od klasických metod obrábění, kdy je materiál postupně odebírán z výchozího polotovaru, je materiál při metodách RP postupně přidáván. Metody RP se především odlišují rozdílným fyzikálním principem při tvorbě jednotlivých vrstev. [2]

Postup při RP bývá často dělen do třech základních etap zpracování, označovaných jako preprocessing, processing a postprocessing. [2]

V případě RP rozumíme preprocessingem přípravu 3D dat pro stavbu dílu, processingem vlastní stavbu dílu metodami RP a postprocessingem další operace (odstranění podpor, povrchová úprava, barvení, vyztužení atd.), které zhodnocují vytvořený model pro použití v dalších oblastech. [2]



Obr. 2: Postup při Rapid Prototyping [3]

## 1.1. Preprocessing

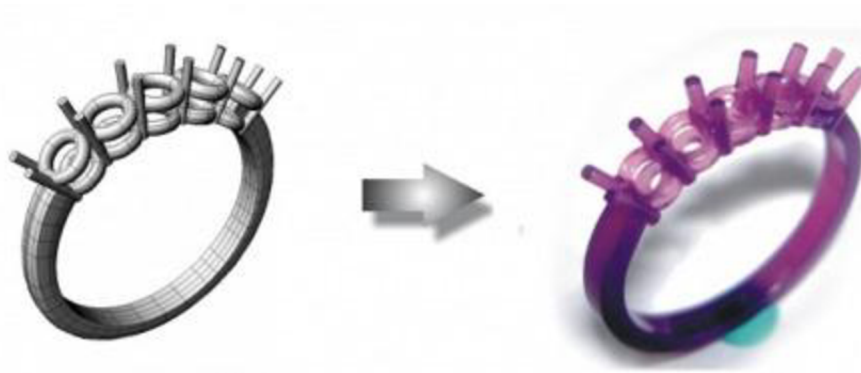
Preprocessing představuje přípravu výroby, převod do STL formátu, kontrolu STL souboru, rozdělení modelu na jednotlivé řezy, generování podpor a drah nástroje. Základním krokem je vymodelování součástky v některém CAD systému. Vymodelovaná součást se převede do STL formátu, to je proces, při kterém se objemový model převede na polygonální model. Polygonální model se skládá z velkého množství trojúhelníků, které jsou aproximovány s nastavitelnou přesností. U součástí s malými poloměry musí být síť trojúhelníků poměrně hustá, aby se co nejvíce vystihl tvar součásti. Takto vytvořený soubor se musí zkontrolovat a případně opravit. Dalším krokem je rozdělení modelu do jednotlivých horizontálních řezů, kde tloušťka řezu je konstantní a částečně určuje přesnost vytvořených modelů. Většinou se tloušťka řezu nastavuje z intervalu hodnot, které jsou dány tloušťkou materiálu. Posledním krokem je vygenerování drah nástroje a u některých zařízení přidání podpůrných struktur. [4]

## 1.2. Processing

Processing představuje výrobu součásti. Pro většinu RP zařízení je výroba automatizovaná, a proto nepotřebuje dohled vyškolené osoby. Zhotovování součásti je poměrně časově náročné, může trvat několik hodin v závislosti na velikosti a tvarové složitosti. Jednotlivé výrobní postupy zařízení RP se od sebe liší a budou vysvětleny později. [4]

## 1.3. Postprocessing

Postprocessing představuje poslední část výroby. V této fázi výroby se obvykle provádí manuální operace jako odstraňování podpor a dokončovací operace. Mezi dokončovací operace patří očištění povrchu, broušení, pískování a impregnování atd. U některých metod jako je např. stereolitografie se musí součást nakonec vytvrdit v UV peci. [4]



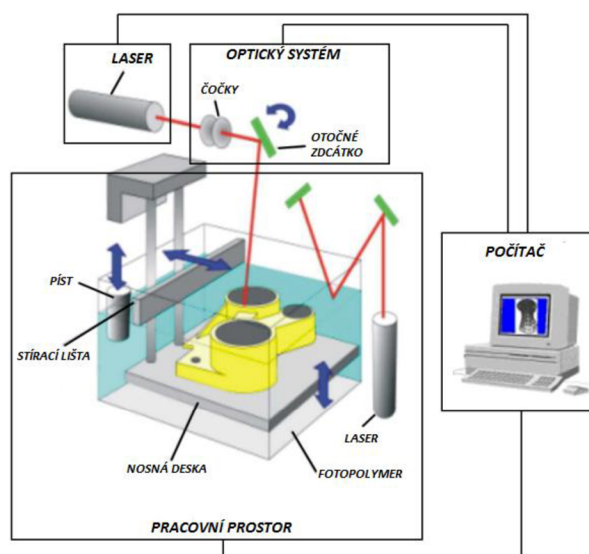
Obr. 3: Prototyp v CAD modelu a hotový model [5]

## 2 STARŠÍ TECHNOLOGIE VÝROBY MODELŮ

### 2.1. Stereolitografie – SLA

Jde o nejpřesnější z uvedených metod, při které se vytváří model postupným vytvrzováním fotopolymeru (plastické hmoty citlivé na světlo) pomocí UV laseru, který je na základě dat přicházejících z počítače zaměřován poměrně složitou optickou soustavou. Stereolitografie je nejstarší z technologií Rapid Prototypingu a kromě už zmíněné přesnosti vyniká také velkým množstvím použitelných materiálů. Oproti jiným technologiím je možno stereolitografií vytvářet modely s milimetrovými otvory a miniaturními prvky. Stejně jako u většiny ostatních technologií je možno modely vyrobené stereolitografií použít pro vizuální kontrolu návrhu výrobku, v některých případech i k funkčním zkouškám a díky široké paletě materiálů i jako forem pro vstřikování a lití. Součástka, která by se klasickými konvenčními metodami vyráběla několik týdnů může být s pomocí Stereolitografie vyrobena během několika hodin. [6]

Stavba stereolitografického (SLA) modelu je založena na postupném vykreslování 2D vrstev na hladinu pryskyřice laserovým paprskem. V místě dopadu paprsku je pryskyřice vytvrzena a platforma se posune o zadaný krok (vrstvu) v ose Z směrem dolů. Před vykreslováním každé vrstvy zarovná nůž hladinu pryskyřice tak, aby byla zachována tloušťka vrstvy. Poté se celý proces opakuje tolikrát, dokud není vykreslena poslední vrstva. Uchycení modelu k platformě je dosaženo výše zmíněnými podporami, které model fixují v dané poloze a zabraňují jeho zborcení. Podpory musí být řešeny tak, aby se daly co nejsnáze z modelu odstranit a zároveň neovlivnily výslednou kvalitu povrchu. Na finální vytvrzení slouží UV komora, kde model získá požadovanou pevnost a opracovatelnost. [7]

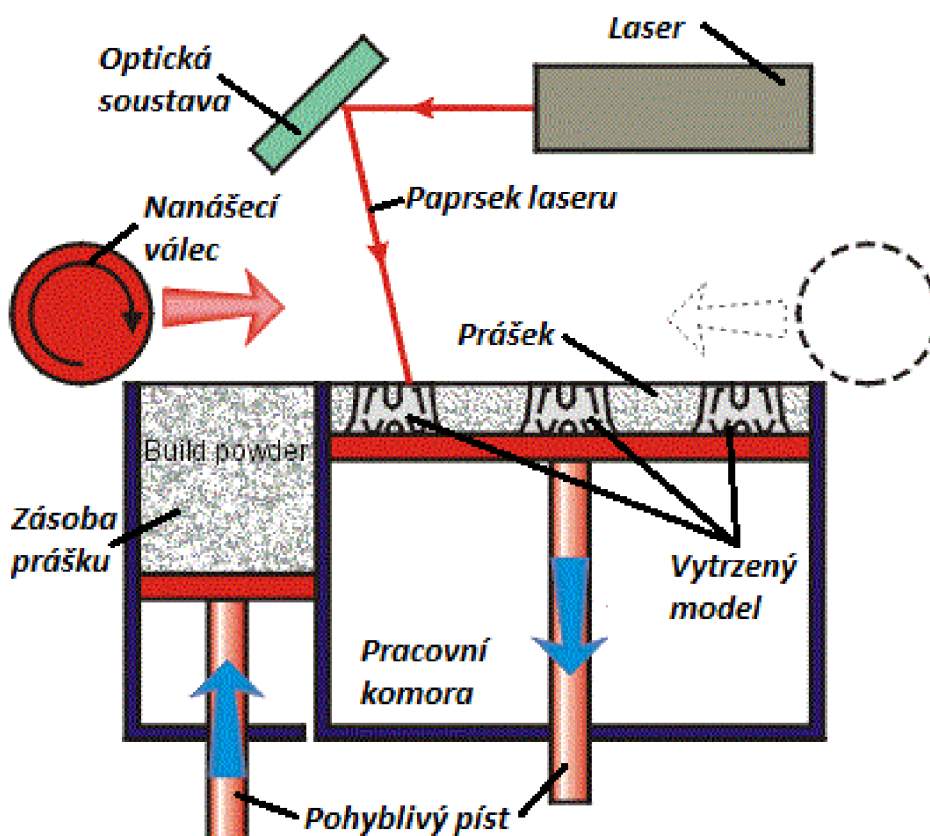


Obr. 4: Schéma technologie Stereolitografie [8]

## 2.2. Selective Laser Sintering – SLS

Technologie SLS je obdobou stereolitografie, avšak s několika podstatnými rozdíly. Jako stavební materiál je používán jemný prášek; podle typu aplikace může jít o polyamidy používané pro plastové výrobky pro přímou aplikaci, o kovové prášky sloužící k výrobě kovových prototypů nebo nástrojů či o práškový písek pro výrobu kovových prototypů odléváním do písku. [7]

Platforma se nepohybuje v materiálu, ale materiál je na ni nanášen v jednotlivých vrstvách pomocí posuvného nože, jenž obstarává rovinu a tloušťku vrstvy. Ta může být silná od 0,1 mm do 0,2 mm. Pracovní komora je hermeticky uzavřena a naplněna inertním plynem (dusíkem) pro ochranu jakosti povrchu. Princip výroby je stejný jako u stereolitografie: laserovým paprskem (CO<sub>2</sub> laser o max. výkonu 20 W) jsou vykreslovány jednotlivé vrstvy modelu. Podstatnou výhodou oproti stereolitografu je absence podpor, jelikož model je pevně usazen v prášku, který jej obklopuje. Po skončení výrobního procesu je nutné nejprve nechat prášek vychladnout na teplotu, při níž lze model vyjmout a očistit od zbylého prášku. [7]



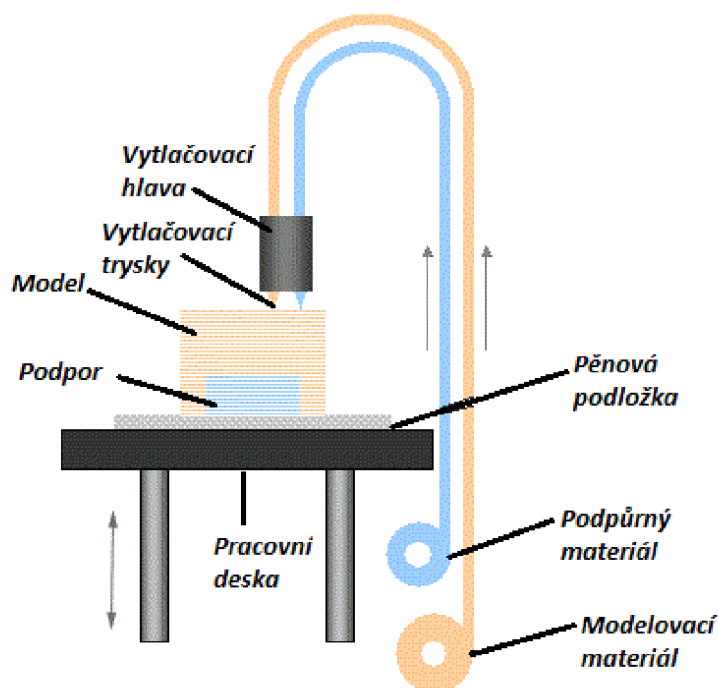
Obr. 5: Schéma technologie Selective Laser Sintering [9]

### 2.3. Fused Deposition Modeling – FDM

Fused Deposition Modeling, nebo-li FDM, je rapid prototyping technologie a používá se pro převod CAD výkresů do fyzické podoby. Prototypy FDM produkují ABS plastic prototypové modely, které mají vysokou pevnost a odolnost. [10]

Model se vytváří nanášením jednotlivých vrstev z různých netoxických termoplastů nebo vosků systémem krok po kroku. Materiál ve tvaru tenkého vlákna vychází z vyhřívané trysky, která se pohybuje v rovině XY nad pracovním prostorem. Ve trysce je ohříván na teplotu o 1°C vyšší než je jeho teplota tavení. Při styku s povrchem vytvářené součástky se vlákna vzájemně spojují a vytváří tak požadovanou ultratenkou vrstvu, která ihned ztuhne. Součástka se opět vytváří na nosné desce, která se vždy po nanesení jedné vrstvy sníží o hloubku této vrstvy. Na podepření přečnívajících částí je nutné vytvořit podpůrnou konstrukci z lepenky nebo polystyrenu. [6]

Při modelování metodou FDM jsou objekty vytvořené v CAD aplikacích "rozřezány" na vrstvy pomocí tzv. Slice-Software. Zařízení pracující s technologií FDM mohou být využívána také v běžném kancelářském prostředí, neboť u nich byla odstraněna práce s toxickými materiály a s citlivými zařízeními pro laserové snímání. Touto metodou můžeme vytvářet součástky např. z polyamidu, polyetylénu nebo z vosku. Vytvořený model již nevyžaduje žádné obrábění. Na principu technologie FDM pracuje většina tzv. 3D tiskáren. [6]



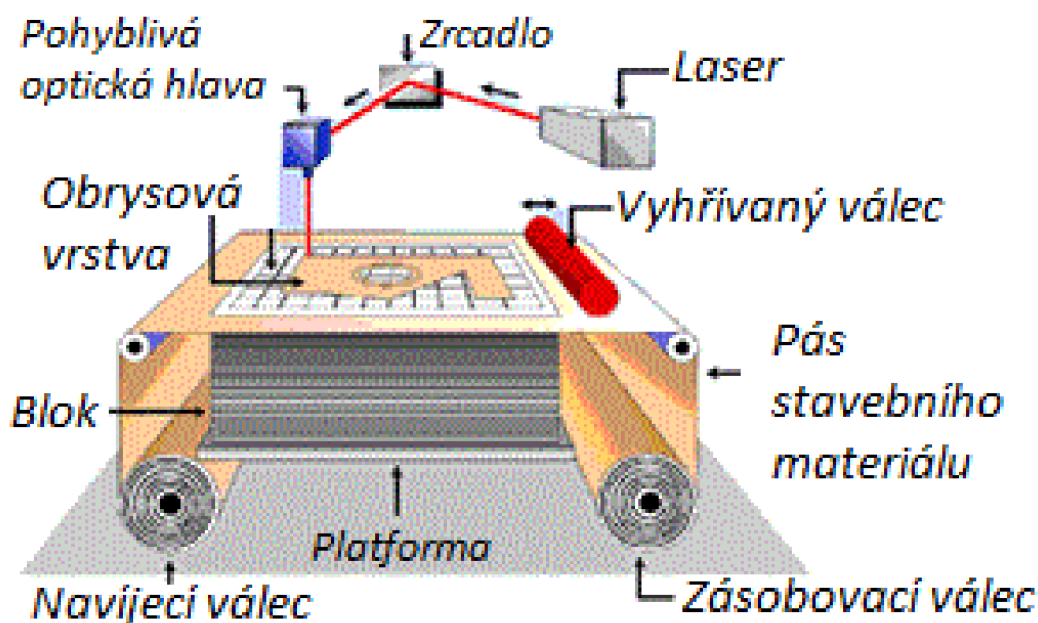
Obr. 6: Schéma technologie Fused Deposition Modeling [11]

## 2.4. Laminated Object Manufacturing – LOM

Oproti jiným metodám Rapid Prototypingu, které pracují relativně pomalu, je pro rychlé zhotovení prototypu vhodná technologie výroby laminováním, při níž se model sestavuje z plastových fólií nebo z mnoha vrstev papíru napuštěného zpevňující hmotou. [6]

Metoda Laminated Object Manufacture je založena na vrstvení lepivého materiálu a byla vyvinuta americkou firmou Helysis. Součást je vytvářena ze speciálních plastových fólií nebo z mnoha vrstev papíru napuštěných zpevňující hmotou. Jednotlivé vrstvy jsou oříznuty do správného tvaru CO<sub>2</sub> laserem. Součástka je vytvářená na svisle se pohybující nosné desce. Celý proces probíhá tak, že se na nanesenou a vyřezanou vrstvu natáhne papírová fólie opatřená vrstvou polyetylenu. Ta se poté přitlačí soustavou vyhřívaných válců, čímž dojde ke slepení obou vrstev. Paprskem laseru je vyřezán požadovaný obrys vytvářené vrstvy. Přebytečná odřezaná fólie je laserem rozdělena na čtverce a později odstraněna. Po vytvoření vrstvy se podložka sníží o tloušťku fólie a postup se opakuje až do vytvoření celé součásti. [13]

Vytvořené součástky mají podobné vlastnosti jako by byly vyrobené ze dřeva. K dosažení hladkého povrchu je nutné součástku ručně opracovat. Metoda je vhodná na výrobu velkých modelů, nevýhodou je velké množství odpadu. [6]



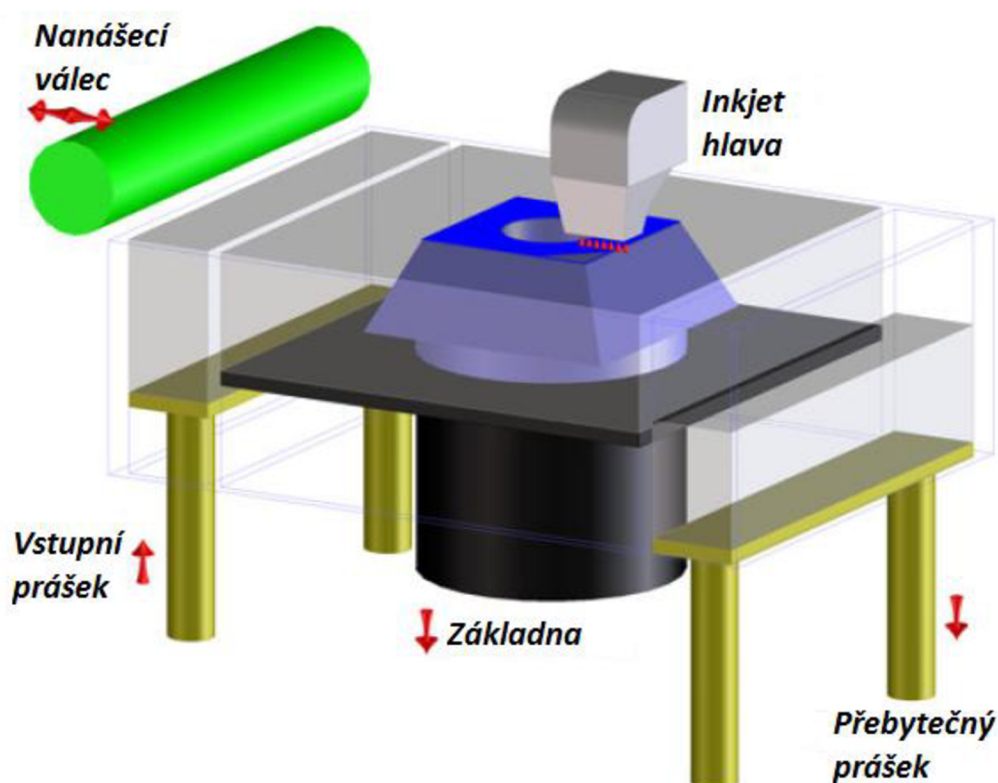
Obr. 7: Schéma technologie Laminated Object Manufacturing [14]



## 2.5. Three-Dimensional Printing – 3DP

Zástupcem vstřikovacího postupu je 3D tisková technologie, vynalezena v Massachusetts Institute of Technology v roce 1993. Součásti se vytvářejí vsázením práškového materiálu a kapalného pojiva. Technologie je velmi podobná Select laser sintering technologii, ale místo laseru se používá tisková hlava. [12]

Zařízení pracuje na principu spojování práškového materiálu pomocí kapalného pojiva. Celá součást se je tvořena vrstvu po vrstvě nanesením tekutého pojiva na tenkou vrstvu prášku. Pojivo je vytlačováno pístem ze zásobníku a přiváděno pomocí stěrky na základní desku. Důležité je nanést prášek rovnoměrně, pro zajištění přesnosti. Tisková hlava nanáší pojivo rovnoměrně uvnitř kontury každého řezu. Po vytvoření jedné vrstvy se základní deska sníží o hodnotu tloušťky jedné vrstvy přibližně 0,10 mm a celý postup se opakuje. Nezpracovaný prášek tvoří během vytváření součásti podpurné struktury. Po dokončení součástí lze nezpevněný práškový materiál znovu použít. [12]



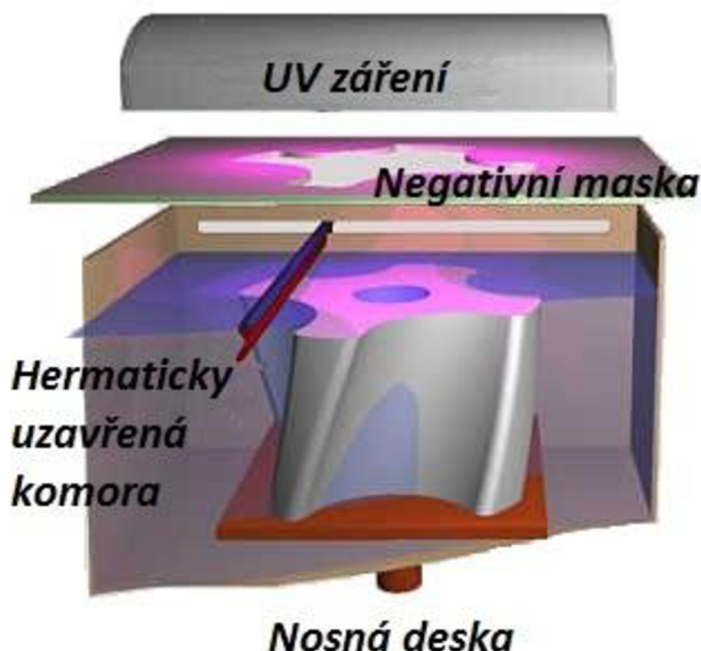
Obr. 8: Schéma technologie Three-Dimensional Printing [2]

## 2.6. Solid Ground Curing - SGC

Metoda Ground Curing spočívá ve vytvrzování fotocitlivého polymeru. Tento princip byl vyvinut izraelskou firmou Cubital Ltd. Jako materiál používá také tekutý opticky vytvrditelný polymer jako stereolitografie, ale principem výroby se od ní liší. Rozdíl je v tom, že celá vrstva je zde vytvářena najednou, tj. na jedno osvětlení UV lampou. [13]

Je to metoda vytvářející z jednotlivých vrstev modelu "masky", přes které se ultrafialovým světlem vytvrzuje fotocitlivý polymer. Masky jsou nejčastěji tvořeny skleněnou destičkou, na které je vyznačený tvar vytvářené vrstvy. Celá vrstva se v tomto případě vytváří naráz. Vytváření tělesa tedy probíhá ve dvou oddělených současně probíhajících cyklech. Nejprve je vytvořena negativní maska a potom dojde k osvětlení fotopolymeru. Osvícený fotopolymer ztvrdne, neosvětlený tekutý fotopolymer je odsáván a vzniklý meziprostor se vyplní voskem. V dalším kroku je povrch vytvořené vrstvy opracovaný na požadovanou výšku vrstvy a tím je připravený na nanášení další tenké vrstvy tekutého fotopolymeru. Vosková výplň zůstane ve vytvářeném tělese až do konce procesu vytváření, potom je chemickou cestou (pomocí kyseliny citrónové) odstraněna. [6]

Pro názornost lze uvést, že výroba dětské přilby o rozměrech 260x180x140 mm trvá tímto způsobem asi 32 hod (24 hod trvá vytváření modelu, 5 hod čištění, 3 hod ruční dokončení). [6]



Obr. 9: Schéma technologie Solid Ground Curing [15]

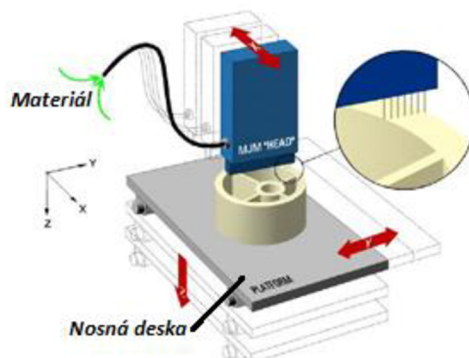
## 2.7. Inkjets technologie

Inkjet technologie vytváří vrstvu postupným vystřikováním tekutého materiálu na vybranou oblast, kde materiál volně na vzduchu nebo aplikací UV záření přechází do tuhé fáze. [16]

### 2.7.1. Multi-Jet Modeling – MJM

MJM je další technologií Rapid Prototyping společnosti 3D Systems, Inc. Její vývoj započal v roce 1994. Jedná se o tisk vrstev pomocí termopolymeru. [13]

Princip metody spočívá v nanášení jednotlivých vrstev termopolyméru postupně na sebe pomocí speciální tiskové pracovní hlavy. Hlava má 96 trysek uspořádaných rovnoběžně vedle sebe. Průtok nanášeného materiálu je pro každou trysku samostatně řízen programem. Model se opět vytváří na zvláštní nosné desce podobně jako u Stereolitografie. Pracovní hlava se pohybuje nad nosnou deskou ve směru osy X. Jestliže je součástka širší jak pracovní hlava, posouvá se ve směru osy Y tak, aby se vytvořila celá součástka. Velký počet trysek zaručuje rychlé a rovnoměrné nanášení materiálu. Nanášený termoplastický materiál ztuhne při styku s už naneseným materiálem téměř okamžitě. [6]



Obr. 10: Schéma technologie Multi-Jet Modeling [17]

### 2.7.2. Ballistic Particle Manufacturing – BPM

Technologie BPM spočívá v nástřiku kapek termoplastu pomocí jedné pracovní hlavy. Vynalezl ji v roce 1987 Bill Masters, jenž v roce 1988 založil společnost Perception Systems, Inc., později přejmenovanou na BPM Technology, Inc., která se zabývá vývojem BPM systému.

Technologie využívá principu inkoustových tiskáren. Je založena na tlakovém nanášení materiálu (termoplastu) ve formě kapek a jejich následném vytvrzení. Nanášení materiálu je docíleno tím, že jednotlivé malé kapky materiálu jsou vystřelovány z tlakové hlavy na pracovní plochu a tam bezprostředně po dopadu vytvrzeny. Cíleným nanášením dalších kapek na už nanesený materiál se vyrobí celá trojrozměrná součást. Technologie BPM pracuje pouze s jednou tiskovou hlavou, která má 5 stupňů volnosti. Tato metoda umožňuje vytvářet modely bez podpůrné konstrukce. [13]

### 3 NOVÉ TECHNOLOGIE VÝROBY MODELŮ [13]

#### 3.1. Model Maker 3D Plotting

Technologie Model Maker 3D Plotting pracuje na stejném principu jako technologie BPM. Rozdíl je v tom, že Model Maker 3D Plotting pracuje se dvěma tiskovými hlavami, přičemž první nanáší materiál a druhá ho tvaruje.

#### 3.2. Printed Computer Tomography – PCT

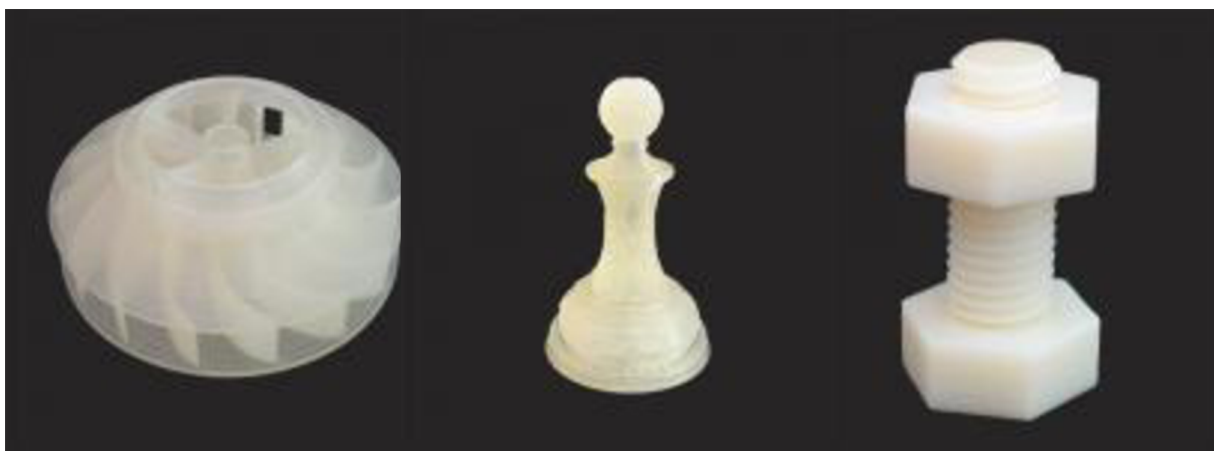
Printed Computer Tomography (PCT) byla vyvinuta společností Texas Instruments a opět pracuje podobně jako technologie BPM. Vyznačuje se značnou rychlostí (1 vrstva za minutu).

#### 3.3. Denesis 3D Printer

Genesis 3D Printer je další technologií firmy Stratasys, Inc. Její vývoj byl převzat od společnosti IBM v roce 1995. Jako materiál se používá polyesterová směs, která je vytlačována hlavou na příslušné místo. Nepoužívá se podpůrných struktur ani následného vytvrzování. Součást lze barvit, vrtat a jinak upravovat.

#### 3.4. Hot Plot

Hot Plot je technologie vyvinutá švédskou firmou Sparx AB. Princip je opět velmi podobný technologii LOM. Na rozdíl od technologie LOM, kdy je použit laser, je zařízení technologie Hot Plot vybaveno žhavenou řezací elektrodou. Jako materiál se používají speciální polystyrenové fólie tloušťky cca 1 mm. Nevýhodou je značná měkkost materiálu a malá přesnost, způsobená tloušťkou fólie.



Obr. 11: Příklady metody Laminated Object Manufacturing [18]

### 3.5. Direct Laser Forming - DLF

Technologie DLF umožňuje přímou výrobu kovových součástí z práškových materiálů. Vyvinula ji firma TRUMPF Laser – und Systemtechnik. Podstata technologie spočívá ve výrobě součástí postupným nanášením kovového prášku, který je přiváděn do stopy paprsku laseru, kde se taví. Pohybem laseru v osách je součást vyráběna po jednotlivých vrstvách.

### 3.6. Shape Meeting

Shape Meeting je technologie, jejíž výrobou a vývojem se zabývá společnost Babcock & Wilcox. Roztavený kov je nanášen pomocí elektrického oblouku po vrstvách a odlit do výsledné součásti. Použitým materiálem jsou slitiny na bázi niklu. Použití této technologie je téměř neomezeno tvarem i rozměrem součástí.

### 3.7. Direct Shell Production Casting - DSPC

U technologie DSPC jde o výrobu součástí z keramického prášku. Princip je obdobný jako u technologie SLS. Výchozí materiál (keramický prášek) je však spojován tekutým pojivem. Technologie DSPC je založena na vytváření vrstev nanášením keramického prášku spojovaného tekutým pojivem a jeho následným slinováním paprskem laseru. Nanášení pojiva se provádí pomocí Ink-Jet-tryskové hlavy, jejíž pohyb je řízen počítačem.



Obr. 12: Příklady metody Selective Laser Sintering [19] [20]

### 3.8. Photochemical Machining

Photochemical Machining je technologie podobná technologii SLA. Používá dvou protínajících se laserových paprsků, které tak vytvářejí 3D model z bloku fotoaktivního polymeru.

### 3.9. Solid Imaginig System

Technologie Solid Imaginig System byla vyvinuta společností DuPont v roce 1989. Dnes se jejím vývojem zabývá japonská firma Teijin-Seiki. SOMOS je velmi podobný technologii SLA. Rozdíl je v opticky aktivním materiálu a laserovém systému. Jako materiál se používá speciální bílá pryskyřice s nízkou hodnotou smršťování a deformace. Její vlastnosti se blíží vlastnostem silikonového kaučuku. Pro vytvrzení se používá argon-iontového laseru s vysokou přesností rastrování a s vysokou rychlostí modulace paprsku.



Obr. 13: Příklad metody Stereolitografie [7]

### 3.10. Landfoam Topografics

Landfoam Topografics je technologie velmi podobná technologii LOM. Charakteristické pro tento systém jsou barevné hladiny a selektivní nanášení příslušného materiálu (adheziva). Selektivní adheze zjednodušuje odstranění přebytečného materiálu.

### 3.11. Design-Controled Automated Fabrication - DESCAP

Design-Controled Automated Fabrication (DESCAP) byla vyvinuta v roce 1986 společností Light Sculpting, Inc. Princip je zčásti podobný technologii SGC. Jako materiál je používán ftopolymer, který je vytvrzován působením UV záření přes masku. Z toho důvodu je celá vrstva vytvrzena najednou.

### 3.12. Solid Object Ultraviolet Laser Plotting - SOUP

Solid Object Ultraviolet Laser Plotting (SOUP) byla vyvinuta japonskou firmou Mitsubishi Corporation a je prodávána společností CMET. Princip je opět podobný stereolitografii. Použitá pryskyřice má vysokou rozměrovou stálost, vynikající mechanické vlastnosti a nevyžaduje dotvrzení.

### 3.13. Model-Maker System

Model-Maker System je technologie vyvinutá společností Sanders Prototype, Inc. Jako materiál se používají netoxické termoplasty s přísadami.

### 3.14. Incre

Incre je podobná technologii BPM a byla vyvinuta firmou Incremental Fabrication Technologies of Corvalis. Součásti jsou vyráběny z kovových materiálů. Výhodou je především možnost vytvářet velké kovové součásti.

### 3.15. Multiphase Jet Solidification - MJS

Princip technologie MJS spočívá v zahřátí materiálu, ze kterého má být součást vyrobena a v postupném nanášení vrstev materiálu tryskou. V zásobníku je materiál (většinou ve formě prášku, ať již čistého kovu, keramiky nebo směsi kovu, případně keramiky s vhodným pojivem) zahříván na teplotu, při které vytváří nízkoviskózní fázi. Pistovým systémem je vytlačován skrz ohřivanou trysku. Při styku s materiálem vyráběné součásti tuhne a vytváří tak požadovanou vrstvu. Celý pracovní cyklus je obdobný jako u technologie FDM. Technologie MJS umožňuje vyrábět součásti z ušlechtilých ocelí, titanu, siliciumkarbidu, kysličníku hliníku, apod.



**Obr. 14:** Příklady metody Fused Deposition Modeling z různých materiálů [21]

### 3.16. Masking and Depositing - MD\*

Masking and Depositing (MD\*) byla vyvinuta při výzkumech na Carnegie Mellon University. Umožňuje vytvářet modely z některých kovů a jejich slitin.

### 3.17. Computer-Operated Laser Active Modeling

Computer-Operated Laser Active Modeling byla vyvinuta japonskou firmou Mitsui Ship Building Company. Princip je opět velmi podobný stereolitografii.

Stereos byla vyvinuta německou firmou Electro-Optical Systems. Princip výroby je téměř shodný se stereolitografií. Využívá HeCd nebo Ar laseru. Tato metoda umožňuje snadnou výměnu vany pro použití různých druhů pryskyřic.

### 3.18. Solid Creation System - SCS

Solid Creation System (SCS) je výsledkem spolupráce japonských firem Sony Corporation a Japan Synthetic Rubber. Princip této technologie je podobný stereolitografii, hlavní rozdíl je ve velikosti vytvářených součástí. Technologií SCS lze vyrobit větší součásti.



Obr. 15: Modely technologie Solid Creation System [22]



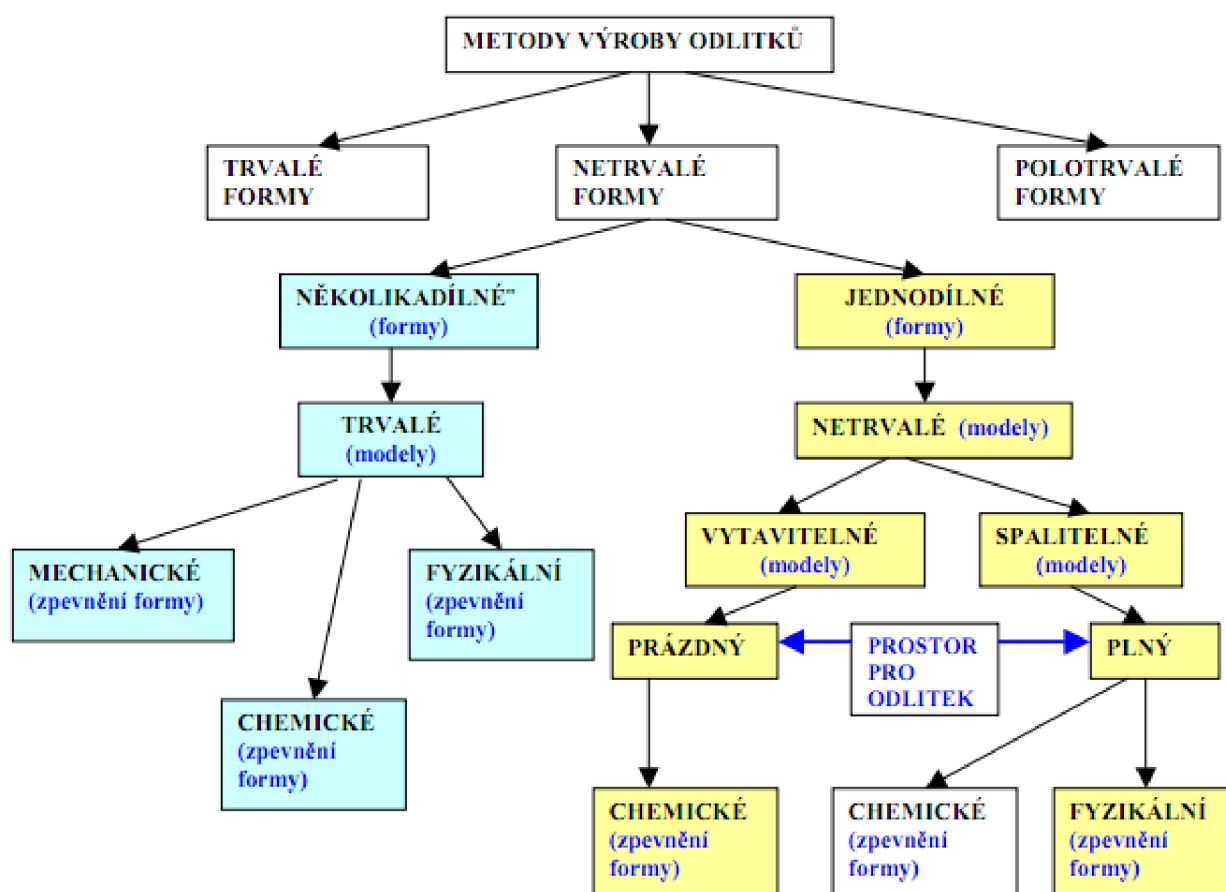
## 4 RAPID PROTOTYPING VE SLÉVÁRENSTVÍ

Použití RP v oblasti slévárenství je soustředěno především na tvorbu modelu a jader, která jsou pak použita klasickou cestou pro různé technologie lití. Pomocí některých metod RP, založených na sinteringu, je dnes možné vytvořit celou kompletní formu, připravenou pro proces lití. [2]

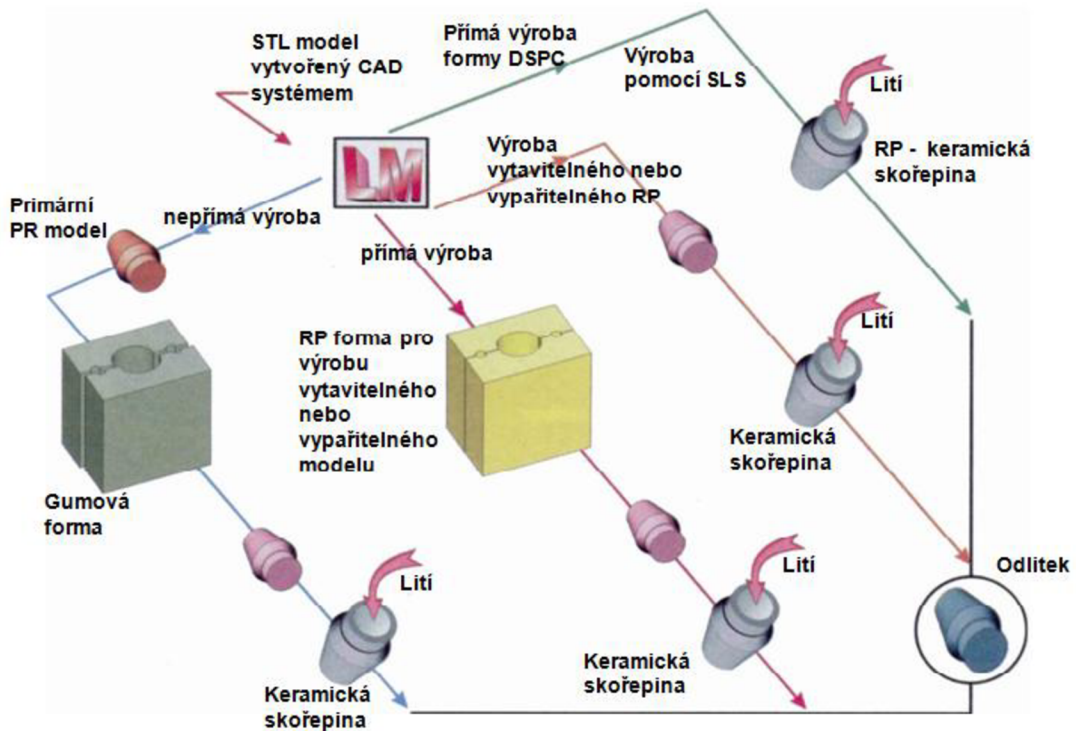
S rozvojem jednotlivých metod Rapid Prototyping přímo úměrně roste i jejich využití právě v této oblasti strojírenského průmyslu. V zásadě se metod RP dá využít ve dvou oblastech, a to u přímé a nepřímé výroby forem. [16]

Obvyklým kritériem pro rozdělení slévárenských výrobních metod je typ použité formy, a z toho hlediska je možné rozdělit na metody, u kterých se odlitek zhotoví ve formě netrvalé a metodou používající pro výrobu forem trvalých. [23]

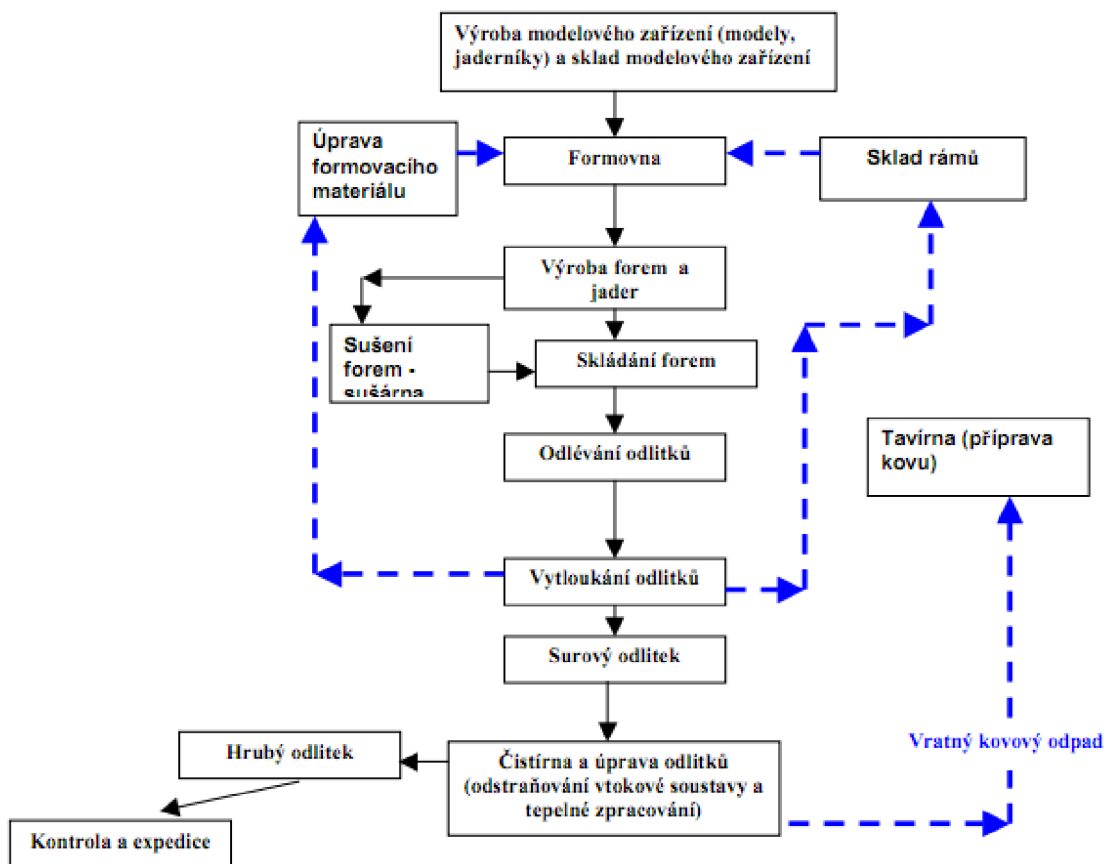
Netrvalé formy slouží pouze pro jedno odlití. Do trvalých forem se kov odlévá opakovaně a z jedné formy vzniká řádově tisíce až statisíce odlitků. Existují i formy polotrvalé s možností zhotovení několika kusů odlitků. [23]



**Obr. 16:** Rozdělení metod výroby odlitků z hlediska použité formy [23]



Obr. 17: Zhotovení odlítka kombinací metod RP a přesného lití [24]



Obr. 18: Postup při odlévání [23]

## 4.1. Nepřímá výroba forem

Principem je zhotovení master modelu (originálního modelu) součásti některou z metod RP. Na základě tohoto modelu je pak vyrobena trvalá či netrvalá forma pro odlití požadované součásti. Pro sériovou výrobu je pak proces doplněn o mezistupeň, kdy je z RP modelu vytvořena forma pro tvorbu dalších modelů z nejrůznějších materiálů. Hodně často se zde používá metoda vakuového lití do silikonových forem. U tvorby forem pomocí vytavitelných modelů se tak například vytváří další voskové modely.

Následující uváděné metody spadají do oblasti lití „na hotovo“, kdy se nepředpokládá další obrábění. V současné době, kdy neustále stoupá poptávka po tvarově složitých součástech s dobrou jakostí, kvalitou povrchu, rozměrovou přesností a materiálovou čistotou za současného tlaku na co nejnižší dosažitelnou cenu takového odlitku, je to jedno z klíčových odvětví slévárenství. [16]

### 4.1.1. Metoda vytavitelného modelu – Lost Wax

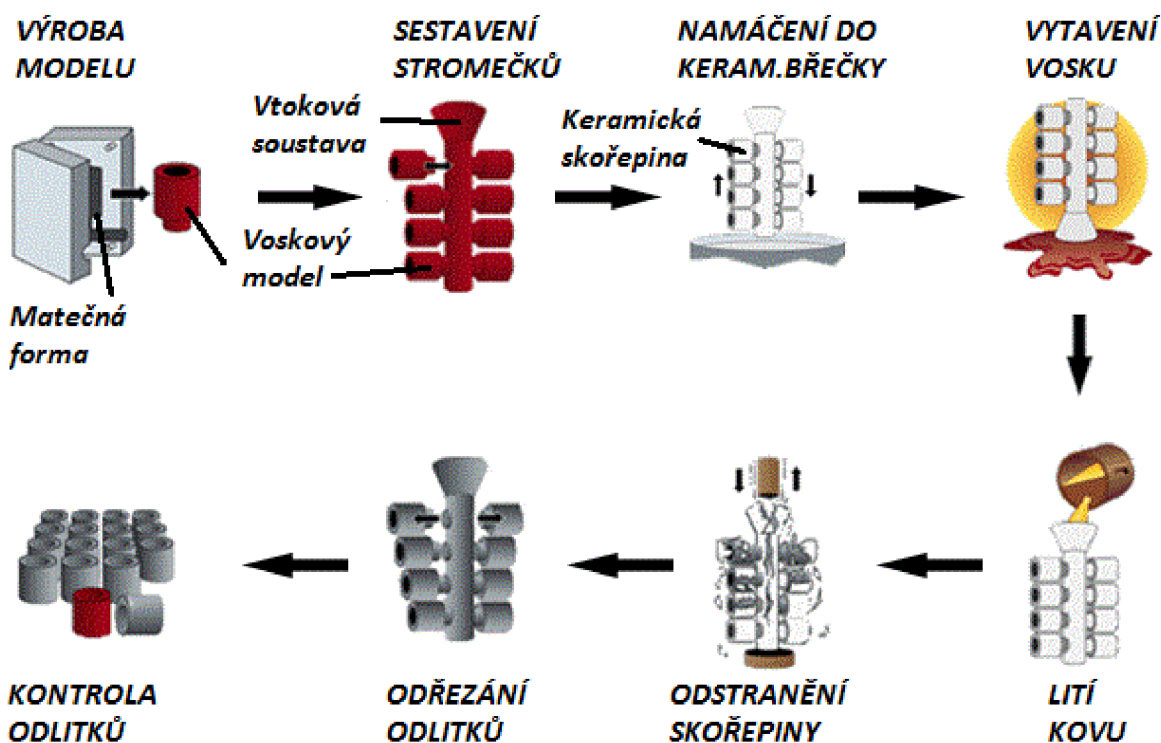
Metoda vytavitelného modelu je jednou ze základních slévárenských technologií přesného lití. Její počátky sahají až do doby 2000 let před naším letopočtem, kde jejího systému využívali již staří Egypťané při tvorbě uměleckých odlitků. Koncem 19. století se začala využívat u výroby zubních korunek a protéz. Cestu k výrobě přesných a tvarově složitých odlitků ve strojírenství si našla až ve 40. letech 20. stol. [16]

Technologie výroby odlitků metodou vytavitelného modelu umožní maximálně přiblížit odlitek hotové součásti. Technologie vytavitelného modelu aplikujeme tam, kde s ohledem na složitý tvar výrobku je výroba jinou technologií nákladnější nebo není možná; uplatní se tam, kde se požaduje přesnost rozměru, složitý geometrický tvar a vysoká povrchová jakost; možnosti vyrábět tenkostěnné odlitky a odlévat téměř všechny kovy a jejich slitiny. [23]

Tato metoda je výhodná pro výrobu odlitků charakterizovaných nízkou hmotností a vysokou tvarovou rozmarností a současně přináší i další **výhody**, mezi které patří, že umožní realizovat požadavky na snižování hmotnosti strojů a zařízení, dále je možné lépe realizovat estetický vzhled součástek. **Nevýhodou** metody je nákladná výroba matečné formy, dlouhý výrobní cyklus a citlivost na dodržení přesného technologického postupu. [23]

### Princip metody vytavitelného modelu

Základním prvkem této metody je model vyrobený z voskové směsi tzv. vzor. Ten se vyrábí vstřikováním rozeřtátého vosku do matečné formy. Po vyrobení, opravách a očištění jsou vzory napojeny na centrální vtokový kůl nebo zabudovány do vtokové sestavy. Tento sestavený voskový celek je následně obalen do keramického obalu a vzniká tzv. skořepina. Ta se vyrábí namočením voskového modelu v keramické břečce a následně se posype keramickým ostřivem. Vzniklá vrstva se nechá vysušit a postup se opakuje. Skořepina má 5 - 15 vrstev a ty musí být dostatečně pevné, aby vydržely následující technologické operace. Z řádně vysušené a vytvořené skořepiny se odstraní vosková hmota. Ta se ze skořepiny odstraňuje převážně pomocí přehřáté páry v autoklávu. Po odstranění vosku se musí skořepina vysušit a vyžítat. V závěru dochází ke konečné kontrole, očištění, zaizolování a po zahřátí je skořepina připravena pro odlití. Po odlití, ztuhnutí a vychlazení odlévané slitiny se skořepina rozbije a odlitek i s vtokovou soustavou se zbaví ulpělé keramické směsi. Z takto upravené sestavy se oddělí odlitky a ty se poté omílají v bubnech nebo se tryskají. Po očištění jsou odlitky podrobeny kontrolám. Kontrolují se koncové rozměry (3D měření), vnitřní (rentgen) a vnější (vizuální) vady. [25]



Obr. 19: Postup výroby odlitku metodou vytavitelného modelu [26]

### Aplikace metod Rapid Prototyping

Nejčastější je vytvoření modelu některou z technologií RP, který je dále použit jako master model (originální model) pro tvorbu forem, sloužících k výrobě voskových modelů. V této oblasti nachází uplatnění většina metod rychlé výroby prototypů. Pomocí některých metod je však možné zhotovit přímo vytavitelný model, v některých případech dokonce s kompletní vtokovou soustavou. [16]

Výroba voskových modelů je zdoluhavá a vyžaduje často použití další technologie (například obrábění), neboť tvary mohou být velmi komplikované a přesné. Pomocí některých metod RP, např. zařízení firmy Solidscape (USA), dnes můžeme přímo vyrobit voskové modely za použití stejných nebo blízkých voskových materiálů. Použitím RP pro výrobu voskových modelů dosáhneme velkých finančních a časových úspor. [2]

Materiálů, kterými je možné nahradit voskové modely, se v oblasti RP nabízí více. Jednou z nejznámějších a používaných postupů je metoda firmy 3D Systems - **QuickCast**. QuickCast je metoda, kterou se v systémech **SLA** vytváří vytvrzováním model, který se vyznačuje uvnitř polodutou strukturou. Tento model je pak úspěšně použit místo voskového modelu. Použitím vhodného polymeru se dosáhne velmi tvarově přesných detailů, který mají samozřejmě pozitivní vliv na kvalitu kovových prototypů. [2]



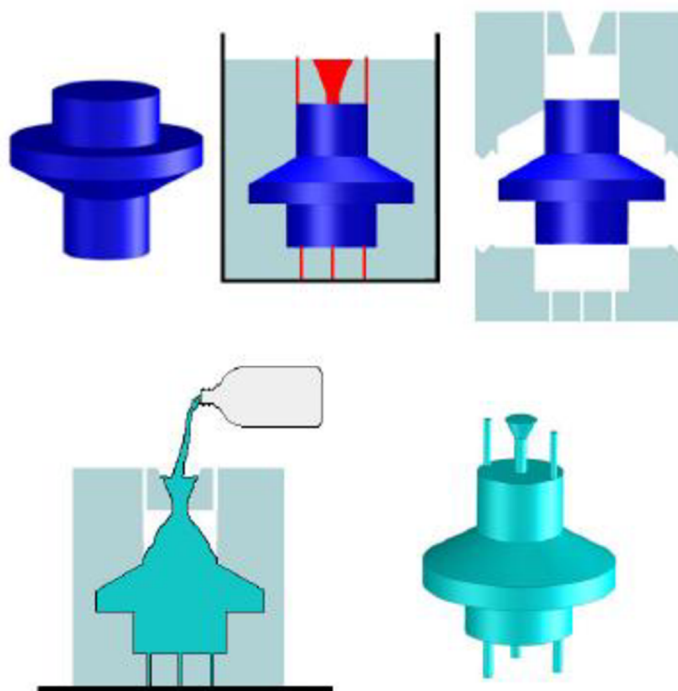
Obr. 20: Příklad QuickCast [27] [28]

Pro technologii vytavitelného modelu je možno také využít ABS tenkostěnné modely zhotovené metodou **FDM**. Dalším možným způsobem je vytvoření silikonové formy na základě RP modelu pro opakované zhotovení voskových modelů použitelných pro vytavitelné lití. Dalším přístupem je přímé vytvoření keramické skořepiny metodou RP. Firma Soligen Technologies Inc. (USA) nabízí zhotovení skořepiny na základě metody **3DP**. Vrstva je tvořena vstříkovaným pojivem, které spojuje keramický prášek postupně do výsledného modelu. Po zhotovení je skořepina zbavena materiálu z dutiny skořepiny vytavením. [2]

Další možností, jak zhotovit vytavitelný model, do jisté míry kombinující metodu vytavitelného a vypařitelného modelu, je nasazení metody **CastForm™** kterou prezentuje rovněž firma 3D Systems, tentokrát ovšem na bázi **Selective Laser Sintering**. Model je zhotoven z materiálu CastForm PS, který se vyznačuje nízkou hustotou (45%). Následně je napuštěn běžným slévárenským voskem, a už standardní cestou je k němu vytvořena skořepinová forma. Při vytvrzování formy se vosk vytaví. Materiál se vyznačuje nízkou produkcí popelu při spalování (méně než 0,02%).[16]

#### Vhodné metody:

- SLS – Plastic (CastForm™)
- 3DP
- SLA - (QuickCast)
- FDM – (ABS tenkostěnné modely)



**Obr. 21:** Schéma lití do silikonové formy [2]

#### 4.1.2. Metoda vypařitelného modelu – Full Mould [16]

Předností této metody je umožnění lití tvarově složitých dílů, aniž by se musely vyjímat z formy. Odpadá tedy potřeba úkosů, úprav dělicí roviny, vnějších jader a složitého formování. Využití nachází metoda jak v kusové výrobě tvarově složitých odlitků, např. tvarových nástrojů, tak i v sériové výrobě obtížně formovatelných odlitků, např. u těles a dílů elektromotorů. Často se spalitelnými modely doplňují běžné modely při vytváření nejrůznějších výstupků, kulovitých nálitků apod.

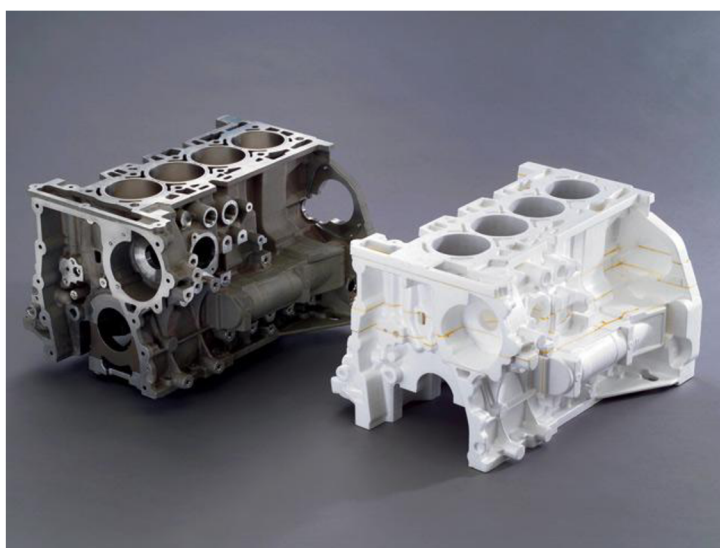
#### Aplikace metod Rapid Prototyping

Vypařitelný - polystyrénový model se dá zhotovit za využití metod rychlého prototypování. Konkrétně se jedná o **SLS** - Plastic metody. Pomocí speciálního tvrdého polystyrenu **Primecast 101**, který nabízí německá firma EOS, se dají zhotovit tvarově velmi složité modely odlitků. K tvorbě modelu je potom určeno jedno ze zařízení z přístrojové řady EOSINT P. Následuje již klasické zaformování a odpaření modelu litím kovu. Modely z tohoto materiálu mohou být použity i pro výrobu keramických forem, či jako master modely při využití technologie vakuového lití.

Další možností je použití metody **CastForm™** americké firmy 3D Systems. Zde se postupuje obdobným způsobem, popsáním v předchozím odstavci. Metoda je vhodná pro odlévání nejrůznějších slitin, jako je např. slitina titanu. Dobrých výsledků se dosahuje také při použití nízkotavitelných slitin jako jsou slitiny hliníku, hořčíku nebo zinku.

#### Vhodné metody:

- SLS – Plastic (PrimeCast, CastForm™)
- 3DP (ProMetal 3D Printing)
- SLS – Metal (DMLS)



Obr. 22: Polystyrénový model a odlitek [29]

### 4.1.3. Metoda spalitelného modelu – Lost Foam [30]

Metoda odlévání na spalitelný model (Lost Foam) patří mezi moderní slévárenské technologie. Její vývoj začal kolem roku 1960 a praktické uplatnění si našla zvláště při sériové výrobě tvarově složitých tenkostěnných odlitků z litiny a hliníkových slitin.

#### Princip metody spalitelného modelu

Při této metodě se odlévá do formy, v níž je v místě budoucího odlitku umístěn polysterénový spalitelný model. Během lití se polystyrén před postupujícím kovem vypařuje a tak vytváří dutinu budoucího odlitku. Z polystyrénu je vytvořen nejen vlastní model, ale i nálitky. K modelu jsou dále připojeny žebra, výstupky a vtoková soustava. Zkompletované modely se opatřují žáruvzdornou ochranou vrstvou máčením v aluminium silikátu. Dále se modely suší proudem vzduchu o teplotě 60°C. Model se položí do formy a postupně se zasypává pískem a pěchuje se. Při odlévání dochází k vypařování zpěněného polystyrenu před čelem proudu, používá se proto spodní vtok. Zpěněný polystyren prostupuje vrstvou nátěru a zásypovým materiálem a při styku se vzduchem nad formou shoří. Po ztuhnutí se odlitek i se zásypem z kontejneru vyklopí a písek se na roštovém dopravníku oddělí od surového odlitku.

Výchozí surovinou pro zhotovení modelu je surový polystyrén se zrnitostí kuliček 0,2-0,4 mm. Tato surovina obsahuje vázaný pentan, který se teplem uvolňuje a působí jako nadouvadlo.

### 4.1.4. Metoda spalitelného modelu – Replicast [16]

Metoda velmi podobná předchozí technologii vypařitelného modelu - Full Mould. Model včetně lící soustavy je vytvořen z polystyrenu, v našem případě pomocí RP metody SLS – Plastic. Podle modelu je poté zhotovena keramická forma postupným nanášením keramiky podobně jako u metody vytavitelného modelu. Vlastní keramická forma se poté před vlastním litím vyžihá, přičemž dojde ke spálení modelu – proto „spalitelný model“.

#### Aplikace metod Rapid Prototyping

Zhotovení polystyrénového modelu zajišťuje některá z výše uvedených metod (**Primecast, CastForm**) a může být vytvořen i lepením z jednotlivých částí. Díky tomu, že polystyren je odstraněn ještě před samotným litím, může mít model hustší strukturu. To má pozitivní vliv na povrch konečného odlitku.



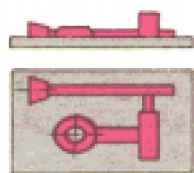
#### 4.1.5. Lití do skořepinových forem – metoda Croning [31]

K výrobě skořep forem se používá směs křemenného písku se syntetickou pryskyřicí. Kovová modelová deska s modelem a vtokovou soustavou se zahřeje na 250 °C. Deska se připevní na zásobník písku a překlopí se o 180°. Písková směs se přesype na modelovou desku, pryskyřice se roztaví, slepí a vytvoří na povrchu modelu skořepinu. Po dosažení tloušťky odpadne přebytečný materiál zpětným překlopením zásobníku. Modelová deska i se skořepinou se vloží do pece, kde při teplotě nastává polymerizace a skořepina se vytvrdí. Jádra se vyrábějí podobným způsobem v jaderníku.

Lití je vhodné pro hromadnou výrobu malých a středně velkých odlitek. Velmi dobře se odlévají složitější odlitky, např. žebrované válce motorů, součásti čerpadel aj.

##### Vhodné metody:

- SLS – Metal (DMLS)
- 3DP (ProMetal 3D Printing)



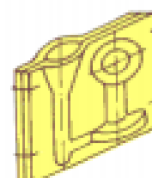
1. modelová deska



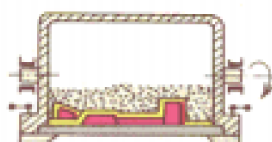
4. vytvrzená skořepina



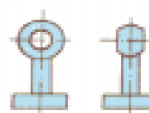
2. zásobník písku s modelovou deskou před překlopením



5. skořepinová forma připravená k lití



3. vytvoření skořepiny



6. odlitek

Obr. 23: Postup při lití do skořepinových forem [31]

## 4.2. Přímá výroba forem

Principem přímé výroby forem pro lití je zhotovení trvalých či netrvalých forem, jader či skořepin některou z metod RP, použitelných k přímému odlévání železných či neželezných kovů. U těchto metod není vůbec nutné zhotovení reálného 3D modelu součásti a pro výrobu takových forem stačí digitální model odlévané součásti. [16]

### 4.2.1. Přímá výroba pískových forem a skořepin

V oblasti lití do písku jsou metody RP použity pro výrobu jednotlivých dílů formy pomocí RP modelu. RP model je rozdělen v dělicí rovině na dvě poloviny, kdy každá polovina modelu slouží k vytvoření jedné poloviny pískové formy. Rovněž je možné aplikovat RP metody pro zhotovení pískových jader, kde je možnost aplikovat RP metody pro konstrukci forem – jaderníku. Je však třeba vzít v úvahu, že např. některé formy, zvláště určené pro letecký průmysl, mohou mít až 20 vnitřních jader. Vyrobit takovou formu klasickým způsobem je velmi časově náročné. Pomocí metod RP je při stavbě jader a dalších tvarových dílů možné čas snížit až o 50%. Nehledě k tomu, že při opravě nebo modifikaci máme k dispozici CAD data, které mohou být snadno opravena a proces se může opakovat. Opět je k dispozici řada materiálů, z kterých je možno vyrobit jednotlivé tvarové díly RP modelu. Např. FDM používá univerzální ABS materiál, LOM papír, SL epoxidové polymery pro přesné pískové lití a další. [2]

Dalším novým přístupem je použití metod RP k přímému zhotovení pískových jader a forem. Tyto metody znamenají opravdu revoluční převrat ve výrobě forem pro pískové lití. Jedním z představitelů této technologie je německá firma EOS. Jejich největší RP systém EOSINT S 750, pracující na základě sinteringu, umožňuje tvorbu kompletních pískových forem až do velikosti 720x380x380 mm. Nejsou vyžadovány žádné modely a jádra, neboť i extrémně složité formy jsou založeny na výrobě po vrstvách. To znamená, že konstrukce formy se velmi zjednoduší především v jejím konečném procesu montáže. EOSINT používá několik licích písku, které mají podobné vlastnosti jako řada písku standardně používaných. Tyto písky jsou vhodné pro pozdější zpracování např. hliníku a oceli. Jak již bylo řečeno, EOSINT pracuje na bázi spékání písku, a to postupně jednu vrstvu po druhé. Tímto způsobem je samozřejmě možné vytvářet podřezané a vnitřně zakřivené tvary, které by se pomocí konvenčními metodami nikdy nevytvořily. [2]

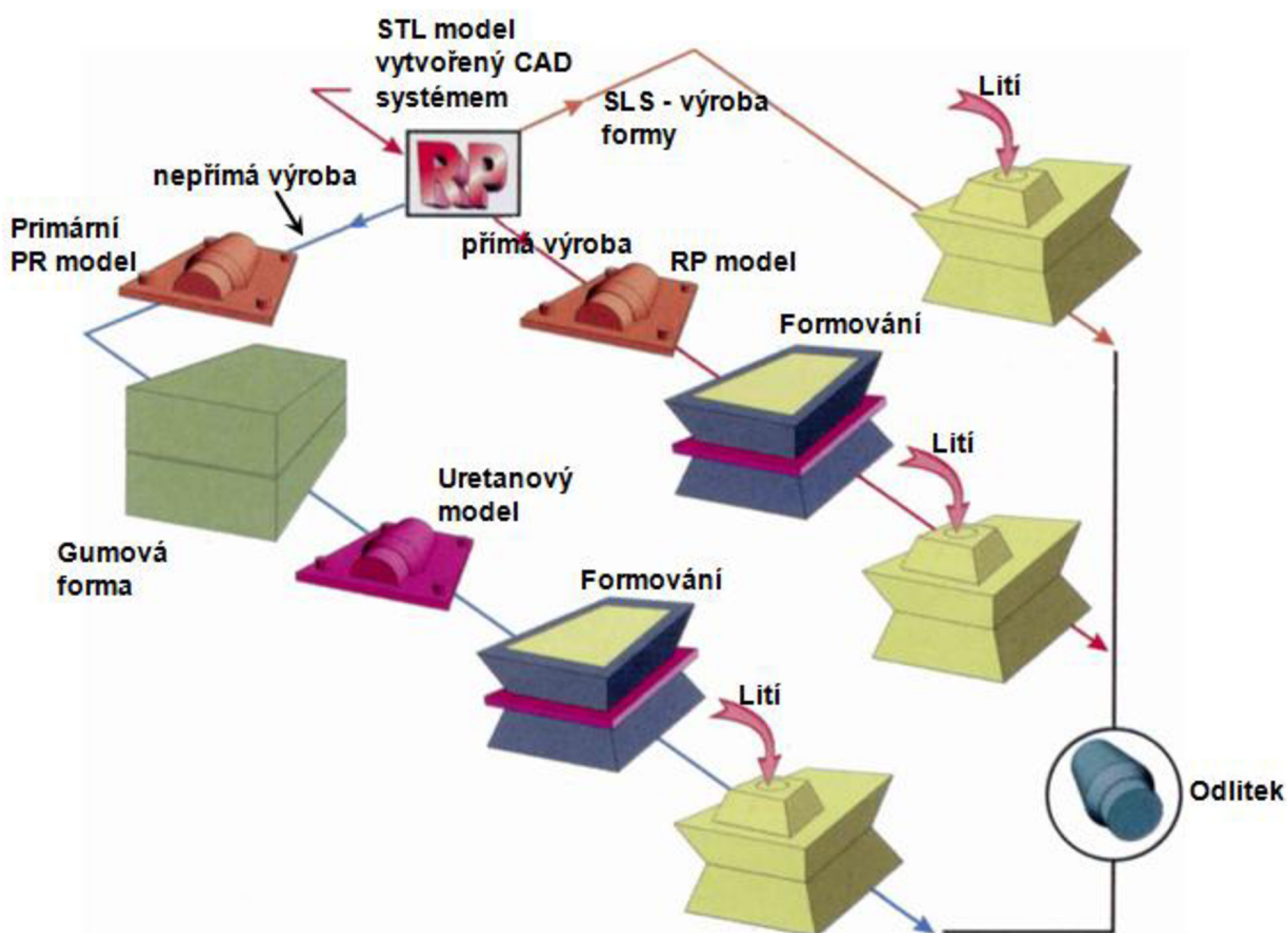
### Aplikace metod Rapid Prototyping

Jednu z možností výroby pískových forem nabízí v technologii SLS německá společnost EOS pod označením **DirectCast**. Pomocí zařízení *Eosint S750* a speciálního křemičitého materiálu je možno zhotovit kompletní pískové formy pro lití kovů. Metoda je vhodná pro zhotovení odlitků v malých sériích.

Další metodou, která prozatím nachází uplatnění pouze při lití nízkotavitelných neželezných kovů, je technologie **ZCast®**. Technologie pracuje na principu 3DP a s jejím využitím lze dosáhnout na 3D tiskárnách přímého tisku forem nebo jader ze speciálního písku *ZCast 501*. [16]

#### Vhodné metody:

- SLS – Foundry sand (DirectCast)
- 3DP ( ZCast® )
- Nízkotavitelné neželezné slitiny (hliník, hořčík, zinek)



Obr. 24: Možnosti zhotovení odlitků v netrvalých formách pomocí metod RP [24]

#### 4.2.2. Přímá výroba keramických forem a skořepin

##### Direct Shell Production Casting (DSPC)

Jedná se o technologii, využívající k tvorbě forem a skořepin materiálů, na bázi keramických prášků. Technologie je kombinací technologií SLS a 3DP. Keramický prášek je zde spojován za pomoci tekutého pojiva, nanášeného ink-jet tryskovou hlavou. Následně je vrstva slinována laserem. Tvar formy je navržen pomocí speciálního programu na základě digitálního modelu součásti. Formy se před litím kovů musí standardně vytvrdit v pecích.

Metoda se ovšem neomezuje pouze na keramický materiál. Stejně tak lze použít prášky na bázi karbidů křemíku, oxidu hliníku, zirkonu, křemene apod. Pomocí této technologie lze zhotovit velmi tvarově složité formy.[ 16]



**Obr. 25:** Příklad jednorázového modelu, keramické skořepiny a odlitku [32]

## 5 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zpracovat přehled technologií RP a to nejen starších, ale také nově rozvíjejících se technologií.

Úvod této práce se zabývá charakteristikou RP technologií a dále rozdělení výroby součástí do tří etap, a to preprocessing, processing a postprocessing. V první části této práce jsou popsány starší technologie, zejména ty, které jsou nejdéle na trhu. V následující části je stručný přehled novějších technologií, které nejsou ještě na trhu známé. Závěrečnou část tvoří aplikace metod RP ve slévárenských technologiích a to s důrazem na metodu vytavitelného modelu.

Rapid Prototyping je technologie, která se velice rychle rozvíjí a zasahuje do mnoha průmyslových odvětví např. do slévárenství, letectví, lékařství nebo do umění. Hlavním cílem u RP v dnešní době je zhotovit model v nejlepší kvalitě povrchu, s nejlepší rozměrovou přesností, dobrými mechanickými vlastnostmi a vše za nejpříjemnější cenu. V porovnání s konvenčními metodami zde hraje velkou roli rychlost výroby prototypového modelu. Pořízení technologie RP je velice finančně náročné. Velikou výhodou je snížení nákladů na výrobu a dobu zhotovení prvního výrobku.

Jednou z nejstarších technologií RP je Stereolitografie, která je zároveň označována jako nejpřesnější. Zde možno využívat velkou škálu materiálů. Další technologií, která je nejvhodnější pro výrobu modelů velkých rozměrů je technologie Laminated Object Manufacturing. Nevýhodou této technologie je velké množství odpadu. Většina nových technologií pracuje na podobném principu jako některé starší technologie (SLA, LOM, SLS, BPM, FDM). Liší se pouze v použitých materiálech, v počtu tiskových hlav nebo laserovém systému.

Ve slévárenství lze aplikovat technologie RP při přímé nebo nepřímé výrobě forem a modelů. Při lití na vytavitelný model se nejčastěji používá model, který je vyroben technologiemi SLS, SLA, FDM a 3DP. Dále se některé tyto technologie dají využít i při lití na vypařitelný model a lití do skořepinových forem, například technologií SLS nebo 3DP. Přímá výroba keramických forem a skořepin využívá technologie DSPC, která je kombinací technologií SLS a 3DP. Aplikace technologií RP ve slévárenství umožňuje různorodé využití. Stále se dynamicky rozvíjí, a tím je zajištěn dobrý výhled do budoucnosti.

## 6 SEZNAM POUŽITELNÝCH ZDROJŮ

- [1] 3D tiskárny., *Rapid Prototyping*. [online] [Cit.2011-02-16].  
URL< <http://www.3dtiskarna.cz/produkty/>>
- [2] Drápela, Miloslav, Modul Rapid Prototypin. [online] [Cit.2011-02-16].  
URL< <http://www.vu.vutbr.cz/digidesign/Moduly/Rapid%20Prototyping%20-%20Ing.%20Dr%C3%A1pela.pdf>. adresa>.
- [3] MCAE Systems, s.r.o, *3D Printer*. [online] [Cit.2011-02-15].  
URL< <http://www.mcae.cz/rapid-prototyping> >.
- [4] Kai, Fai, Chu-Sin., *Rapid Prototyping - Principles and Applications*.  
World Scientific : World Scientific, 2003. ISBN: 9812381201.
- [5] ID'a. *RAPID prototypů..* [online] [Cit.2011-02-22].  
URL< <http://www.idalabdesign.com/prototipazione.html> >.
- [6] Ing. Robert Navrátil. *Rapid Prototyping* [online] [Cit.2011-02-22].  
URL< <http://robo.hyperlink.cz/rapid/index.html>>.
- [7] MM průmyslové spektrum. *Technologie Rapid Prototypingu..* [online]  
[Cit.2011-02-22].  
URL< <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-rapid-prototypingu> >.
- [8] POLITECHNIKA WARSZAWSKA. *Laboratirium szybkiego prototypowania*  
[online] [Cit.2011-02-22].  
URL<<http://imik.wip.pw.edu.pl/kmib/index.php?option=content&task=view&id=55>>
- [9] University of Northernlowa., *Major RP Technologies* [online]  
[Cit.2011-02-22].  
URL<[http://www.uni.edu/~rao/rt/major\\_tech.htm](http://www.uni.edu/~rao/rt/major_tech.htm)>.
- [10] AlphaPrototypes., *FDM Prototyping Services* [online] [Cit.2011-02-23].  
URL<<http://www.alphaprototypes.com/FDM-Fused-Deposition-Modeling.aspx>>.
- [11] ARPTECH., *Arptech - Rapid Prototyping services* [online] [Cit.2011-02-23].  
URL< <http://www.arptech.com.au/fdmhelp.htm> >.
- [12] LIOU, FRANK W. *Rapid prototyping and engineering applications: a toolbox for prototype development*, 2007ISBN-13: 978-0-8493-3409-2. ISBN-10: 0-8493-3409-8.
- [13] MM průmyslové spektrum., *Nekonvenční metody obrábění 10. Díl* [online]  
[Cit.2011-03-01].  
URL<<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil>>.

- [14] Rapid Prototyping Center, *Laminated Object Manufacturing* [online] [Cit.2011-03-01].  
URL< [http://www.rpc.msoe.edu/machines\\_lom.php](http://www.rpc.msoe.edu/machines_lom.php) >.
- [15] LENA U, Torben. *Design inSite* [online]. c1996-2004 [cit. 2011-03-03].  
URL <<http://www.designinsite.dk/htmsider/inspproc.htm>>
- [16] Horáček, M. – Slovák, V., *Metody rychlého prototypování (RP) použitelné ve slévárenství*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 6 s.
- [17] DesignTech., *Připravujeme data pro Rapid Prototyping* [online] [Cit.2011-03-29].  
URL<<http://www.designtech.cz/c/cam/cad/cad/cad/cad/cad/cad/pripravujeme-data-pro-rapid-prototyping.htm>>.
- [18] Solido., *Fotogalerie* [online] [Cit.2011-03-01].  
URL< <http://solido3d.cz/content/fotogalerie> >.
- [19] DEVELOP 3D, *3D printed & sustainable Melonia Shoe nominated for a Brit Insurance Design Award* [online] [Cit.2011-02-22].  
URL<<http://develop3d.com/tags/tag/direct+manufacturing> >.
- [20] JIM HANNOM-TAN., *Design Projects* [online] [Cit.2011-02-22].  
URL<<http://www.jimhannontan.com/design-projects/3d-printing/1721721>>.
- [21] Quickparts., *FDM Process Gallery*. [online] [Cit.2011-02-23].  
URL<<http://www.quickparts.com/LowVolumePrototypes/FDM/ProcessGallery.aspx>>.  
URL< <http://www.cheng-casting.com/investment-casting-precess.htm>>.
- [22] D-MEC LTD., *Solid Creation System* [online] [Cit.2011-04-06].  
URL< <http://www.suncenter.co.jp/tskc/NEWYEAR2008/e-catalog.pdf> >.
- [23] Michna, Š., *Strojírenská technologie*. [online] [Cit.2011-03-28].  
URL<[http://www.stefanmichna.com/download/opory/strojirenska\\_technologie.pdf](http://www.stefanmichna.com/download/opory/strojirenska_technologie.pdf)>.
- [24] Charvát, O., Horáček, M., *Možnosti aplikace metod RP s použitím technologie vytavitelného modelu*, [s.l.] [s.n.]. 2007. 47 s.
- [25] Kracman, O., *Faktory ovlivňující přesnost odlitků u metody vytavitelného modelu*. [online][Cit.2011-03-30].  
URL<[http://stc.fs.cvut.cz/History/2008/Sbornik/S3/Kracman\\_Ondrej\\_12133.pdf](http://stc.fs.cvut.cz/History/2008/Sbornik/S3/Kracman_Ondrej_12133.pdf)>.
- [26] Ningbo Tiancheng Non-ferrous Metal Products CO.,LTD., *Investment Casting Process* [online] [Cit.2011-03-30].  
URL< <http://www.cheng-casting.com/investment-casting-precess.htm>>.

- [27] Eagle Engineered Solutions Inc., *Moeller Design and Development*. [online] [Cit.2011-03-01].  
URL<<http://www.eagle-esi.com/moeller-designs.shtml>>.
- [28] TECH, INC., *QuickCast (SLA)*. [online] [Cit.2011-04-01].  
URL< <http://www.techok.com/quick-cast.html> >.
- [29] KIMURA., *History of the Full Mold Casting Process*. [online] [Cit.2011-02-23].  
URL<<http://www.kimuragr.co.jp/English/casting/index2.html>>.
- [30] Streamtech.tv, *Lost Foam – výroba odlitků metodou spalitelného modelu* [online] [Cit.2011-03-31].  
URL< <http://www.streamtech.tv/video-108-tost-foam-vyroba-odlitku-metodou-spalitelneho-modelu.htm>>.
- [31] Strojní lyceum, *Odlévání* [online] [cit. 2011-04-01].  
URL<<http://www.strojnylyceum.wz.cz/maturita/tep/odlevani.pdf>>.
- [32] Windform, *Case study Rapid Casting*. [online] [Cit.2011-03-01].  
URL< <http://www.windform.it/sito/en/rapid-casting-case-study-castform-products.html> >.



## 7 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1:** Využití technologie Rapid Prototyping [1]
- Obr. 2:** Postup při Rapid Prototyping [3]
- Obr. 3:** Prototyp v CAD modelu a hotový model [5]
- Obr. 4:** Schéma technologie Stereolitografie [8]
- Obr. 5:** Schéma technologie Selective Laser Sintering [9]
- Obr. 6:** Schéma technologie Fused Deposition Modeling [11]
- Obr. 7:** Schéma technologie Laminated Object Manufacturing [14]
- Obr. 8:** Schéma technologie Three-Dimensional Printing [2]
- Obr. 9:** Schéma technologie Solid Ground Curing [15]
- Obr. 10:** Schéma technologie Multi-Jet Modeling [17]
- Obr. 11:** Příklady metody Laminated Object Manufacturing [18]
- Obr. 12:** Příklady metody Selective Laser Sintering [19] [20]
- Obr. 13:** Příklady metody Stereolitografie [7]
- Obr. 14:** Příklady metody Fused Deposition Modeling z různých materiálů [21]
- Obr. 15:** Modely technologie Solid Creation System [22]
- Obr. 16:** Rozdělení metod výroby odlitků z hlediska použité formy [23]
- Obr. 17:** Zhotovení odlitku kombinací metod RP a přesného lití [24]
- Obr. 18:** Postup při odlévání [23]
- Obr. 19:** Postup výroby odlitku metodou vytavitelného modelu [26]
- Obr. 20:** Příklad QuickCast [27] [28]
- Obr. 21:** Schéma lití do silikonové formy [2]
- Obr. 22:** Polystyrénový model a odlitek [29]
- Obr. 23:** Postup při lití do skořepinových forem [31]
- Obr. 24:** Možnosti zhotovení odlitků v netrvalých formách pomocí metod RP [24]
- Obr. 25:** Příklad jednorázového modelu, keramické skořepiny a odlitku [32]

## 8 PŘÍLOHY

CD-ROM      Obsahuje elektronickou verzi bakalářské práce ( \*.docx a \*.pdf) a dále jsou přidány všechny obrázky použité v této bakalářské práci.