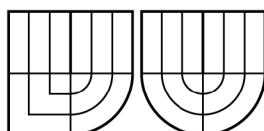


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

METODY RYCHLÉHO PROTOTYPOVÁNÍ (RP)
POUŽITELNÉ VE SLÉVÁRENSTVÍ
RAPID PROTOTYPING METHODS (RP) SUITABLE FOR FOUNDRY TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VOJTĚCH SLOVÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

NETISKNOUT!
Zadání

NETISKNOUT!

Licenční smlouva - oboustranně

ABSTRAKT

Tato práce se snaží o ucelený přehled současných nejvýznamnějších metod Rapid Prototyping a jejich nejčastějších aplikací v oboru Slévárenství. Neklade si za cíl najít všechny existující metody rychlého prototypování, ani všechny jejich uplatnění ve slévárenství, ale chce zachytit jejich nejdůležitější aplikace v čele s metodami přesného lití.

Klíčová slova

Rychlé prototypování, Slévárenství, Metoda vytavitelného modelu, metoda vypařitelný modelu

ABSTRACT

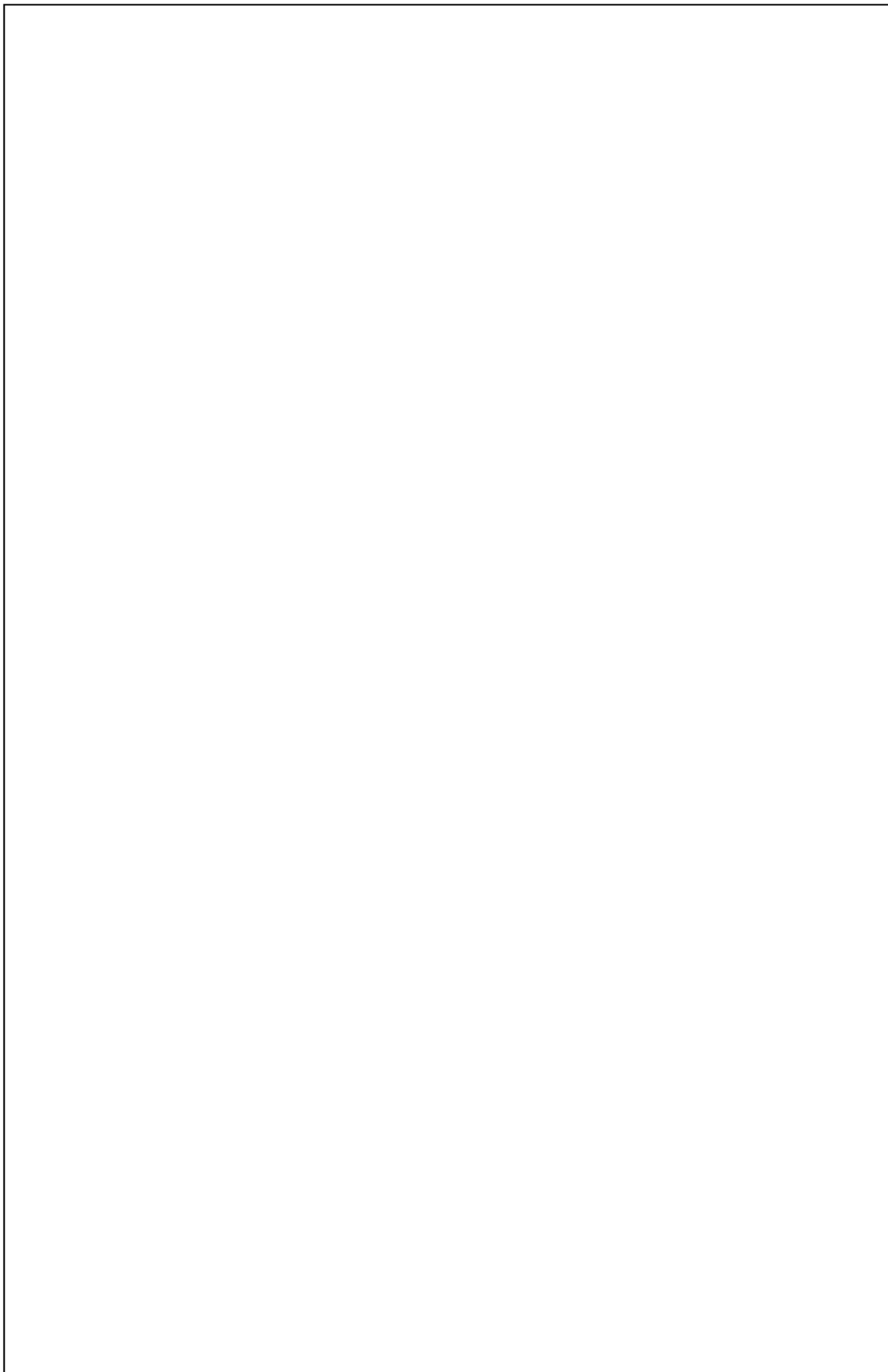
The aim of this thesis is to make an integrated view of the most considerable current Rapid prototyping methods and the most frequent applications in the foundry industry. The work does not propose to find all existing Rapid prototyping methods and their use in the foundry technology either. But it wants to take down the most important applications of Rapid prototyping methods especially direct casting methods.

Key words

Rapid Prototyping, Foundry industry, Lost Wax, Lost Foam

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLOVÁK, Vojtěch. *Název: Metody rychlého prototypování (RP) použitelné ve slévárenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 49 s. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.



Prohlášení

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

27. 5. 2009

.....

Vojtěch Slovák

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	6
PODĚKOVÁNÍ.....	7
OBSAH.....	8
ÚVOD	9
1 ÚVOD DO RAPID PROTOTYPING	10
1.1 Stručná historie RP	10
1.2 Princip technologie Rapid Prototyping.....	11
1.3 Přehled jednotlivých technologií RP	11
1.3.1 Stereolitografie (stereolithography).....	13
1.3.2 Metoda SLS (Selective Laser Sintering)	16
1.3.3 Metoda FDM (Fused Deposition Modeling).....	23
1.3.4 Laminátování – metoda LOM (Laminated object manufacturing)	25
1.3.5 Solid Ground Curing (SGC)	27
1.3.6 Ballistic Particle Manufacturing (BPM)	28
1.3.7 Three-dimensional printing (3DP)	28
1.3.8 Ostatní metody RP	32
2 POUŽITÍ METOD RAPID PROTOTYPING VE SLÉVÁRENSTVÍ.....	33
2.1 Nepřímá výroba forem.....	34
2.1.1 Metoda vytavitelného modelu (Lost Wax).....	34
2.1.2 Metoda vypařitelného modelu (Lost Foam)	37
2.1.3 Metoda vypařitelného modelu (Replicast)	39
2.1.4 Další způsoby využití RP při nepřímé výrobě forem	40
2.2 Přímá výroba forem.....	42
2.2.1 Přímá výroba pískových forem a skořepin.....	42
2.2.2 Přímá výroba keramických forem a skořepin	43
3 JEDNOTLIVÉ METODY VE SLÉVÁRENSTVÍ.....	44
4 ZÁVĚR.....	47
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	48

ÚVOD

Na úvod je dobré si říct něco o rychlém prototypování (rapid prototyping) obecně. Základem technologie rapid prototyping (dále jen RP) je vytvoření reálného modelu výrobku za co nejkratší dobu a v co možná nejlepší kvalitě. A právě kvalita povrchu vytvářených modelů je jednou ze slabin některých technologií RP. Ne vždy se totiž daří dosáhnout požadovaného povrchu součástí, vyráběných některou z metod RP. Naopak velkou předností RP je první jmenovaný aspekt, a sice doba přípravy modelu výrobku. Ta je oproti konvenčním metodám výrazně kratší. A právě kratší doba vývoje výrobků, s čímž příprava prototypů dost úzce souvisí, je v současné době klíčovým prvkem výroby v mnoha oblastech, obzvláště pak ve strojírenství.

Při té příležitosti nelze nezmínit ani další obory, kde RP nalézá široké uplatnění, a tím je lékařství, automobilový a letecký průmysl, umění a architektura a v neposlední řadě slévárství, na které bude v této práci soustředěna hlavní pozornost. Konkrétní příklady využití v různých oborech jsou zobrazeny na Obr. 1

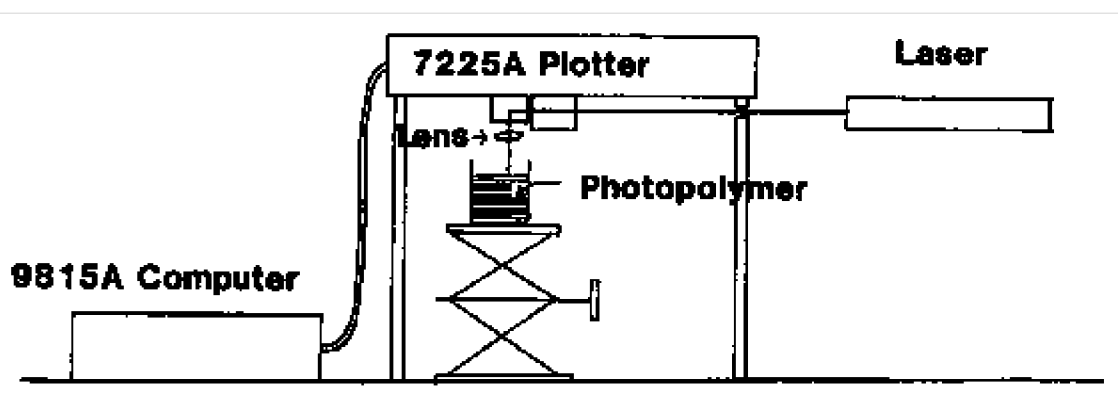


Obr.1 Příklady využití RP

1 ÚVOD DO RAPID PROTOTYPING

1.1 Stručná historie RP

Počátky rychlého prototypování sahají do 80. let 20. století, kdy začala být komerčně využívána první z metod RP – Stereolitografie. S tou přišel jako první Charles Hull a v roce 1986 založil v Kalifornii firmu 3D Systems. S myšlenkou stereolitografie jako procesu využívající fotopolymery ovšem přišel již několik let před ním japonský výzkumník Hideo Kodaky a nezávisle na něm i američan Alan Herbert z firmy 3M Corporation. Ten popsal systém, který vrhá laserový paprsek na vrstvu fotopolymerů pomocí systému zrcadel. V jeho experimentálním návrhu (obr. 1.1), kde je k řízení laserového paprsku použit počítač, je poté nádoba s fotopolymerem spuštěna níže (přibližně o 1 mm) a k vytvoření další vrstvy je následně přidán další tekutý fotopolymer. [1]



Obr. 1.1 Návrh Alana Herberta (1)

V následujících letech se prosadilo hned několik dalších technologií, pracujících na principu postupného přidávání nebo vytvrzování vrstev materiálu.

V roce 1987 to byl systém BPM (Ballistic Particle Manufacturing) vynalezený Billem Mastersem, který o rok později zakládá firmu BPM Technology, v roce 1988 přichází americká firma Helysis s technologií LOM (Laminated Object Manufacturing), pracující na principu vrstvení tenkých fólií z papíru, nylonu nebo polyesteru, v roce 1989 spatří světlo světa technologie SLS (Selective Laser Sintering), pracující na principu slinování práškových materiálů za použití laseru, vyvinutá na Texaské univerzitě v Austinu a licencovaná na společnost DTM Corp. V roce 1992 představuje společnost Stratasys systém FDM (Fused Deposition Modeling), kde není na rozdíl od ostatních metod použit laser a kde jsou jednotlivé vrstvy vytvářeny nanášením roztaveného termoplastu. V roce 1993 pak v Massachusetts Institute of Technology vzniká technologie 3DP (Three-dimensional printing) licencovaná na společnost Z Corp a fungující na podobném principu jako inkoustový tisk. [2]

Časový přehled vzniku a vývoje technologií RP:

Rok vzniku	Technologie		patent - licence
1986	SLA	Stereolithography	3D Systems
1987	BPM	Ballistic Particle Manufacturing	BPM Technology
1988	LOM	Laminated Object Manufacturing	Helysis
1989	SLS	Selective Laser Sintering	DTM Corp.
1992	FDM	Fused Deposition Modeling	Stratasys
1993	3DP	Three-dimensional printing	Z Corp.

1.2 Princip technologie Rapid Prototyping

Obecně lze říci, že Rapid Prototyping, neboli rychlá výroba prototypů, je metoda, kdy se z virtuálního 3D modelu vyrábí 3D model fyzický. K tomu se v současnosti používá několika různých technologií, popsaných podrobněji níže. Virtuální 3D modely jsou dnes vytvářeny většinou pomocí CAD systémů, nebo prostorových skenerů (Reverse Engineering).

Podstatou všech technologií RP je vytváření fyzického modelu postupným přidáváním jednotlivých vrstev materiálu na sebe. Na rozdíl od běžných metod obrábění, kdy je materiál z polotovaru postupně odebírán, je u metod RP postupně přidáván. Z podstaty metody vyplývá i velká časová úspora oproti konvenčním metodám hlavně v oblasti přípravy výroby. Místo týdnů jsme schopni vyrobit prototyp součásti v několika dnech či dokonce hodinách.

Velkou výhodou je možná složitost použitých tvarů a geometrií vyráběných modelů, která je prakticky neomezená (záleží na druhu použité technologie).

Způsob přidávání jednotlivých vrstev, druh použitého materiálu i konkrétní vlastnosti modelů již závisí na použité metodě RP.

1.3 Přehled jednotlivých technologií RP

Proces výroby modelu pomocí RP lze rozdělit do třech základních etap:

- a) **Preprocessing** – řadíme sem vše, co souvisí s přípravou dat. Může to být například transformace dat z CAD systémů do formátu STL, kdy dochází k náhradě geometrického tvaru součásti skupinou rovinných plošek ve tvaru trojúhelníků. U některých metod RP je také třeba zajistit tzv. podpurné konstrukce vrstev, které nejsou samonosné při zhotovování po částech. S tím také souvisí volba vhodné orientace součásti, která může mít pozitivní vliv jak na potřebu použití podpor, tak na konečný povrch a strukturu součásti.
- b) **Processing** – do této oblasti spadá výroba modelu po jednotlivých vrstvách konkrétní metodou. Pro představu uveďme základní principy nejznámějších metod, nejčastěji využívaných firmami, zabývajícími se tvorbou modelů pomocí RP:

Základní fyzikální principy jednotlivých metod:**Metoda Stereolitografie – SL**

SL patří mezi první metody Rapid Prototyping. Jednotlivé vrstvy jsou tvořeny pomocí laseru, který postupně vytvrzuje hladinu tekutého polymeru.

Metoda Fused Deposition Modeling – FDM

FDM patří mezi metody Rapid Prototyping, kdy tvorba jedné vrstvy vzniká postupným nanášením roztaveného materiálu.

Metoda Selective Laser Sintering – LS

SLS využívá při tvorbě jednotlivých vrstev opět laseru. Materiál pro tvorbu jedné vrstvy se ve formě jemného prášku nanese do plochy řezu a uhladí. Potom laser spéká vrstvu materiálu již k předešlé ztuhlé vrstvě.

Metoda Laminated Object Manufacturing – LOM

LOM využívá při stavbě vrstvy folii materiálu, kterou laminátuje a následně její obrys ořezává laserem nebo mechanicky.

Metoda Three Dimensional Printing – 3DP

3DP využívá adhezivního pojiva, které selektivním způsobem aplikuje na vrstvu práškového materiálu a tím se mechanicky spojuje.

Metody založené Inkjet technologií

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

RP metoda	Podpory	Výchozí materiál	Laser	Stavba modelu
SL	Ano	Tekutý polymer	Ano	Vytvrzení vrstvy laserem
FDM	Ano	Drát - plast	Ne	Nanášení vrstvy protlačováním
LS	Ne	Prášek - Plast, Kov	Ano	Spékání laserem
LOM	Ne	Fólie - Papír, Plast	Ano	Laminátování, ořez laserem
3DP	Ne	Prášek - Sádra, Kov, Keramika	Ne	Slepení částic, vytvrzením

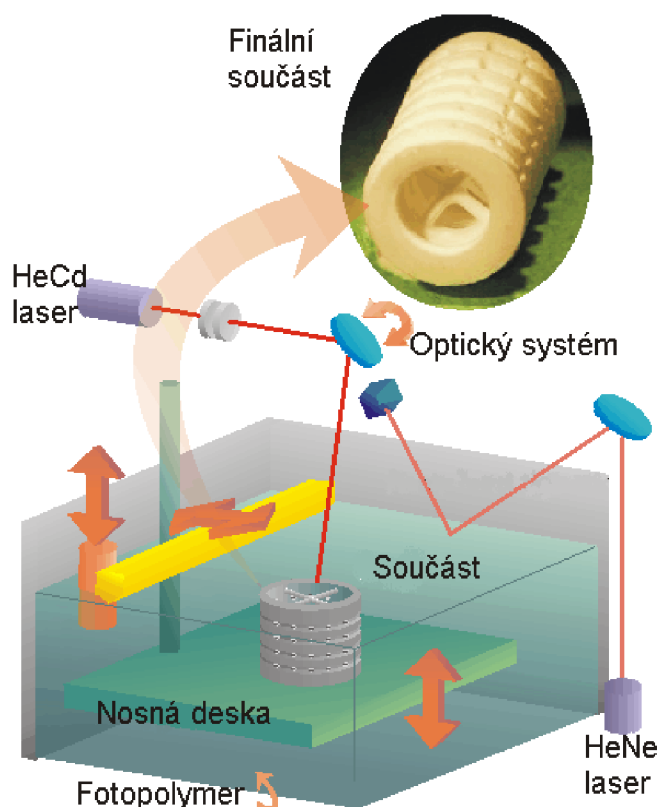
Obr. 1.2 Rozdíly mezi jednotlivými metodami RP (3)

- c) **Postprocessing** – tato fáze přichází po vyrobení daného modelu. Patří sem například vyjmutí modelu ze zařízení. U některých metod je třeba vyčkat delší dobu, než je možné výrobek zpřístupnit obsluze. Někdy je nutné odstranit okolní materiál součásti. To se v závislosti na druhu metody může provádět např. odsátím (u práškových materiálů) nebo oplachem (např. u fotopolymerů). U některých metod je vyžadováno další zpracování součásti jako je dotvrzování dílů UV zářením nebo zvyšování pevnosti napouštěním dalšími látkami. Může následovat odstranění podpor ať už mechanicky, rozpouštěním v tekutých lázních, nebo jejich vytavením. V neposlední řadě sem patří i povrchová úprava modelu. Mechanická

úprava schodečkové struktury, způsobené vrstvením jednotlivých vrstev, a oblastí, kde se nacházely podpory, může probíhat pomocí tmelení či třeba finišování. Některé materiály se mohou dále standardně obrobit, barvit, lakovat nebo galvanicky pokovovat. [3]

1.3.1 Stereolitografie (stereolithography)

Je historicky první metodou, která se dá zahrnout pod pojem Rapid Prototyping. Zároveň patří mezi uvedenými metodami k nejpřesnějším, což ji řadí k předním metodám. Výhodou je rovněž možnost použití velkého rozsahu materiálů. Touto metodou je možné na rozdíl od mnoha jiných metod vytvářet modely s drobnými prvky a otvory. Modely se dají ve většině případů využít jako vizuální kontrola navrhované součásti, díky širokému rozsahu použitelných materiálů se ale v některých případech používají i k funkčním zkouškám, či jako formy pro vstříkovaní a lití. **To tuto metodu řadí mezi metody, použitelné ve slévárenství.** Mezi nevýhody můžeme naopak zařadit pomalý proces tvrzení polymeru, u vybraných materiálů potom i malá tepelná odolnost.



Obr. 1.3 Schéma stereolitografie (4)

Princip metody:

Model je vytvářen postupným vytvrzováním fotopolymeru (plastická hmota, citlivá na světlo) pomocí UV laseru. Ten je na základě dat z počítače směřován pomocí

poměrně složité optické soustavy zrcátek, řízených servopohony. Údaje, pomocí kterých vede XY skenovací hlava paprsek laseru nad nádobkou s polymerem, jsou předem vytvořeny pomocí informací o rozměrech příčných řezů v jednotlivých vrstvách. Model je tvořen na nosné desce, která je na začátku celého procesu ponořena pod hladinou polymeru právě v hloubce jedné vrstvy. Plošina poté po zhotovení jedné vrstvy klesá o vrstvu níže a vytvrzuje se další vrstva.

U této metody je třeba už v oblasti preprocessingu pamatovat na tvorbu podpor, protože jednotlivé vrstvy jsou vytvrzovány v tekutém polymeru a některé části modelu nemusí být díky principu tvorby po vrstvách samonosné. To se promítá i do oblasti postprocessingu kde je nutné podpory odstranit a jednotlivá místa povrchově upravit. Ještě před tím se ale model, vyjmutý z polymerové lázně, čistí, myje a vytvrzuje v přídatných zařízeních – UV pecích. Po vytvrzení a odstranění podpor dochází ještě k celkové povrchové úpravě modelu (*Pozn.: U nejnověji vyráběných SL zařízení, které pracují s velkou přesností při vysokých rozlišeních se ale postprocessingu lze z velké části vyhnout*).

Stereolitografické přístroje.

O rozvoj stereolitografie a potažmo celého odvětví RP se zasadila, jak už je zmíněno v úvodu, americká firma *3D Systems*, která přišla rovněž s celou řadou stereolitografických zařízení. Mezi první patřil přístroj *SLA-250* vybavený plynovým laserem a dnes už poměrně hodně zastaralým řídicím systémem, který se v Evropě objevil na začátku 90.let. V ČR pak byly vyrobeny pomocí této metody první výrobky v roce 1998, kdy toto zařízení začal používat český zástupce – firma *3D Tech*. Zařízení bylo schopno zhotovit modely o velikosti až 250 x 250 x 250 mm a minimální tloušťkou vytvrzované vrstvy v rozmezí 0,15 – 0,0625 mm (v závislosti na konkrétní sérii přístroje). Poté následovaly např. *SLA-190*, *SLA-350*, *SLA-5000* aj.



Obr. 1.4 stereolitografické centrum *iPro 9000 XL* s ukázkou konkrétního výrobku (6)

V současnosti vyrábí SL zařízení celá řada firem, přesto si *3D Systems* udržela významné postavení na trhu. Momentálně nabízí například model *Viper™ SLA®*

System, který kromě standardního režimu, optimalizovaného pro vyvážený poměr mezi kvalitou modelu a výrobním časem, může pracovat i v režimu vysokého rozlišení, pomocí kterého lze dosáhnout tloušťky vrstvy až 0,02 mm (standardně dostačuje a je využíváno 0,1 mm). Přesnost tohoto zařízení se pohybuje v rozmezí +/- 0,1% (min. +/- 0,1 mm). Nejnovějším nabízeným zařízením je potom SL centrum *iPro 9000 XL* které dokáže vyrobit součásti o rozměrech až 1500 x 750 x 550 mm a je tak největší komerčně využívanou platformou na trhu. Zároveň patří do řady tzv. „**High Definition SLA**“, tedy zařízení schopných vyrábět součásti s velmi vysokou přesností.

Nelze opomenout ani přídatná UV zařízení, sloužící k dotvrzení modelu po vyjmutí z lázně. Zde firma nabízí *ProCure™ 350 UV Finisher* pořádkově *ProCure™ 750 UV Finisher* který lze využít pro objemnější součásti o rozměrech až 630 x 1050 x 1050 mm. Zařízení jsou vybavena velkým rotačním zrcadlovým systémem, tak aby byly UV záření vystaveny všechny části modelu, tedy i vrchní a spodní část.

Materiály:

I materiály, používané ve stereolitografickém procesu, prošly postupným vývojem:

Akryláty – Jedná se o materiál, který se v současnosti už příliš nepoužívá. Materiály na akrylátové bázi se vyznačovaly vysokou smrštitivostí a malou přesností.

Epoxidy – Moderní materiál vyznačující se naopak malou smrštitivostí a vysokou přesností.

Plněné pryskyřice – V současnosti nejpoužívanější materiál ve stereolitografii. Pryskyřice jsou vyplňovány dalšími organickými materiály, keramikou nebo kovy pro dosažení lepších mechanických i jiných (např. odolnost vůči vyšším teplotám) vlastností materiálu.

Firma 3D Systems například nabízí pro své zařízení materiálovou řadu nesoucí označení **Accura® SL Materials**. Jednotlivé materiály se liší jak cenami tak hlavně i materiálovými charakteristikami a jejich volba závisí na požadovaných vlastnostech vyráběné součásti, ať už je to vysoká tepelná odolnost bez lámavosti a s dobrou životností součásti (**Accura® 40**), vysoká ohebnost s dobrou tvarovou pamětí (**Accura® 25**) nebo vysoká průhlednost a tuhost (**Accura® 60**) atd. [6]



Obr. 1.5 příklady využití materiálu Accura® 60 (6)

Stereolitografie zasahuje velmi výrazně i do oblasti slévárenství. Konkrétně se jedná o metodu **QuickCast** kterou prezentuje právě zmíněná 3D Systems. V principu se jedná o technologii, velmi podobnou metodě vytavitelného modelu, používanou ve slévárenství při výrobě kovových dílů. Hlavní rozdíl oproti klasické technologii spočívá v zaformování stereolitografického modelu namísto voskového. Lze tak vyrobit i velmi složité kovové díly rozličných tvarů. Díky tomu metoda nachází uplatnění i v medicíně, kde se používá při výrobě koleních a kyčelních náhrad. Větší pozornost této metodě je věnována v dalších částech této práce.

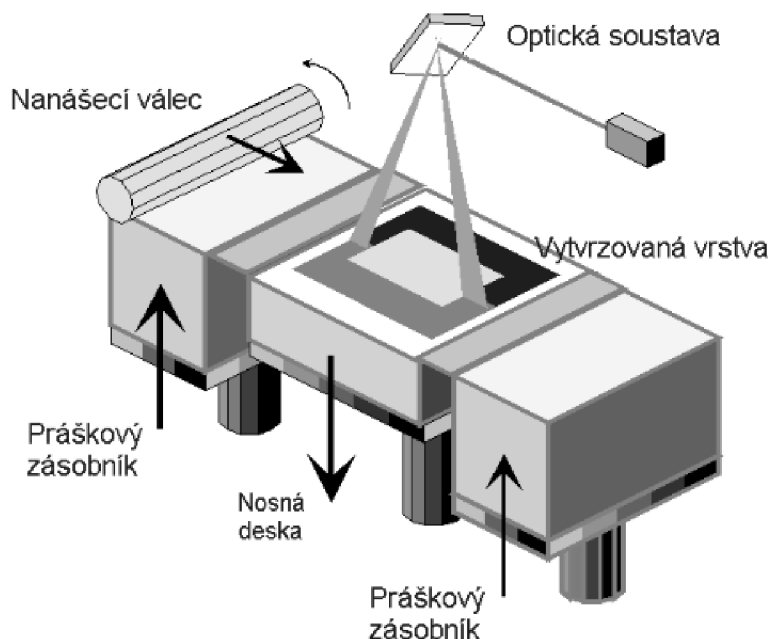
Shrnutí dané metody v bodech (výhody a nevýhody oproti jiným metodám RP):

- + jedna z nejpresnějších metod
- + možná tvorba drobných částí a otvorů
- + v současnosti již široké spektrum použitelných materiálů
- + možnost dosažení dobré povrchové drsnosti

- nutná tvorba podpor
- malá tepelná odolnost některých materiálů
- pomalejší proces tvrzení fotopolymerů
- nutnost následného dotvrzení
- náklady na vanu s velkým množstvím pryskyřice

1.3.2 Metoda SLS (Selective Laser Sintering)

Jedná se o novější metodu, která vychází z podobných principů jako předešlá metoda (SL). K vytváření dochází rovněž pomocí laseru, avšak výchozím vytvářeným materiálem je sypký materiál, nejčastěji prášek. Oproti SL jsou modely vyrobené touto metodou velmi pevné, což je jednou z hlavních předností SLS. Modely dosahují pevnosti srovnatelné s běžnými materiály používanými k výrobě modelů pomocí standardních metod obrábění. Velmi časté je tak využití při ověřování funkčnosti dílu v praxi. Oproti předešlé technologii SLA nelze díky použití prášku a větší tloušťce vrstev u SLS modelů vyrobit tak drobné detaily. Naopak další předností metody je široký rozsah použitelných materiálů. Teoreticky lze použít jakýkoli prášek, který se při působení tepla taví nebo měkne.



Obr. 1.6 Schéma metody SLS (5)

Princip metody:

Podobně jako v předešlé metodě stereolitografie je model vytvářen postupným vytvrzováním jednotlivých vrstev materiálu pomocí UV laseru. Přídavným materiálem je ale v tomto případě plastový nebo kovový prášek, případně slévárenský písek. Ten se nanáší pomocí válce na nosnou desku po jednotlivých vrstvách a pomocí laseru se na kontaktních místech zapeče nebo roztaví. Tloušťka jednotlivé vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,2 mm. Deska se nachází v uzavřené nádobě s inertní atmosférou, která je zahřívána na teplotu, která je blízká tavné teplotě horní vrstvy práškového materiálu. To vytváří při výrobě ustálené teplotní podmínky a má celkově pozitivní vliv při stavbě součástí. Oproti předešlé metodě SL (viz. kap.1.3.1), kdy materiál přechází z tekuté fáze do pevné, zde materiál prochází dvěma fázemi. Nejdříve přechází z pevné do tekuté a následně opět do pevné fáze. Takto vytvrzené vrstvy jsou obklopeny okolním nezpracovaným materiálem sloužícím jako podpora. Není tedy nutné, na rozdíl od některých jiných metod, generování podpor v oblastech, které nejsou při tvorbě modelu po částech samonosné.

V oblasti postprocesingu se nechá prášek nejdříve vychladnout, poté je nutné model vyjmout a odstranit okolní nezpracovaný materiál okartáčováním, ofukem apod. Nespotřebovaný materiál je z 98% znovu využit pro opětovnou výrobu, což zaručuje vysokou ekonomičnost i ekologičnost procesu. V závislosti na použitém materiálu pak probíhají další povrchové úpravy jako pískování, v případě kovových materiálů i žíhání apod. Obecně lze ale říct, že jsou úpravy po vyhotovení modelu touto metodou minimální. Tvarem a povrchem jsou díly blízké požadavkům „near net shape“ či „net shape“, tj. hotový funkční výrobek s případnou úpravou lakováním, povlakováním nebo pokovením. [7]

SLS technologie nachází využití také ve slévárenství, a to především u metod přesného lití - s využitím **vypalitelného modelu**. Používaným materiálem je v tomto případě polystyren, který je následně nasycen voskem. Zpracování

takového modelu je do jisté míry shodné se zpracováním klasického voskového modelu.

Podle druhu použitého modelovacího materiálu je možno v rámci této technologie rozlišovat následující metody:

- **Laser Sintering - Plastic**
- **Laser Sintering - Metal**
- **Laser Sintering - Foundry Sand**
- **Laser Sintering - Ceramic**

V současnosti je vývoj SLS zařízení na úrovni, při které lze pracovat s těmito druhy materiálů na jednom přístroji.

Laser Sintering - Plastic

Je zde, stejně jako například u FDM, možno volit z několika druhů plastických materiálů, které svými vlastnostmi určují i způsob využití hotového modelu. Dají se použít polyamidy, polyamidy plněné skelnými vlákny, polykarbonáty či polystyreny. Při použití nylonu dosahují výsledné modely vynikající mechanické vlastnosti jako tvrdost, houževnatost, teplotní odolnost atd. Tyto modely jsou proto vhodné pro funkční zkoušky nebo testy lícování. Standardním využitím všech modelů je prostorová vizualizace navrhovaného výrobku.

Laser Sintering - Metal

Modely vzniklé touto metodou dosahují dostatečné pevnosti a mechanické odolnosti, takže je možno je využít především jako formy pro výrobu plastových součástek vstřikováním nebo lisováním.

Laser Sintering - Foundry Sand

Jednou z nejnovějších technologií rapid prototypingu je Laser Sintering - Foundry Sand. Metoda používá upravený slévárenský písek, jehož vytvrzováním je možno bez jakýchkoli mezikroků vytvořit pomocí prototypovacího zařízení klasickou pískovou formu pro lití.

Laser Sintering - Ceramic

Výchozím materiálem je v tomto případě prášek slepovaný pomocí tekutého pojiva. Nanášení pojiva je zajištěno pomocí Ink-Jet tryskové hlavy, která je vedená v rovině XY podle předem vypočítaných řídicích údajů. Pomocí této metody se dají vyrábět různé součástky z keramického prášku nebo keramické formy a jádra pro technologii přesného lití.

Laser Micro Sintering

Metoda byla představena na počátku roku 2003 v Německu a posouvá přesnost SLS metody za hranice běžně komerčně využívaných SLS zařízení. Lze s ní vyrábět součásti s přesností pod 30 μm . Za použití Nd:YAG laseru o výkonu 10 W se spéká práškový materiál o velmi malé zrnitosti, velmi často wolfram. Součást je tvořena po vrstvách 0,03 mm a běžně se dosahuje kvality povrchu méně než Ra 1,5 μm ; [8][10]

SLS přístroje

K rozvoji metody Selective Laser Sintering velmi výrazně přispěla firma *DTM Corp.*, kterou ale v roce 2001 zakoupila firma *3D systems*. Ta v současnosti nabízí hned několik různých SLS zařízení. Ty jsou schopné zhotovit součásti o

rozměrech až 381 x 330 x 457 mm a pracují s vrstvami v rozmezí 0,08 – 0,15 mm. Základním zařízením, schopným zhotovit kompletní funkční model za pomoci dat z 3D CAD programu je *Sinterstation HiQ SLS Systems*. Veškerý nejnovější vývoj na poli SLS systémů potom představuje řada *sPro™ SLS® Centers*, zahrnující kompletní systém několika přístrojů pracujících pod hlavním systémem. Patří sem zařízení *sPro 60 HD SLS Center* s velmi širokým spektrem použitelných materiálů, rychlým a snadným systémem materiálové přestavby a vybavený nejrychlejším dostupným laserovým scanem, nebo jeho odlehčená verze *sPro 60 SD SLS Center* zaměřená zejména na nižší cenu a možnost upgradů dle přání zákazníka. Na SD verzi lze pracovat s materiály řady *DuraForm* (viz. níže). Ke zhotovení v současnosti největších možných SLS modelů jsou potom určeny *sPro 140/230 SLS Centers*, na kterých je možno zhotovit součást o rozměrech až 550 x 550 x 750 mm.

Na široké spektrum kovových slitin, včetně hliníku a titanu jsou potom zaměřena zařízení *SLM System DM100* a větší *DM250*, na kterých lze zhotovit součásti o průměru 125 mm a délce 80 mm, potažmo o rozměrech 250 x 250 x 220 mm. Rychlost stavby modelu dosahuje rychlosti až 30 cm³ za hod. a tloušťka jednotlivých vrstev může být 0,05 nebo 0,075 mm. Na těchto zařízeních lze dosáhnout velmi dobrého povrchu součástí. Spektrum využití je opravdu široké, od lékařských implantátů a náhrad, automobilových dílů přes vstřikovací formy až po zubní náhrady a korunky nebo součásti raketoplánů.



Obr. 1.7 SLS centrum *sPro 60 HD* (vlevo) a *SLM System DM100* (6)

Na evropském poli zaujímá jednu z nejvýznamnějších pozic německá firma EOS. Ta v současnosti provozuje tři druhy systémů nesoucích shodně označení EOSINT a rozdělených dle druhu technologie podle písmen **P** (Plastic Laser-Sintering), **M** (Metal LS) a **S** (Sand LS).

V oblasti Plastic Laser-Sintering nabízí firma hned několik přístrojů, lišících se především rychlostí stavby modelu, maximálním objemem zhotovitelných součástí, popřípadě tloušťkou zhotovované vrstvy a jinými aspekty. Pro představu EOSINT P 390 je vybaven jedním 50W CO₂ laserem a pracuje

s objekty do objemu 340 mm x 340 mm x 620 mm. Naproti tomu model EOSINT P 730 je vybaven dvěma 50W lasery a dokáže pracovat s rozměry až 700 mm x 380 mm x 580 mm.

V oblasti Metal Laser-Sinteringu zavádí firma pojem **DMLS** - Direct Metal Laser Sintering. S touto technologií pracuje přístroj EOSINT M 270 a ke stavbě modelu o velikosti až 250 mm x 250 mm x 215 mm využívá širokou škálu materiálů od bronzů, přes oceli, až po speciální kompozity. Model roste dle druhu použitého materiálu po vrstvách 0,02 až 0,1 mm, což umožňuje dodržení tvarových tolerancí v rozmezí $\pm 0,1$ mm. Výkonný 200 Ytterbium (Yb)-fibre „dual spot“ laser umožňuje dosažení jemného rozlišení detailu a díky vyšší hustotě energie je i rychlost stavby dílu vyšší v porovnání s předchozím typem zařízení EOSINT M 250, které bylo vybaveno CO2 laserem. **Ve slévárenském odvětví nachází široké pole uplatnění v oblasti výroby forem a nástrojů pro výrobu plastových, keramických či kovových výrobků (prototypové formy, malosériové formy, tvarově složité vložky, jádra s chladicími kanály optimalizovanými dle tvaru a složitosti dutiny pro rychlejší odvod tepla).** V České republice bylo zařízení EOSINT M270 instalováno poprvé v únoru 2007. [9][11]



Obr. 1.8 EOSINT M270 pracující s technologií DMLS (11)

Oblast Sand Laser-Sintering je reprezentována zařízením EOSINT S 750. Přístroj, který je vybaven podobnými nebo stejnými prvky jako předchozí představené stroje, umožňuje výrobu jader a kompletních pískových forem pro slévárství. Pomocí metody zvané **DirectCast** jsou formy či jádra vyráběny po vrstvách 0,2 mm pomocí pískových materiálů, vyvinutých speciálně pro tuto metodu. Přístroj umožňuje výrobu celků o objemu až 720 mm x 380 mm x 380 mm. Větší formy pak mohou být složeny z jednotlivých menších částí. Výborných výsledků je dosaženo u lehkých konstrukcí s použitím hliníku nebo magnesia. [11]

Materiály

Z hlediska slévárství jsou zajímavé plastové, kovové i pískové materiály. Pro přehled materiálů nabízených pro metodu SLS dobře poslouží materiálová nabídka německé firmy EOS:

V oblasti Plastic Laser-Sintering nabízí firma EOS ke svým centrům materiály na bázi polyamidu 12 nebo polystyrenu. Polyamidy jsou odolné vůči mnoha chemikáliím, jsou zdravotně nezávadné a šetrné vůči životnímu prostředí. Tyto materiály se taky výborně hodí k sycení různými prvky, například hliníkem nebo skelnými či uhlíkovými vlákny.

PA 2200 - je čistý prášek na bázi PA12. Hodí se k výrobě plně funkčních prototypů, odolných vůči mechanickému a teplotnímu namáhání.

PrimePart - čistý polyamid vhodný pro stavbu modelů, funkčních prototypů a náhradních dílů, jejichž pevnostní a elastické vlastnosti se mění v závislosti na teplotě.

PA 2210 FR - čistý polyamid, nehořlavý, s dobrými mechanickými vlastnostmi, neobsahuje halogeny.

Alumide - hliníkem sycený čistý polyamid. Vhodný pro tuhé části s kovovým vzhledem. Časté využití v automobilovém průmyslu (např. při zkouškách v aerodynamických tunelech). Součásti zhotovené z tohoto materiálu mohou být dále broušeny, leštěny nebo natírány.

CarbonMide - materiál vynikajících mechanických vlastností, vyznačující se extrémní pevností a tuhostí. Typické využití u plně funkčních prototypů.

PrimeCast 101 - speciální tvrdý polystyren nacházející využití hlavně u metody vypalitelných a vypařitelných modelů. Další využití materiál nachází při výrobě keramických skořepin. Více o těchto metodách v souvislosti s rapid prototypingem je uvedeno v druhé kapitole této práce.

Při výrobě pískových forem a jader na přístroji EOSINT se používají různorodé formovací materiály, běžně používané ve slévárnách. Jejich volba už pak záleží na konkrétním použití, geometrii, konkrétním písku a jeho zrnitosti.

Ceramics 5.2 - jedná se o fenolovou pryskyřici potaženou hliníkovým křemičitým pískem (Synthetic mullite). Materiál je vhodný ke stavbě kompletních jader a forem pro všechny slévárenské aplikace. Díky své vysoké vodní hustotě a nízké teplotní roztažnosti může být tento keramický písek použit ve slévání při vysokých teplotách.

Quartz 4.2 / Quartz 5.7 - je fenolová pryskyřice potažená křemenným pískem. Stejně jako předešlý materiál je vhodný pro všechny slévárenské aplikace. [11]

V oblasti kovových prášků nabízí firma EOS celou řadu materiálů:

DIRECT METAL 20 (DM 20) - velmi jemný multikomponentní prášek na bázi bronzu. Výsledné díly nabízí dobré mechanické vlastnosti s výborným rozlišením detailu a kvalitou povrchu. Povrch výrobku lze snadno dokončit tryskáním nebo může být velmi snadno vyleštěn. Tento materiál je ideální pro výrobu funkčních kovových prototypů, zároveň je vhodný pro výrobu prototypových či malosériových vstřikovacích forem.

DIRECT STEEL 20 (DS 20) - velmi jemný multikomponentní prášek na bázi oceli, nabízí vysokou pevnost, tvrdost, otěruvzdornost a hustotu povrchu. Rychlost výroby v porovnání s DM 20 je nižší, vzhledem k nutnosti důkladného protavení povrchu dílu. Tento materiál nachází využití zejména při výrobě vstřikovacích forem a funkčních prototypů.

NEREZOVÁ OCEL (EOS SS 17-4) - nerezová ocel ve formě jemného prášku. Složení odpovídá US klasifikaci 17-4, evropské normě 1.4542 a splňuje požadavky AMS 5643 pro Mn, Mo, Ni, Si, C, Cr a Cu. Tento typ oceli je

charakteristický vysokou korozní odolností a mechanickými parametry. Výrobky mohou být dále opracovány tryskáním, obráběním, leštěním, mohou být svařovány či pokoveny. Tento materiál je ideální pro výrobu funkčních kovových prototypů, individualizovaných dílů či náhradních dílů.

MARTENZITICKÁ OCEL 1.2709 (EOS MS 1) - martenzitická ocel ve formě jemného prášku. Složení odpovídá US klasifikaci 18 Maraging 300, evropské 1.2709 a německé X3NiCoMoTi 18-9-5. Tento typ oceli je charakteristický velmi vysokou pevností a tvrdostí povrchu. Je snadno obrobitelná a následně vytvrditelná až na 54 HRC. Materiál se běžně používá pro výrobu forem a nástrojů či vysoce zatěžovaných průmyslových součástí.

KOBALT CHROM (EOS CC MP1) - jedná se o směs jemného prášku, ze kterého lze na zařízení EOSINT M270 získat díly z Cobalt Chrome Molybden superslitiny. Tato superslitina je charakteristická excelentními mechanickými parametry (pevnost, tvrdost ...), korozní a teplotní odolností. Slitina se běžně používá pro medicínské aplikace (implantáty, zubní náhrady) a také pro výrobu vysoce tepelně zatěžovaných součástí (letecké motory).

TITAN (EOS TI 64 / TI64ELI) - Ti6AlV4 slitina ve formě jemného prášku. Pro tuto lehkou slitinu jsou charakteristické excelentní mechanické vlastnosti a korozní odolnost v kombinaci s nízkou specifickou hmotností a biokompatibilitou. Materiál se používá zejména v letectví, při výrobě závodních automobilů a v medicínských aplikacích (implantáty). [9]

Široké spektrum uplatnění získává metoda v oblasti výroby forem a nástrojů pro výrobu plastových, keramických či kovových výrobků (prototypové formy, malosériové formy, tvarově složité vložky, jádra s chladicími kanály optimalizovanými dle tvaru a složitosti dutiny pro rychlejší odvod tepla).

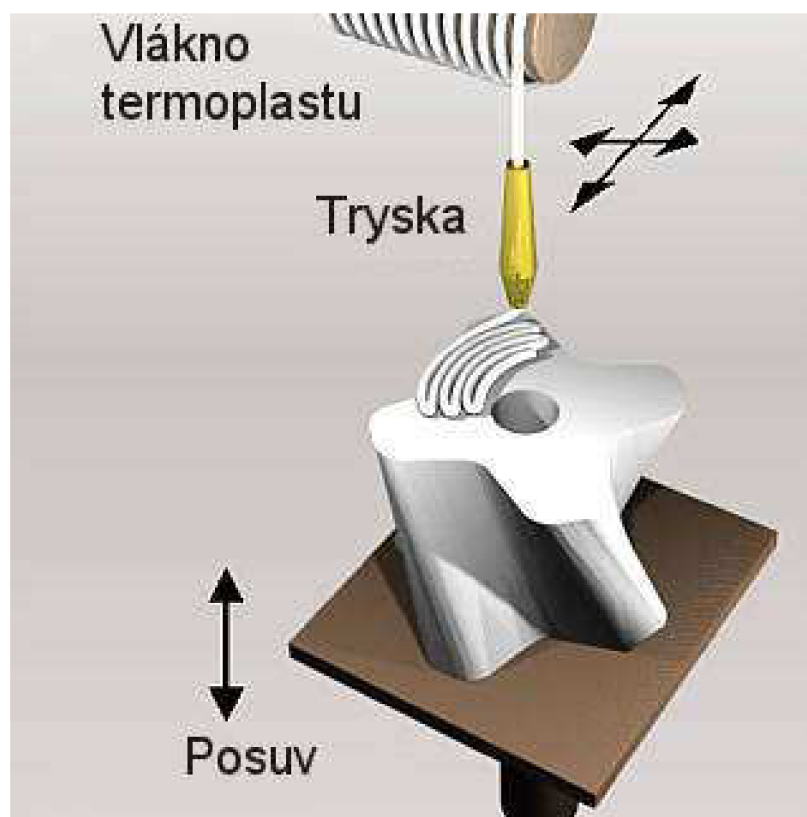
Shrnutí dané metody v bodech (výhody a nevýhody oproti jiným metodám RP):

- + vysoká pevnost modelů
- + široký rozsah použitelných materiálů
- + možnost použití jako funkčního modelu (net shape)
- + ekonomičnost výroby - nízké výrobní náklady
- + není nutná tvorba podpor
- + kratší doba zhotovení modelu
- + 98% využití nespoteřované směsi (ekonomičnost, ekologičnost)

- nelze vyrábět takové detaily jako ve stereolitografii
- potřeba mnohem vyšší vstupní energie
- možný výskyt vnitřních napětí při chladnutí součástí
- obtížné leštění u složitějších dílů
- tvorba staženin či expanzí při vystavení laseru

1.3.3 Metoda FDM (Fused Deposition Modeling)

Tato technologie se oproti předchozím liší systémem tvorby modelu. Jedná se o bezlaserovou metodu, u které je stavební materiál ve formě tenkého vlákna nanášen po vrstvách na pracovní desku pomocí vyhříváných trysek. Ty se pohybují nad pracovním prostorem v osách XY. Pohyb po ose Z u této metody zajišťuje nosná deska, která vždy po vytvoření jedné vrstvy klesne o úroveň níž. Pracovním materiálem bývají nejčastěji různé netoxické termoplasty nebo vosky. Ty jsou v tryskách zahřáty na teplotu mírně vyšší, než je jejich teplota tavení. Při styku s povrchem součásti se vlákna vzájemně spojují a vytvářejí tenkou vrstvu, která ihned tuhne. Typická tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,1 - 0,25 mm. Je zde také nutná tvorba podpor pro vnější plochy modelu a oblasti, které nejsou při tvorbě modelu po částech samonosné. To zajišťuje druhá tryska která nanáší dle potřeby podpurný materiál. Systém průtlačné hlavy se dvěma tryskami má patentovaný americká firma Stratasys jako **BASS** systém (Break Away System Support). Oba materiály se vzájemně nemísí a lze je tak po dokončení procesu snadno oddělit. Za zmínku stojí také jiný systém odstraňování podpor nazvaný **WaterWorks**. Ten pracuje s materiálem, který se za působení speciálního vodního roztoku a ultrazvuku rozpouští. To značně usnadňuje odstraňování podpor u drobných detailů a výrazně tak urychluje celou oblast postprocessingu.



Obr. 1.9 Schéma metody FDM (Fused Deposition Modeling) (13)

Metoda samotná je zajímavým kompromisem mezi přesností tvorby, rychlostí procesu a odolností modelu. Nespornou výhodou je díky absenci laserového systému a práci s netoxickými materiály možnost nasazení FDM zařízení v běžném kancelářském prostředí. Na principu FDM také pracuje většina tzv. 3D tiskáren. [3][12]

FDM zařízení:

O rozvoj technologie FDM se zasadila americká firma *Stratasys*. Ta nabízí v současnosti ke zhotovení modelů touto metodou výrobní řadu čtyřech zařízení nazvanou Fortus Systems. Jednotlivé modely se od sebe liší hlavně velikostí, přesností, se kterou dokáží zhotovit model, podporou materiálů a především cenou. Například nejnižší typ modelové řady a zároveň nejmenší přístroj FORTUS 200mc je primárně určen pro kancelářské použití. Dokáže vyrábět díly o velikosti 203 x 203 x 305mm s přesností ± 0.254 mm. Nevýhodou je možnost nasazení pouze jednoho materiálu: *ABSplus*. Naproti tomu největší zařízení FORTUS 900mc umožňuje zhotovit modely o velikosti až 914 x 610 x 914 mm s přesností až $\pm 0,0762$ mm a podporuje celou škálu použitelných materiálů.

Materiály:

V principu lze použít jakýkoli materiál, který se taví a tuhne v závislosti na teplotě. Nejčastěji se používají polyamidy, polyetyleny a nejrůznější vosky. Z materiálů, nabízených k systémům Stratasys jsou to:

ABS (akrylonitril-butadien-styren) – jedná se o odolný termoplast, který se často používá jako materiál v technologii vstřikování plastů. Je vhodný k výrobě funkčních prototypů. Firma materiál nabízí ve dvou verzích *ABS M30* a *ABS M30i*. Druhý jmenovaný splňuje normu ISO 10993 pro biomateriály a je tak vhodný pro nasazení v medicíně, farmaceutickém průmyslu či potravinářství. Dodává se v různých barevných provedeních.

PC thermoplastic (polykarbonát) – jedná se o mechanicky velmi odolný materiál vhodný pro rázové namáhání s dobrou tepelnou odolností. Rovněž na výběr ve verzi splňující bionormu ISO 10993.

PC-ABS – slučuje vlastnosti obou předešlých materiálů

K FDM metodě je nabízena ještě řada dalších materiálů jiných výrobců. Patří mezi ně například voskový materiál ICW-06 či elastomer E20 vhodný k výrobě pružných částí.

V oblasti slévárenství si metoda nachází rovněž své postavení. Využitelné jsou především voskové materiály, pomocí kterých lze vyrábět modely pro metodu vytavitelného lití. Vytavit lze ale i materiály z ABS. [3]

Shrnutí dané metody v bodech (výhody a nevýhody oproti jiným metodám RP):

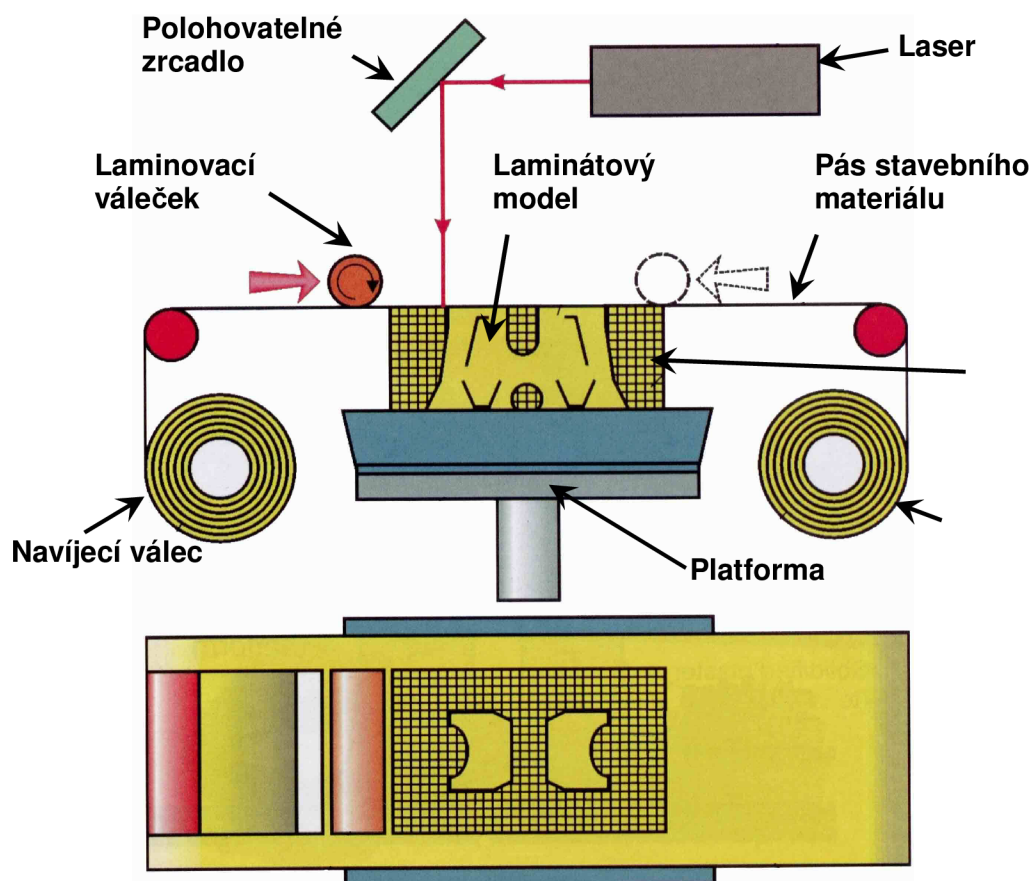
- + krátká doba zhotovení modelu (2-4 x méně než SLA)
- + široký rozsah použitelných materiálů
- + možnost použití jako funkčního modelu (net shape)
- + dobrá tepelná odolnost materiálů
- + menší tvorba expanzí než u SLA (0,75)
- + dobré mechanické vlastnosti modelů

+ použitelná ve slévárenství

- nelze vyrábět takové detaily jako ve stereolitografii
- nutná tvorba podpůrných konstrukcí (materiál k tvorbě podpor)
- menší přesnost oproti některým metodám
- náročnější povrchové úpravy
- při tvorbě více kusů ekonomicky nevýhodná
- delší čas stavby modelu

1.3.4 Laminátování – metoda LOM (Laminated object manufacturing)

Oproti jiným metodám Rapid prototyping pracuje tato metoda při stavbě modelu velmi rychle. Model se sestavuje vrstvením plastových nebo papírových fólií.



Obr. 1.10 Princip metody LOM (19)

Princip metody spočívá v nanášení jednotlivých vrstev fólie na sebe a jejich ořezáváním pomocí laseru. Materiál je podáván pomocí dvou navíjecích válců přes pracovní desku z jedné strany na druhou. Fólie je na spodní straně vybavena spojovací vrstvou a jednotlivé vrstvy jsou k sobě spojovány ohřátím a

stlačením pomocí lisovacího válce, který se pohybuje nad pracovním prostorem a je zahříván na požadovanou teplotu. Do každé jednotlivé vrstvy materiálu je vyřezáván obrys součásti pomocí laseru, který se pohybuje v souřadnicích X,Y. Poté je kolem součásti vyřezán obdelník a materiál v něm, obklopující součást slouží jako podpora. Vertikální pohyb potom vykonává pracovní deska řízená počítačem.

Na rozdíl od ostatních metod nevyplňuje laser celou plochu modelu, ale pouze obrysy v jednotlivých vrstvách. To přináší zmiňovanou časovou úsporu. Pro odstranění okolního materiálu po zhotovení modelu je ovšem v každém kroku nutné rozřezat vnější okolní geometrii na hrubší síť, která se po skončení procesu mechanicky vydroluje. Problém s odstraněním okolního materiálu může nastat v případě drobných detailů. Nevýhodou metody je rovněž velké procento nevyužitého materiálu.

Při použití papírových materiálů model svým vzhledem velmi připomíná strukturu dřeva. Může být povrchově opracován, lakován či barven nebo dokonce obráběn. K metodě v současnosti existuje několik příbuzných metod, pracujících na podobném principu (viz. kap. 1.3.7).

Přístroje a materiály:

V roce 2001 odešel z oboru zakladatel této metody, firma *Helisys*. Na její tradice navázaly firmy např. *Cubic Technology* nebo *Select Mfg. Services Inc.*

Přístroj *HELISYS 2030H* dokáže zhotovit části o velikosti až 810 x 555 x 500mm a tloušťce vrstvy okolo 0,1 mm.

Z dostupných materiálů je to **LOMPaper**, **LOMPlastic** či kompozitní **LOMComposite**. Jejich vlastnosti poměrně dobře vyplývají již z názvu. Poslední jmenovaný materiál s prvky na bázi skleněného vlákna dosahuje dobrých pevnostních parametrů. Většímu rozvoji této metody, přístrojů i materiálů brání v současnosti menší zájem ze strany firem.

LOM je další metodou, která si nachází cestu i do oboru slévárenství a to především do oblasti vytavitelných modelů. LOM modely mají oproti těm voskovým poměrně malou smrštitivost a dokáží je tak bez problémů nahradit. Nasazení jako modelů pro výrobu pískových či jiných forem je samozřejmostí.

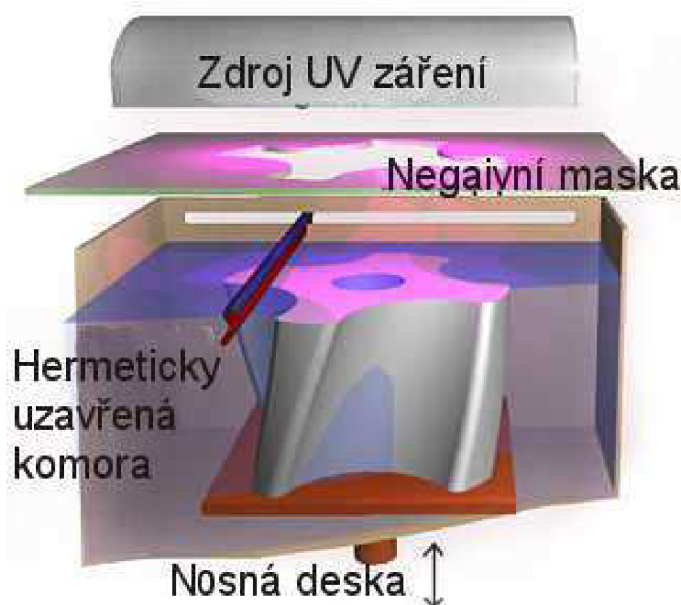
Shrnutí dané metody v bodech (výhody a nevýhody oproti jiným metodám RP):

- + krátká doba zhotovení modelu
- + není nutná tvorba podpor
- + minimální tvorba expanzí
- + energetické úspory
- + nasazení ve slévárenství

- velké procento odpadu
- složitější odstranění podpurného materiálu
- oproti některým metodám menší přesnost
- náročnější povrchové úpravy
- velký rozsah různých variací metody (žádný silný hráč)

1.3.5 Solid Ground Curing (SGC)

Technologii vyvinula izraelská firma *Cubital Ltd.* Podobně jako u stereolitografie, využívá tato metoda vlastností fotocitlivého polymeru, který se dá vytvrzovat za použití světelných paprsků, principem výroby se ale liší. Celá vrstva je tu vytvrzena naráz jedním osvětlením UV lampy přes tzv. negativní masku. Ta je nejčastěji tvořena skleněnou destičkou s vyznačeným tvarem vytvrzované vrstvy. Vytváření součásti tedy probíhá ve dvou oddělených, současně probíhajících dějích. Nejprve je vytvořena negativní maska pomocí barvy, nanesené na skleněnou destičku elektrostaticky. Rovněž je na pracovní plochu nanesena tekutá vrstva fotopolymerní pryskyřice. Nad vrstvu je následně přesunuta skleněná deska a vrstva je vystavena UV záření. Ozářená část vrstvy tvrdne a ta neozářená je odsávána vzduchem pryč. V zápětí je nahrazena tekutým voskem, který tvrdne a vytváří tak podporu pro jednotlivé vrstvy. Celá vrstva je pak následně pomocí frézky zarovnána na požadovanou tloušťku a celý proces se opakuje. Na konci je pak vosk odstraněn chemickou cestou např. pomocí kyseliny citronové. [12]



Obr. 1.11 Schéma metody SGC (Solid Ground Curing) (13)

Možnosti využití metody ve slévárenství jsou díky podobnosti použitých materiálů obdobné jako u stereolitografie. Výhodou může být lepší dosažitelná jakost povrchu a menší „schodečkovitost“ než u SLA. Metoda je vhodná i pro objemnější součásti nebo pro zhotovení více kusů najednou. Naopak výrobní proces pomocí této technologie může být velmi zdoluhavý, v řádu desítek hodin. Oproti stereolitografii také nedosahuje takové přesnosti a je finančně nákladnější.

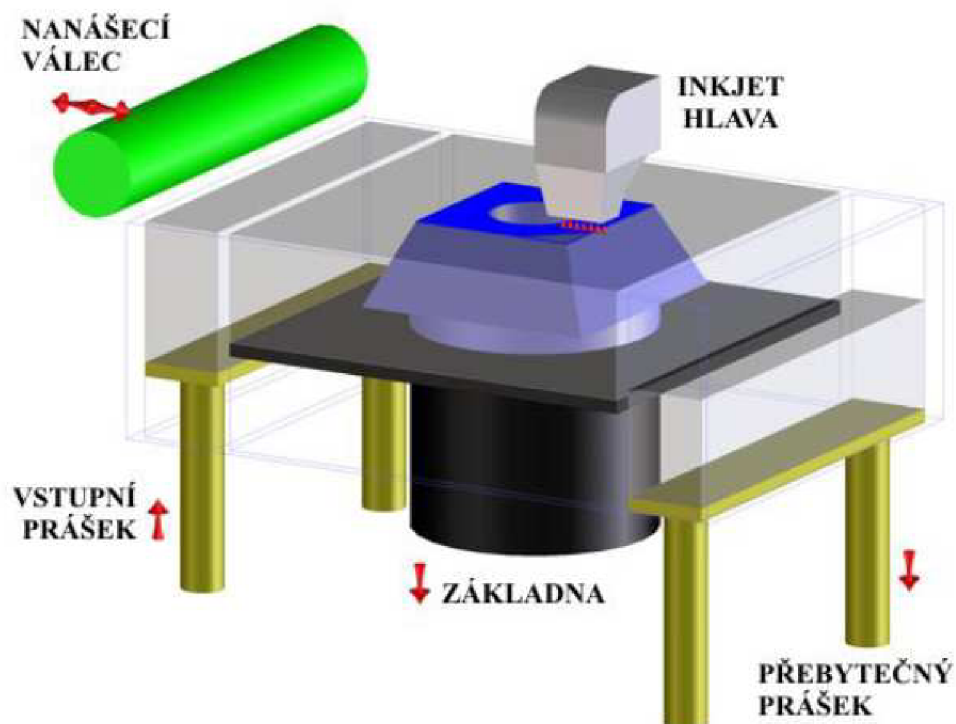
1.3.6 Ballistic Particle Manufacturing (BPM)

Tuto technologii založil Bill Masters v roce 1987. O rok později založil firmu Perception Systems, Inc., která se věnovala rozvoji tohoto systému. Firma byla později přejmenována na BPM Technology, Inc.

Základem technologie, využívající principu inkoustových tiskáren, je nástřik kapek termoplastu pomocí pracovní hlavy. Je založena na tlakovém nanášení materiálu v podobě kapek. Ty jsou vystřelovány z pracovní hlavy a po kontaktu s ostatním materiálem se vytvrzují. Pomocí jedné tiskové hlavy s pěti stupni volnosti je vytvořena celá součást. Z principu metody není třeba podpurných konstrukcí [12]

1.3.7 Three-dimensional printing (3DP)

Technologie byla vyvinuta v roce 1993 v Massachusetts Institute of Technology (MIT). Pracuje v některých ohledech na podobném principu jako SLS. K tvorbě součástí využívá různých druhů prášků, místo laseru je zde použita inkjetová hlava. Práškový materiál je na základnu nanášen v tenkých vrstvách ze zásobníku pomocí rotujícího válce. Inkjetová hlava, pohybující se v rovině XY, nanáší pojivo do daných oblastí vrstvy. Tím dochází ke spojení jednotlivých částic a vytváření celku po vrstvách. Po zhotovení je model napuštěn tvrdidlem pro zvýšení pevnosti před dalším využitím. Podobně jako u SLS není z principu funkce nutná žádná tvorba podpor.



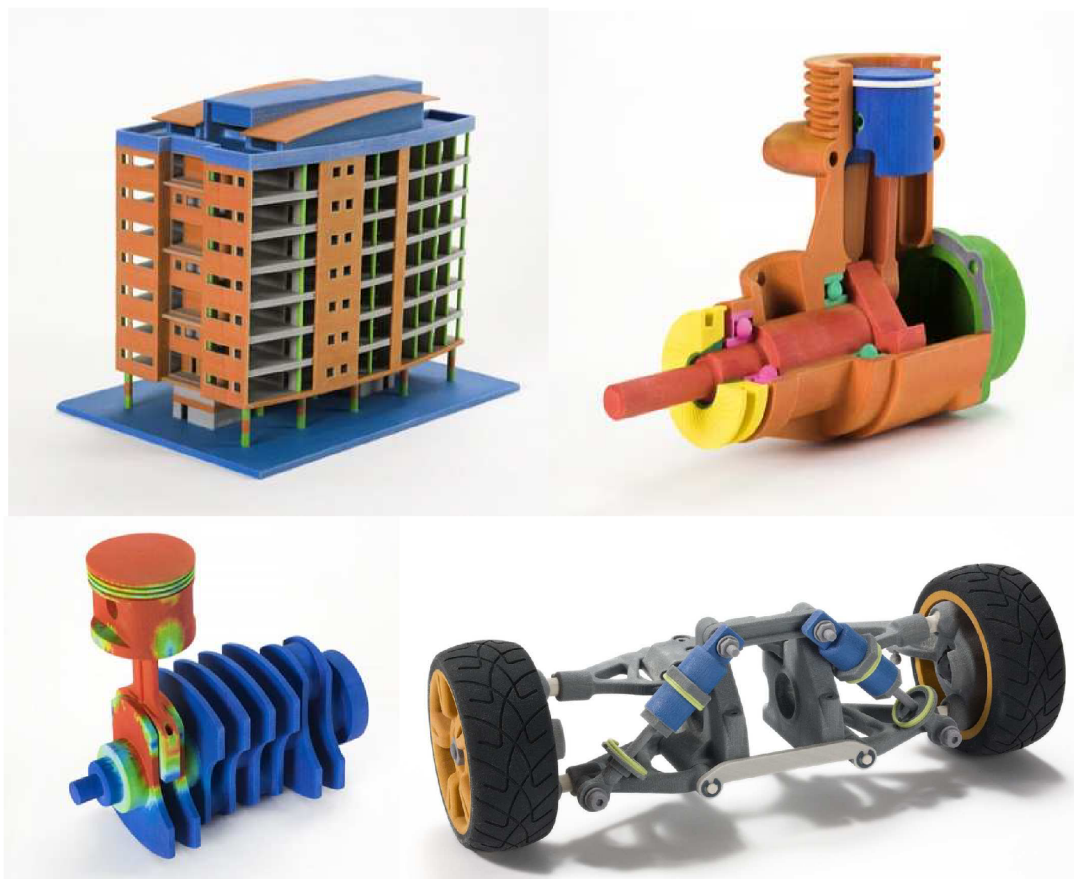
Obr. 1.12 Schéma metody 3DP (Three-dimensional printing) (3)

Metoda 3D tisku je jednou z nejrychleji se rozvíjejících metod RP vůbec. **V současnosti tvoří prodej 3D tiskáren, založených na technologii 3DP, až 80% celkového objemu RP trhu.** [15] Nahrává tomu především malá náročnost technologie bez použití průmyslových laserových systémů, což umožňuje nasazení v běžném kancelářském prostředí. Dalším, neméně důležitým faktorem, je cena zařízení. Ty v současnosti začínají už na 20 000 USD (zhruba 400 tis. CZK). Samozřejmě lze ovšem také pořídit high-end modely v řádech statisíců USD.

3D tiskárny dosahují rovněž vynikající přesnosti. Jedná se po stereolitografii o druhou nejpřesnější metodu vůbec. U high-end modelů tiskáren se přesnost pohybuje v řádech 0,1 – 0,2 %, u low-end modelů tiskáren se pak přesnost většinou pohybuje v toleranci 0,5% a vyšší.

Přístroje, materiály, využití:

Rozvoji této metody se v současnosti věnuje mnoho firem. Své zařízení nabízejí významní hráči jako *Z Corporation* či *3D Systems*, ale i řada jiných výrobců a zorientovat se v tomto segmentu trhu není nijak jednoduché. Nejpodstatnější oblastí využití zůstává stejně jako u ostatních metod tvorba prototypových součástí. Díky širokému spektru použitelných materiálů i barev zde metoda, podobně jako Selective Laser Sintering, nachází velmi široký rozsah použití. Častá je zejména výroba nejrůznějších modelů sloužících k prezentacím.



Obr. 1.13 Příklad využití technologie 3D tisku (16)

Firma ZCorporation nabízí ve svém portfoliu řadu tiskáren Zprinter. Všechny zařízení tisknou rychlostí 2-4 vrstev za minutu. Tloušťka vrstev se pohybuje mezi 0,089-0,2mm. Například Zprinter 310 Plus je nejlevnějším řešením této firmy. Umožňuje pouze monochromatický tisk v rozlišení 300 x 450 dpi. Takto vytvořený model pak může mít velikost až 203 x254 x203 mm. High-endový model Zprinter 650 potom nabízí plně barevný tisk pomocí pěti tiskových hlav včetně ryzí černé. Zhotovit s ní lze modely velikosti 254 x 381 x203 mm a rozlišením 600 x 540 dpi.

K tiskárnám je zároveň nabízena řada druhů běžných plastových materiálů. Ty speciální lze rozdělit zhruba do 3 oblastí:

Vysoce zátěžové materiály:

zp[®]131, zp[®]140(monochrome) - mohou být použity pro tvorbu odolných dílů při velmi realistickém barevném podání i součástí s velmi tenkou stěnou. Jedná se o materiály na bázi sádry, doplněné aditivou, které zajišťují požadovanou kvalitu povrchu a pevnost.

Materiály pro lití:

ZCast 501 - tento materiál může být použit především pro tvorbu pískové formy pro přesné lití, nejlépe nezelezných kovů s nízkou tavící teplotou (např. hliník). Materiál se skládá ze směsi písku, sádry a dalších přísad, důležitých pro pevnost a požadovanou kvalitu povrchu formy.

zp 14 – Modely vyrobené z tohoto materiálu mohou být napuštěny voskem a použity při vytavitelném lití. Je složen z celulózy, speciálních vláken a dalších přísad v kombinaci zajišťující maximální vstřebání vosku s minimálními zbytky při vytavení modelu.

Eleastomery:

Materiály optimalizované pro tvorbu pružných modelů. Materiál na bázi celulózy a speciálních vláken je schopen absorbovat eleastomer, který modelu dodává „gumové“ vlastnosti. [16]



Obr. 1.14 Zařízení Zprinter 650 (3DP) (16)

Díky širokému spektru použitelných práškových materiálů má metoda mnoho uplatnění také ve **slévárenství**. Univerzita v Massachusetts poskytla licenci k této technologii dalším firmám z nichž některé se věnují i přímé aplikaci ve slévárenství. Následuje krátký přehled technologií vhodných pro využití právě v tomto oboru. Podrobněji jsou technologie probrány v druhé a třetí kapitole této práce.

ProMetal 3D Printing – technologie rozvíjená firmou *Extrude Hone*, konkrétně její divizí *ProMetal* se sídlem v Irwinu v Pensylvánii. Snaží se o aplikaci výroby kovových či keramických dílů a forem. Ve spolupráci s MIT a divizí General Motors Powertrain připravil program pro výrobu forem na pěnové polystyrenové modely pro lití tvarově složitých automobilových hliníkových odlitků metodou vypařitelných modelů (lost foam). [14]

ZCast® - technologie rozvíjená firmou *Z Corporation* umožňuje tvorbu odlitků na základě forem či jader, vytvořených na 3D tiskárnách této firmy. Materiálem je *ZCast 501* uvedený již výše. Metoda je zatím vhodná pouze k odlévání nízkotavitelných neželezných kovů, jako jsou hliník, zinek či hořčík. V budoucnu se počítá s rozšířením i na železné kovy.

Direct Shell Production Casting® - technologie vytvořená americkou firmou Soligen Technologies, Inc. pro přímé zhotovení keramické skořepiny pro vytavitelné lití. S využitím speciálního programu se k digitálnímu modelu vytvoří negativní forma, která je následně zhotovena na 3D tiskárně. Následné skořepiny je možné použít v běžném slévárenství pro odlití železných i neželezných kovů a ocelí.

RealWax™ - Systém výroby voskových modelů pro vytavitelní lití na tiskárnách firmy *3D Systems* řady **PROJET™**. V kombinaci s materiálem **VisiJet® CPX200** což je vosk, použitý jako stavební materiál a **VisiJet® S200**, který tomuto materiálu tvoří podporu pro stavbu modelu, dokáže tiskárny vyprodukovat reálné voskové modely použitelné např. v klenotnictví, automobilovém průmyslu či zdravotnictví. K tvorbě odlitků se dá rovněž použít akralátový materiál **VisiJet® HR200**, dostupný v modré barvě.

Shrnutí dané metody v bodech (výhody a nevýhody oproti jiným metodám RP):

- + Nejpoužívanější technologie RP
- + nejlepší poměr cena/výkon ze všech technologií RP
- + Po stereolitografii nejpřesnější metoda
- + nenáročný proces výroby, kancelářské využití, energetické úspory
- + nasazení ve slévárenství

- proti některým jiným metodám pomalejší
- delší proces postprocesingu

1.3.8 Ostatní metody RP

Metod založených na principech popsaných v předešlých kapitolách je v současnosti nespočet. Mohou se lišit technologií stavby modelu, použitím laserového systému, tiskové hlavě a řadou jiných aspektů. Zde je stručný přehled některých dalších komerčně využívaných metod.

Model Maker 3D Plotting

Technologie pracující na principu BPM. Místo jedné tiskové hlavy má ovšem dvě. Jedna materiál nanáší a druhá ho tvaruje.

Printed Computer Tomography (PCT)

Vyvinuta společností Texas Instruments, princip podobný BPM. Vyznačuje se značnou rychlostí (1 vrstva za minutu).

Multi-Jet Modeling (MJM)

Další metoda společnosti 3D Systems. Počátek vývoje metody je datován do roku 1994. Funguje na principu nanášení vrstev termopolymeru pomocí speciální tiskové hlavy s 96 rovnoběžně uspořádanými tryskami. Poměrně rychlá metoda.

Direct Shell Production Casting (DSPC)

Jedná se o výrobu součásti z keramického prášku. Technologie je podobná SLS, keramický prášek je tu ovšem spojován za pomoci tekutého pojiva, nanášeného ink-jet tryskovou hlavou. Následně je vrstva slinována laserem. Metoda je vhodná pro výrobu keramických forem ve slévárenství.

Genesis 3D Pointer

Další technologie firmy *Stratasys, Inc.* Vývoj byl převzat od společnosti IBM v roce 1995. Jako materiál je použita polyesterová směs, která je vytlačována hlavou na příslušné místo.

Hot Plot

Technologie vyvinutá švédskou firmou *Sparx AB*. V principu je podobná technologii LOM, místo laseru zařízení pracuje se žhavenou řezací elektrodou.

Shape Melting

U této metody je roztavený kov nanášen pomocí elektrického oblouku a odlit do výsledné součásti. Použitým materiálem jsou slitiny na bázi niklu. Použití této technologie je téměř neomezeno tvarem i rozměrem součásti. [12]

2 POUŽITÍ METOD RAPID PROTOTYPING VE SLÉVÁRENSTVÍ

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.

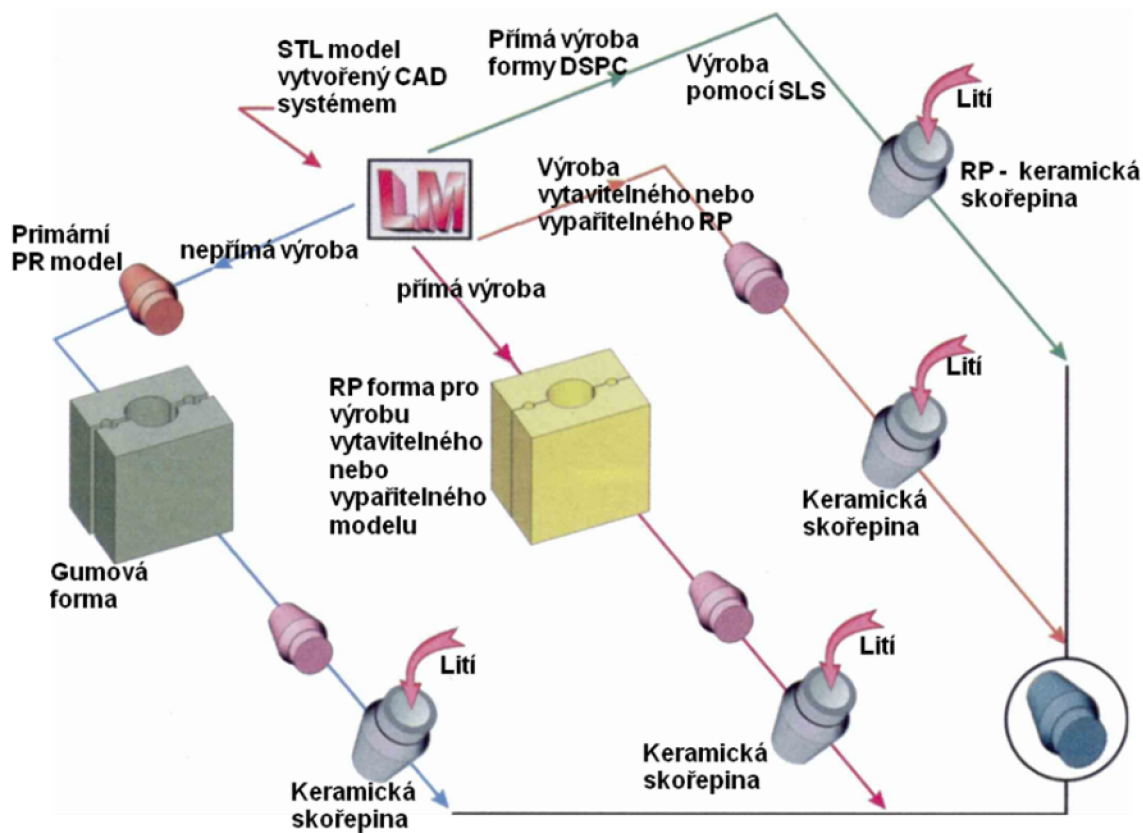
a) Nepřímá výroba forem

Spočívá ve zhotovení modelu součásti některou z metod RP, ke kterým se následně již standardními slévárenskými aplikacemi vyrábějí formy a skořepiny. Patří zde i tvorba jader, kompletních vtokových soustav nebo forem na výrobu modelů, zhotovených na RP zařízeních.

b) Přímá výroba forem

Spočívá v přímém zhotovení forem některou z metod RP. Ať už se jedná o klasické pískové či keramické formy nebo skořepiny, nebo kovové formy pro tlakové lití.

Rozdělení je dobře zachyceno na obr. 2.1, kde je v pravé větvi znázorněna přímá výroba forem na přístroji RP. V levé části schématu je poté nastíněna zprava doleva nepřímá výroba forem. Větve zachycují nepřímou výrobu forem na základě RP modelů, výrobu koncových forem na základě modelů které jsou zhotoveny v modelových formách vyrobených na zařízeních RP a konečně výrobu forem s mezikrokem, kdy je z RP modelu vytvořena forma pro výrobu dalších modelů.



Obr. 2.1 Voskový stromeček složený z jednotlivých částí (19)

2.1 Nepřímá výroba forem

K rozvoji této oblasti v souvislosti s Rapid Prototyping dochází již od samotného vzniku metod rychlého prototypování. Již v počátcích stereolitografie, kdy se tato metoda potýkala s nedostatkem vhodných materiálů a výroba funkčních modelů byla ještě v oblasti teorie, nacházely stereolitografické modely využití při tvorbě součástí ze skutečných materiálů pomocí některé ze známých slévárenských metod.

Principem je zhotovení master modelu (originálního modelu) součástí 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 metody spadají do oblasti přesného lití. 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.

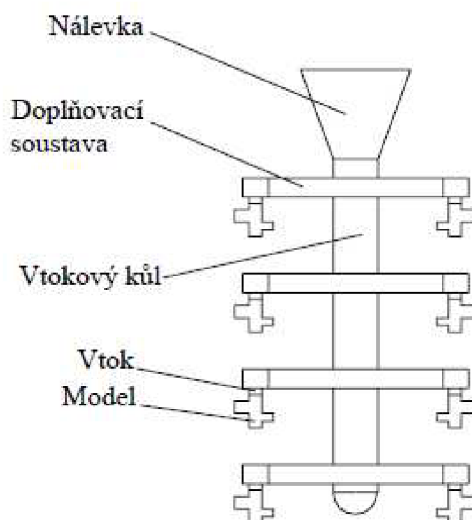
2.1.1 Metoda vytavitelného modelu (Lost Wax)

Metoda vytavitelného modelu je jednou ze základních slévárenských technologií přesného lití. Její počátky sahají až do doby 2000 let před našim 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.

Princip metody:

Princip metody spočívá v použití modelů ze snadno tavitelných materiálů. Ty se nejčastěji zhotovují vstřikováním roztavených voskových směsí do forem zhotovených některým z tradičních strojírenských postupů, tedy obráběním, zaléváním orig. kovového modelu do nízkotavitelných slitin, plastů, silikonu, sádry aj., nebo galvanoplastikou a metalizací. Při aplikaci rapid prototypingu ale nahrazuje tuto tradiční výrobu zhotovení modelů či forem na nejrůznější RP zařízeních.

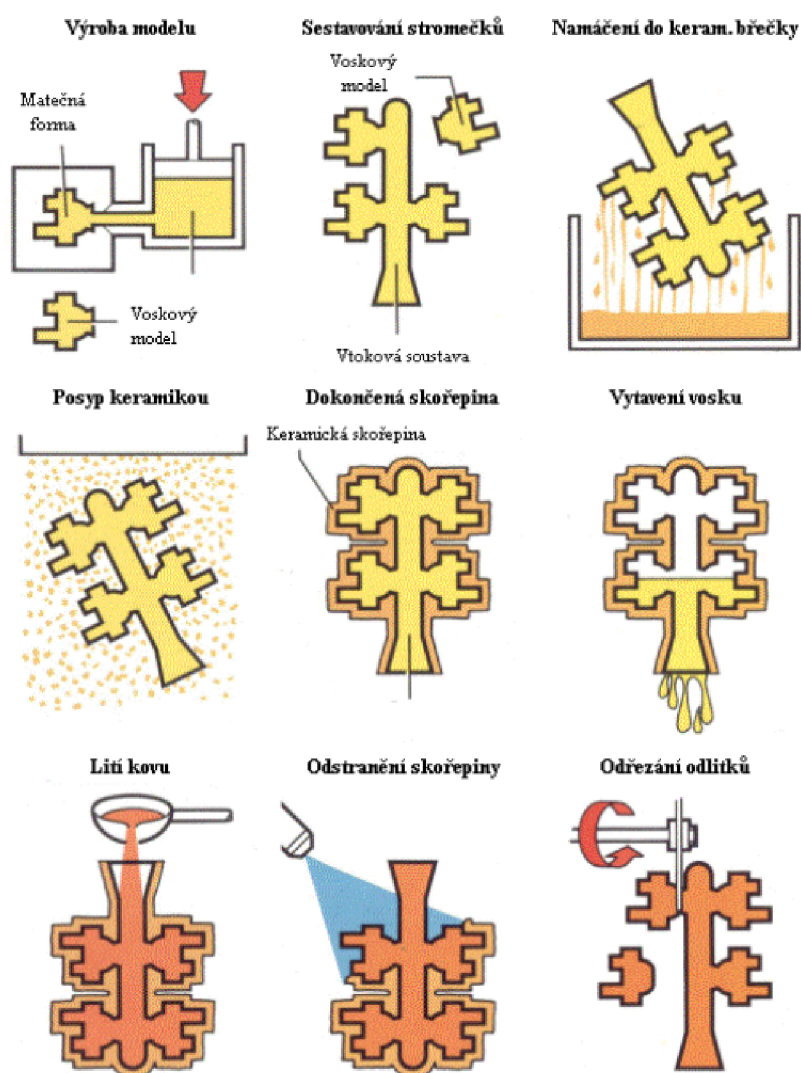
K hotovým modelům se poté připojuje voskový model vtokové soustavy, případně nálitků. I ty mohou být teoreticky vyrobeny některou z metod rychlého prototypování, v praxi se ale toto příliš nepoužívá, protože by to zbytečně celý proces prodražilo. U drobnějších modelů se tvoří tzv. „stromečky“ lepením těchto modelů ke společné vtokové soustavě tak, aby později při vytavování mohl vosk snadno vytéci z formy. [18]



Obr. 2.2 Voskový stromeček složený z jednotlivých částí (18)

Po sestavení modelu a vtokové soustavy přichází samotná výroba formy - skořepiny. Ta se zhotovuje opakovaným namáčením voskové sestavy v obalové hmotě a následným posypem žáruvzdorným materiálem vhodné zrnitosti. Namáčení by mělo probíhat tak, aby obalová hmota rovnoměrně pokryla všechny části modelové sestavy a aby se v koutech, drážkách a nejrůznějších záhybech nevytvořily vzduchové polštáře, znehodnocující celý výrobek. Následuje posyp žáruvzdorným materiálem většinou ve speciálních zařízeních, čeřících materiál vzduchem. Cyklus se opakuje několikrát kvůli vytvoření potřebné tloušťky a mezi jednotlivými cykly probíhá vždy sušení aktuální vrstvy za stálých podmínek v nastaveném prostředí. Na první dva obaly, které jsou rozhodující pro kvalitu povrchu výsledného odlitku, se používá jemnější posypový materiál, většinou se zrnitostí 0,1 - 0,25 mm, na další vrstvy potom 0,25 - 0,5 mm. Počet vrstev získané skořepiny se pohybuje mezi pěti a patnácti, počet záleží hlavně na velikosti odlitku. Před samotným litím následuje ještě vypálení skořepiny při teplotách 800 – 1100 °C, nejčastěji v odporových či plynových pecích za účelem odstranění možných zbytků voskových materiálů, celkového vytvrzení skořepiny a rovněž předejde formě před litím. Po lití následuje většinou mechanické odstranění keramické skořepiny z odlitku. Nejčastěji se využívá vibračního oklepávání. Novým trendem při odstraňování formy je potom tryskání vysokotlakým paprskem. V dalších dokončovacích operacích se potom odřezávají odlitky od vtokové soustavy, odstraňují se zbytky keramiky pomocí chemických roztoků nebo nejrůznějších abrazivních metod, odstraňují se vtoky z odlitků, odlitky se brousí a dokončují. Postup výroby odlitků metodou vytavitelného modelu je dobře znázorněn na obr. 2.3

Typickými oblastmi kde se využívají odlitky zhotovené touto metodou jsou letectví, automobilový průmysl, zbrojní průmysl, medicína, energetika, příslušenství lodí, části jízdních kol, hudební nástroje, golfové hole atd.



Obr. 2.3 Princip metody výtavitelného modelu (19)

Aplikace na metody RP:

Jak už bylo řečeno, výroba modelů, jader nebo forem pro jejich zhotovení může probíhat za použití některé z metod Rapid Prototyping.

Nejčastější je vytvoření modelu některou z technologií RP, který je 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 výtavitelný model, v některých případech dokonce s kompletními vtokovými soustavami.

Ve stereolitografii je to například metoda zvaná QuickCast, vyvinutá firmou 3D Systems. Ta nabízí ve své produktové řadě materiál s označením **Accura® Amethyst™**, který se dá sice při metodě výtavitelného lití použít, ovšem nebyl primárně pro toto odvětví vyvinut a je tak pouze jakýmsi kompromisem. Poměrně dlouho nebyly k dispozici vhodné materiály použitelné ke stavbě výtavitelných modelů pomocí SLA systémů. Proto se na trhu SLA materiálů postupně začaly objevovat materiály, primárně určené pro tuto oblast přesného lití. Např. v roce

2005 sestavila společnost *Solid Concepts* tým předních odborníků a ve spolupráci s nimi přišla s materiálem **SC 1000**, vyvinutým speciálně pro tuto oblast slévárenství. S tímto materiálem se dají vyrábět poloduté, pevné, uzavřené a plně vytavitelné modely, které jsou o 10 – 35% lehčí, než ostatní modely z různých polymerů nebo vytvořené jinými druhy metod. Nižší hmotnost související s hustotou má příznivý účinek na lepší vytavitelnost modelů a menší roztažnost modelu ve skořepině formy. Vývoj zohlednil i nejnižší možnou dosažitelnou cenu takového materiálu. [20]

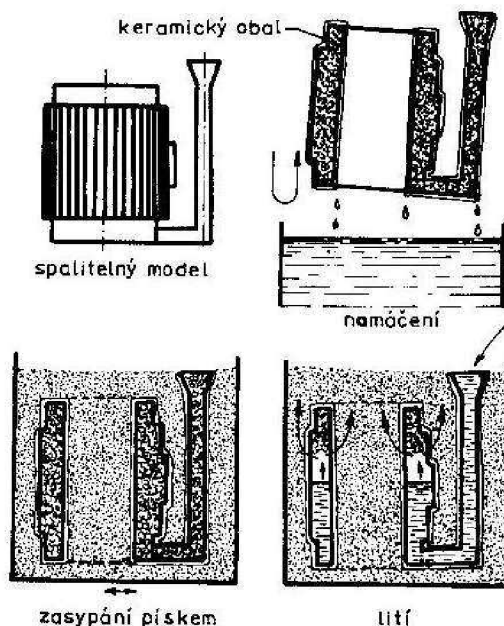
Další možností, jak zhotovit vytavitelný model, do jisté míry kombinující metodu vytavitelného a vypařitelného modelu, je nasazení metody **CastForm™** kterou prezentuje rovněž firma 3D Systems, tentokrát ovšem na bázi Selective Laser Sintering. Model je zhotoven z materiálu CastForm PS, který se vyznačuje 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%).

Další využitelnou metodou je **FDM** (Fused Deposition Modeling). Vytavitelné modely se dají zhotovit jak z vosků tak například z plastového materiálu ABS. Srovnání použití obou materiálů je popsáno v 3. kapitole této práce.

Také technologie **3D tisku** (3DP) poskytuje několik metod k vytvoření vytavitelného modelu.

2.1.2 Metoda vypařitelného modelu (Lost Foam)

Principem této metody je sestavení vypařitelného modelu z pěnových plastů, nejčastěji z pěnového polystyrenu. Při kusové výrobě se model často vyřeže, případně slepí z více dílů, v sériové výrobě se modely vyrábějí ve speciálních formách. K modelu je nutno upevnit i vtokovou soustavu ze stejného materiálu. Často se spalitelné modely formují přímo do písku klasickým způsobem, novější metodou je nanesení vrstvy žáruvzdorného nátěru, po jehož zaschnutí se model zasype v rámu suchým pískem. Pro dokonalé vyplnění rámu pískem se často používají vybrace. Poté dochází k samotnému lití žhavého kovu, při kterém se plastový model vypařuje před postupující taveninou. Uvolněné plyny při spalování unikají díky dobré prodyšnosti pískové výplně.



Obr. 2.4 Princip metody vypořádkelného modelu

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 na metody RP:

Vypalitelný polystyrenový 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, podrobněji zmíněných v první kapitole této práce. 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. (11)

Další možností je použití metody **CastForm™** americké firmy 3D Systems, která již byla zmíněna v kapitole 2.1.1. Zde se postupuje obdobným způsobem, popsáním v předchozím odstavci. Metoda je vhodná pro odlévání nejrůznějších kovů, jako je např. titan. Dobrých výsledků se dosahuje také s použitím nízkotavitelných kovů jako je hliník, hořčík nebo zinek. [6]

Typickým příkladem využití metody ve slévárenství může být například zhotovení převodkové skříňe (obr. 2.5)



Obr. 2.5 Převodovková skříň (11)

2.1.3 Metoda vypařitelného modelu (Replicast)

Metoda velmi podobná předchozí technologii vypařitelného modelu - Lost Foam. Model včetně licí soustavy je vytvořen z polystyrenu, v našem případě pomocí RP metody SLS – Plastic. Podle modelu je poté zhotovena keramická forma. Metoda ale oproti té předchozí eliminuje jednu velmi podstatnou nevýhodu: Podrobným zkoumáním metalurgických pochodů po mnoho let bylo prokázáno že s výjimkou žáruvzdorných slitin, uhlík unikající z polystyrenu při vypalování žhavým kovem, může při nevhodném nastavení procesu lití znehodnocovat výslednou strukturu odlitku, dost často i v oblastech, které jsou důležité z hlediska zachování původních mechanických vlastností. Dodržením vhodného technologického postupu lze tyto rizika minimalizovat, přesto se však lze těmto problémům úplně vyhnout. [21]

Vznik polystyrenového modelu zajišťuje některá z výše uvedených metod (Primecast, CastForm) a může být vytvořen i lepením z jednotlivých částí. Dle modelu se poté zhotovuje keramická forma máčením v keramické lázni. Při vypalování keramiky je spálen i polystyrenový model a vzniká keramická skořepina je připravená k následnému lití nejrůznějších kovů. Díky tomu, že polystyren je odstraněn ještě před samotným litím, může mít model hustší strukturu. To má pozitivní vliv na povrch konečného odlitku. [21]

Další výhodou, tentokrát oproti vytavitelným formám, je absence nutnosti predehřování forem před litím. Metoda navíc povoluje vytvářet těžší a objemnější odlitky s hmotnostmi v řádech několika set kilogramů. Naproti tomu ale keramické formy povolují vytvářet i odlitky s tloušťkou stěny až 2 mm. Na

obrázku 2.6 je zachycen 228 kg vážící chránič trysek zhotovený metodou Replicast.



Obr. 2.6 Součást zhotovená pomocí keramické formy (228kg) (21)

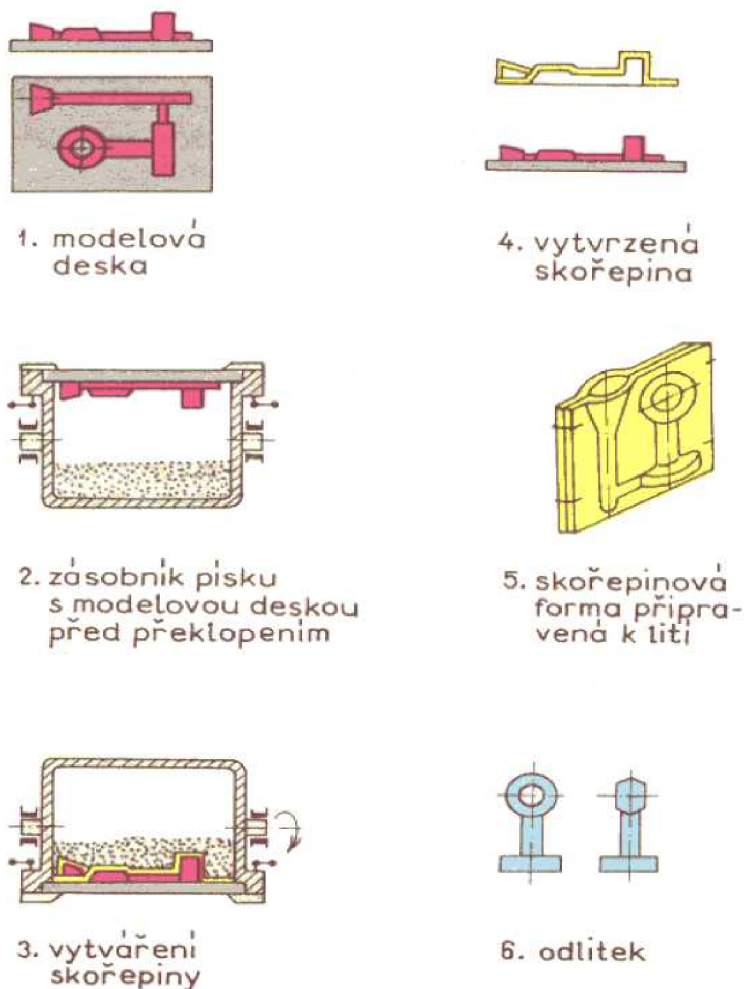
Oblast přesného lití, kam výše popsané metody vytavitelného i vypařitelného modelu patří, je oblastí slévárenství, kde v současnosti rychlé prototypování nachází největší uplatnění. Metody umožňují vytvářet tvarově velmi složité součásti s takovou přesností, že u části funkčních ploch je dosaženo dostačující rozměrové tolerance a drsnosti povrchu a není třeba žádných dokončovacích operací. U ostatních funkčních ploch jsou pak přídatky na obrábění velmi malé v porovnání s ostatními metodami lití, což přináší další úsporu nákladů.

2.1.4 Další způsoby využití RP při nepřímé výrobě forem

Lití do skořepinových forem

Jedná se o technologii, která se dá zařadit mezi způsoby nepřímé výroby forem. Výroba skořepin probíhá tak, že se kovová modelová deska s kovovým modelem ohřeje na teplotu mezi 150 až 290°C, postříká se emulzí zabraňující přilepení formovací směsi (silikonový olej) a připevní se k nádobě se směsí písku a fenolformaldehydové pryskyřice (pryskyřice v poměru k písku 5 až 10%). Poté se zásobník překlápí o 180° a následuje výdrž po dobu 8 – 20s, kdy dojde k natavení pryskyřice. Po otočení zpět odpadne nenatavená směs zpátky do nádoby. V dalších krocích se deska spolu se skořepinou vloží na 60 až 180 sekund vytvrdit do pece při teplotě kolem 450°C. Po vytvrzení se skořepina z modelu sejme a klasicky zaformuje.

Aplikace na rapid prototyping spočívá ve zhotovení kovového modelu některou z metod RP. Může se jednat o metody Metal Laser Sinteringu (viz. kap. 1.3.2) či obdobné technologie 3D tisku, u které existuje řada metod pracujících s kovovými materiály, např. ProMetal 3D Printing či ZCast® (viz. kap. 1.3.7)



Obr. 2.7 Princip lití do skořepinových forem

Stejně tak dobře, jako se dají pomocí RP metod vytvořit voskové či polystyrenové modely, dají se vytvořit pomocí stejné technologie i formy, sloužící právě k výrobě těchto modelů. Jednou z metod je **ProMetal 3D Printing**, která se dá využít k výrobě polystyrénových modelů na principu 3DP. Jedná se o technologii vyvíjenou firmou *Extrude Hone*, konkrétně její divizí *ProMetal*, která se zaměřuje na výrobu kovových součástí metodou 3D tisku. Ve spolupráci s *Massachusetts Institute of Technology* a divizí *General Motors Powertrain* založili **Advanced Technology Program** jehož principem je výroba forem, použitelných pro výrobu polystyrénových modelů při lití tvarově složitých hliníkových odlitků metodou vypařitelného modelu (Lost Foam). Na vývoji metody rovněž spolupracoval americký Úřad námořního výzkumu ministerstva obrany, který metodu

podporoval kvůli možnosti rychlé a ekonomické výroby kritických náhradních dílů pro zbraňové systémy. Jde o nevyráběné díly, pro něž ale existují konstrukční podklady.

Technologie je založena na 3D tisku součástí z ultrajemných kovových, keramických, cermentových a kompozitních prášků o středním průměru zrna pod 10 μm či submikronových prášků se speciálními pojivy. Součástí technologie je po zhotovení forem jejich infiltrace kovem pro dosažení vysoké pevnosti a téměř 100% hustoty. Při následném tepelném zpracování pak dochází k vyhoření pojiva a slnutí kovových prášků na porézní strukturu, která se opět zpevňuje infiltrací kovu. Technologie zkracuje výrobu forem a náklady na jejich výrobu o 50%. [14]

Stejným způsobem by se dalo dosáhnout výroby forem pomocí metody Direct Metal Laser Sintering německé společnosti EOS, podrobněji popsány v kapitole 1.3.2 ale i jiných RP zařízení, pracujících s kovovými materiály.

2.2 *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.

2.2.1 Přímá výroba pískových forem a skořepin

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.



Obr. 2.8 příklad výrobku zhotoveného metodou DirectCast (11)

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*. [17]



Obr. 2.9 příklad výrobku zhotoveného metodou ZCast (16)

2.2.2 Přímá výroba keramických forem a skořepin

Direct Shell Production Casting (DSPC)

Jedná se 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.



Obr. 2.10 forma zhotovená pomocí DSPC a příklad výrobku (22)

Metoda se ovšem neomezuje pouze na keramický materiál. Stejně tak lze použít prášky na bázi karbidů křemíku, oxidu hliníku, zirkonu, křemenů apod. Pomocí technologie lze zhotovit velmi tvarově složitě formy.[22]

3 JEDNOTLIVÉ METODY VE SLÉVÁRENSTVÍ

Univerzální použití metod Rapid Prototyping ve slévárenství představuje výroba modelů (popřípadě jader a vtokových soustav) a jejich následné zaformování při výrobě klasických pískových forem. K tomu lze využít prakticky všech metod rychlého prototypování uváděných i neuváděných v této práci. Dalším poměrně širokým využitím je na základě RP modelu zhotovení forem pro výrobu vytavitelných modelů. V této oblasti je hojně využívána výroba silikonových forem, které díky své pružnosti při vyjímání modelu umožňují vyrábět i tvarově složitější součásti s negativními úkosy, které by z forem ze standardních materiálů vyjmout nešly. Všechny tyto aplikace jsou univerzální pro drtivou většinu metod a v následujícím přehledu jsou již zmiňovány pouze okrajově. Kromě toho ale existuje řada metod, ve kterých slévárenství nachází ještě širší uplatnění. V následujícím textu jsou shrnuty poznatky z předešlých dvou kapitol:

Stereolitografie

Metoda stereolitografie má ve slévárenství velmi široký rozsah použití. Může tvořit vynikající přemostění mezi prototypovou a sériovou výrobou a v obou oblastech nachází využití. Jednou z nejvíce známých metod je metoda **QuickCast**, vytvořená a rozvíjená firmou 3D systems, průkopníkem v oboru RP. Metoda je velmi podobná standardní slévárenské aplikaci vytavitelného modelu při výrobě kovových dílů. Místo voskového modelu je zde však zaformován model stereolitografický. To poskytuje příležitost k tvorbě složitých a tvarově komplikovaných součástí v relativně krátkém čase. Při kusové výrobě je pak na základě modelu vytvořena keramická skořepina a při její vytvrzování SL model jednoduše vyteče.

Pro sériovou výrobu se pak zavádí alternativa ve formě vakuového odlévání vosku do silikonové formy. SL model je zde zaformován do dvousložkového silikonu. Po vytvrzení silikonu a vyjmutí modelu vzniká dutina, do které je možno vakuovým litím dodávat zahřátý vosk a vyrábět tak voskové modely použitelné opět při metodě vytavitelného modelu.

Díky přesnosti, s jakou lze v současnosti vytvářet SL modely nachází metoda využití i v oblasti medicíny, kde jsou opět obdobným systémem vyráběny kolení či kyčelní náhrady. Zde se používá formování do keramické směsi a následně je odlita kovová náhrada, nejčastěji z titanových slitin. V této oblasti zažívá metoda v posledních letech velký rozvoj a počítá se do budoucna s jejím rozšířením na výrobu širšího spektra nejrůznějších kostních tkání.

Dalším využitím stereolitografie je při výrobě modelů vstřikováním do pevných forem. Nejjednodušším způsobem je výroba dutin, do kterých se vstřikuje tekutý kov přímo. Na SL přístroji je vyrobena negativní skořepina modelu, která je spolu se systémem chlazení vložena do rámu a zalita speciální pryskyřicí, která má dobrou tepelnou vodivost pro rychlé tuhnutí odlitků. Po vytvrzení je možné do

dutiny vstříkovat vosk a vyrábět tak voskové modely určené k dalšímu formování. Nevýhodou je ale nutnost opatrného výrobního postupu a celkově jemnějšího pracovního prostředí.

Alternativu k této technologii pak tvoří metoda, využívající vstřikování vosku do pevných epoxidových forem. Ty jsou vyráběny na základě SL master modelu, který je rozdělen podle dělicí roviny. Obě poloviny se pak zalijí speciální směsí pryskyřice a kovového plniva, které hraje velmi důležitou roli při zlepšení mechanických a tepelných vlastností formy. Po vytvrzení pryskyřice a vyjmutí modelů je forma připravena k použití na ručních (kusová produkce) či automatických vstřikolisech. Metodu je možné využít i při výrobě jaderníku a následné výrobě jader určených k přímému formování do písku. [23]

Samozřejmě je využití SL modelů při tradičním pískovém formování či výrobě forem pro odstředivé lití.

Selective Laser Sintering

Jedná se o metodu s pravděpodobně nejširším záběrem ve slévárenství. V oboru Plastic-Laser-Sintering je z tohoto hlediska podstatný materiál PrimeCast 101. S využitím tohoto materiálu mohou být zhotovovány na SLS přístrojích polystyrénové modely, s jejichž pomocí se vyrábějí keramické formy metodou vypařitelného modelu.

Metoda nachází rovněž využití při nepřímé výrobě forem pomocí technologie lití do skořepinových forem. Model zhotovený pomocí Metal-Laser-Sinteringu je zde použit k výrobě skořepinových forem (viz. kap. 2.1.4). Nabídka použitelných kovových materiálů je poměrně široká (viz. kap. 1.3.2).

Přímá výroba forem v SLS je možná např. díky zařízení EOSINT S750. To pracuje s metodou zvanou **DirectCast**, sloužící k výrobě pískových forem a jader. Jako materiálu je použito speciálního pískového materiálu Ceramics 5.2, který je díky vysokému vodnímu obsahu a nízké teplotní roztažnosti vhodný i pro slévání za vysokých teplot.

Výrobu keramických forem a skořepin zajišťuje proces známý jako **Direct Shell Production Casting (DSPC)**. S jeho pomocí lze vytvářet na RP zařízeních keramické formy, vhodné pro přímé lití nebo zaformování. Proces dokáže pracovat s více druhy materiálů (viz. kap. 2.2.2)

Three Dimensional Printing

3DP je technologií, pracující na podobném principu stavby modelu jako SLS. A její využití ve slévárenství je obdobné. **ProMetal 3D Printing** je technologie založená na výrobě kovových forem, použitelných pro zhotovení polystyrénových modelů u metody Lost Foam.

ZCast® je technologie pro výrobu pískových forem a skořepin. Vhodná zatím spíše k lití nízkotavitelných neželezných kovů.

Direct Shell Production Casting® - vícekrát zmíněná technologie pro výrobu forem z keramického ale i jiného materiálu.

RealWax™ - pomocí technologie lze zhotovovat kompletní voskové modely pro metody vytavitelného lití.

Fused Deposition Modeling

I metoda FDM umožňuje přímou výrobu voskových modelů pro vytavitelné lití. Jako materiálu se dá například využít vosk ICW-06. Stejně tak lze ale použít i

plastového materiálu. V porovnání obou materiálů lze pro toto využití na obou stranách nalézt řadu výhod i nevýhod.

FDM vosky:

- + nejsou nutné žádné změny v tradičním slévárenském procesu
- + většina sléváren preferuje právě tento materiál

- křehkost voskových modelů
- bod tání vosku již od 77°C (dosažitelné p římým slunečním svitem)
- s oběma body související větší náklady na transport takových modelů

ABS

- + možnost zhotovení tenkostěnných částí
- + lepší povrchová kvalita ABS modelů a snadnější povrchové zpracování
- + snadnější a levnější převoz

- minimální zkušenosti sléváren s tímto materiálem
- nutná úprava technologického procesu

V oblasti vytavitelných modelů lze použít také metodu LOM (**Laminated Object Manufacturing**). Zhotovené modely mají poměrně malou smrštitivost a dobrou vytavitelnost.

4 ZÁVĚR

Tato práce zpracovává přehled nejdůležitějších technologií Rapid Prototyping. Ve své první části se věnuje jednotlivým metodám obecně, se zvláštním důrazem na metody, použitelné ve slévárenství, kterým je věnováno podstatně více prostoru. Druhou část tvoří přehled jednotlivých slévárenských technologií s aplikací metod rychlého prototypování. Třetí část tvoří velmi stručný přehled obou kapitol, zaměřený na konkrétní RP technologie pouze z pohledu slévárenství.

Význam rychlého zhotovování prototypů je zřejmý již z názvu technologie. Časový úsek, ve kterém jsou RP technologie schopny na základě digitálních dat modelu zhotovit reálnou součást, je hlavním hnacím motorem pro rozvoj této oblasti. Rychlý vývoj a nasazení výrobků na trh mohou firmy v konkurenčním boji nesporně zvýhodnit. Druhým, neméně důležitým požadavkem je pak úspora nákladů při výrobě. Výhody procesu jednoznačně rostou s tvarovou komplexností dílů – čím je geometrie výrobku složitější co do tvaru a četnosti výskytu detailních prvků, tím jsou technologie RP ekonomicky efektivnější.

Nejjistější pozici na trhu má dnes metoda založená na 3D tisku, které patří podle průzkumů až 80% RP trhu. Svou pozici si vydobyla převážně díky velmi dobrému poměru cena/výkon zhotovených součástí a je v současnosti nejrychleji se rozvíjející metodou vůbec. Podle některých odhadů by dokonce dostupnost technologií, založených na 3DP, měla růst na tolik, že cena koncových přístrojů pracujících na principu 3D tisku by se mohla během pár let přiblížit k hranici 1000 dolarů. V takových cenových hladinách by se pak přístroj zařadil po bok běžných domácích spotřebičů. Otázkou u takového využití ovšem zůstává, zda by se s klesající cenou dařilo vylepšovat i kvalitu a přesnost takových zařízení, která u současných low-endových 3D tiskáren zdaleka není na uspokojící úrovni.

Ve slévárenství je trend nasazení RP metod v současnosti zcela jasný. Nejčastější aplikací jsou metody přesného lití. Zhotovení vytavitelných modelů pro výrobu skořepin dnes zvládá velký počet RP technologií. Metody, založené na práškových materiálech pak velmi často umožňují přímou výrobu forem bez nutnosti existence reálných modelů. Obecně pak platí, že nejúspěšnější RP technologie v oboru slévárenství jsou ty, které nevyžadují velké technologické zásahy do slévárenských procesů a vybavení sléváren.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BEAMAN, JOSEPH J.. *Rapid Prototyping in Europe and Japan : HISTORICAL PERSPECTIVE - Technology* [online]. 1997 [cit. 2008-03-16]. Dostupný z WWW: <http://www.wtec.org/loyola/rp/03_01.htm>.
2. Castle Island Co.. *Rapid Prototyping Patent Museum* [online]. c2006 [cit. 2008-03-16]. Angličtina. Dostupný z WWW: <http://home.att.net/~rppat/museum/mus_2.htm>.
3. ING. DRÁPELA, Miloslav. *Virtuální universita VUT v Brně : Rapid Prototyping* [online]. 2007 , 16.4.2007 [cit. 2008-04-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.vu.vutbr.cz/digidesign/Moduly/Forms/AllItems.aspx>>.
4. Princeton University, Ceramic Materials Laboratory. *Ceramic/polymer Composite Materials through Stereolithography* [online]. c2001 [cit. 2009-04-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.princeton.edu/~cml/html/research/stereolithography.html>>.
5. *Rapid Prototyping technology as used on the Bombe Rebuild Project* [online]. 1997-2002 , 2002 [cit. 2009-04-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.jharper.demon.co.uk/rptc01.htm>>.
6. *3D Systems* [online]. 1997-2009 [cit. 2009-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.3dsystems.com/>>.
7. Tisk prostorových modelů. *MMSpektrum* [online]. 2004 [cit. 2009-05-06].
8. ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění 9. díl. *MMSpektrum* [online]. 2008, č. 11 [cit. 2009-05-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-9-dil>>.
9. Jak vyrobit plně funkční kovové díly přímo z 3D CAD dat. *Technický týdeník* [online]. 2008, č. 2 [cit. 2009-05-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=3698&mark=>>>.
10. Laser Micro Sintering a Versatile Instrument for the Generation of Microparts. *LTJ*. 2007, no. 1, s. 26-31. Dostupný z WWW: <http://www.wiley-vch.de/berlin/journals/ltj/07-01/LTJ0701_S26_S31.pdf>.
11. EOS GmbH. *EOS GmbH - Electro Optical Systems* [online]. 2009 [cit. 2009-05-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.eos.info/en/home.html>>.

12. ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonenční metody obrábění 10. díl. *MMspektrum* [online]. 2008, č. 12 [cit. 2009-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenčni-metody-obrabeni-10-dil>>.
13. LENU, Torben. *Design inSite* [online]. c1996-2004 [cit. 2009-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.designinsite.dk/htmlsider/inspproc.htm>>.
14. Rapid Manufacturing technologií ProMetal. *MMspektrum* [online]. 2003, č. 7 [cit. 2009-05-18], s. 42. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/rapid-manufacturing-technologie-prometal>>.
15. KHUDHUR, Patrik. Je 3D tisk další velkou věcí?. *CIO Business World* [online]. 2009 [cit. 2009-05-20]. Dostupný z WWW: <<http://businessworld.cz/rady-nazory-zkusenosti/Je-3D-tisk-dalsi-velkou-veci-4440>>.
16. Protocom s.r.o.. *3D tisk, 3D tiskárny* [online]. c2008 [cit. 2009-05-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.protocom.cz/>>
17. *Zcast™ Direct Metal Casting*. [s.l.] : [s.n.], 2003. 14 s.
18. HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model*. [s.l.] : [s.n.], [2007?]. 30 s. Dostupný z WWW: <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>.
19. CHARVÁT, Ondřej, HORÁČEK, Milan. *Možnosti aplikace metod RP s použitím technologie vytavitelného modelu*. [s.l.] : [s.n.], 2007. 47 s.
20. Solid Concepts . *SLA - Versatile Rapid Prototypes* [online]. c1995-2008 [cit. 2009-05-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.solidconcepts.com/slaprototypes.html>>.
21. Castings Technology International. *Castings Technology International* [online]. [2009] [cit. 2009-05-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.castingstechnology.com/>>.
22. Soligen. *Soligen: Technical Information: Introduction* [online]. [2009] [cit. 2009-05-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.soligen.com/home.shtml>>.
23. 3D Tech. *Kovové výrobky* [online]. 2002 [cit. 2009-05-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.3dtech.cz/default.asp?language=cs§ion=12>>.