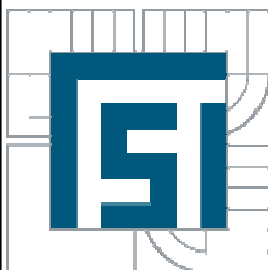
**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY**PŘEHLED MODERNÍCH METOD PŘI VÝROBĚ
PROTOTYPOVÝCH ODLITKŮ
SE ZAMĚŘENÍM NA KOMBINACI RP A PŘESNÉHO
LITÍ****POSSIBILITIES OF USING MODERN METHODS IN MANUFACTURING OF PROTOTYPE
CASTINGS FOCUSED TO COMBINATION OF RP AND INVESTMENT CASTING****BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**
BACHELOR'S THESIS**AUTOR PRÁCE**
AUTHOR**KAREL SYSEL****VEDOUCÍ PRÁCE**
SUPERVISOR**prof. Ing. Milan Horáček, CSc.**

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Karel Sysel

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:

Přehled moderních metod při výrobě prototypových odlitků se zaměřením na kombinaci RP a přesného lítí

v anglickém jazyce:

Possibilities of using modern methods in manufacturing of prototype castings focused to combination of RP and investment casting

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro urychlení komunikace mezi výrobcem součástí (odlitků) a odběratelem je v dnešní době nezbytné zkrácení doby mezi poptávkou a předložením prototypové součásti. Úkolem bakalářské práce je vypracovat literární rešerši zaměřenou na současné metody rychlého prototypování (RP) v kombinaci s technologií vytavitelného modelu používaných pro výrobu prototypových odlitků.

Cíle bakalářské práce:

Přehled metod RP a technologie vytavitelného modelu používaných v současnosti pro zhotovení prototypových odlitků.

Seznam odborné literatury:

1. BEELEY, PR. and SMART, RF. Investment Casting. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-66-9.
2. DOŠKÁR, J., aj. Výroba přesných odlitku. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.
3. CAMPBELL, J. Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth - Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0-7506-1072.
4. OTI, JA. The Science, Mechanics and Construction of Investment Casting Tooling without Rework. In Proceedings of the 50th ICI Conference. Chicago, 2002, p. 85-96.
5. WIMPENNY, D. RP – a route to rapid castings. In Proceedings of the 11th World Congress on Investment Casting. Edinburgh, 2004, p. 120-135.
6. HORÁČEK, M., CHARVÁT, O. a SMRČKA, V. Rychlé voskové modely získané použitím technologií RP a silikonové formy. Slévárenství. Říjen 2008, roč. LVI, č. 9-10, s. 398-404. ISSN 0037-6825.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Úkolem práce je přiblížit možnosti moderního slévárenství a dokázat, že toto odvětví průmyslu již dávno neznamena pouze výrobu hrubých odlitků, které bývaly výsledkem zdoluhavých výrobních procesů a testování nových forem. Proto je práce zaměřena zejména na možnosti technologií Rapid Prototyping (RP) a přesného lití, které nejen samy o sobě, ale především svojí kombinací otevírají zcela nové možnosti a udávají slévárenství úplně jiný směr.

Klíčová slova

Rychlé prototypování, Slévárenství, Metoda vytavitelného modelu, metoda vypařitelného modelu.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to close the possibilities of modern foundry industry and demonstrate that nowadays it isn't only about production of inaccurate casts, which were products of a lengthy industrial processes and testing of the new casting moulds. So that the thesis is concentrated on possibilities of the Rapid Prototyping Technologies and investment casting, because especially combination of them gets a new possibilities and direction to the modern foundry industry.

Key words

Rapid Prototyping, Foundry industry, Lost Wax, Lost Foam.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SYSEL, K. *Přehled moderních metod při výrobě prototypových odlitků se zaměřením na kombinaci RP a přesného lití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 41 s. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Přehled moderních metod při výrobě prototypových odlitku se zaměřením na kombinaci RP a přesného lití* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

28. 5. 2010

.....
Karel Sysel

Poděkování

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

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH	7
ÚVOD	8
1 RAPID PROTOTYPING.....	9
1.1 Stručná historie RP	9
1.2 Princip a proces výroby modelu pomocí RP	10
1.2.1 Stereolitografie (stereolithography)	12
1.2.2 Metoda SLS (Selective Laser Sintering).....	16
1.2.3 Metoda FDM (Fused Deposition Modeling)	20
1.2.4 Laminátování – metoda LOM (Laminated object manufacturing).....	22
1.2.5 Three-dimensional printing (3DP).....	24
1.2.6 Ostatní metody RP.....	27
2 POUŽITÍ METOD RAPID PROTOTYPING VE SLÉVÁRENSTVÍ.....	28
2.1 Nepřímá výroba forem.....	29
2.1.1 Metoda vytavitelného modelu (Lost Wax)	29
2.1.2 Metoda vypařitelného modelu (Lost Foam).....	33
2.1.3 Metoda vypařitelného modelu (Replicast).....	34
2.1.4 Lití do skořepinových a silikonových forem.....	35
2.2 Přímá výroba forem.....	36
2.2.1 Přímá výroba pískových forem.....	36
2.2.2 Přímá výroba keramických skořepinových forem.....	37
3 ZÁVĚR.....	38
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	39

ÚVOD

V dnešní době je nejen strojírenský průmysl, ale i všechny ostatní odvětví výroby pod stálým tlakem a je tedy nutno dbát nejen na zachování konkurenceschopnosti, ale také možnosti přizpůsobit se novým trendům. Pro obor slévárenství je jedním z velice účinných nástrojů, vypořádání se s nástrahami tržního hospodářství, právě technologie RP. Úkolem této technologie je zvládnutí vytvoření reálného modelu budoucího výrobku v co nejkratší době, což ostatně vystihuje samotný název a v co možná nejlepší kvalitě. Tato technologie je v dnešní době ve větších firmách již téměř samozřejmostí při vývoji nových výrobků, protože je žádoucí, aby bylo vše připraveno před tím, než budou vynaloženy nemalé investice do nástrojového a strojního vybavení pro budoucí hromadnou výrobu. Pomocí technologií RP je možno v relativně krátké době (řádově v několika hodinách) vytvořit z CAD návrhu reálný model, což umožňuje nejen modernímu slévárenství nebývalou pružnost při vývoji a právě možnosti a postupy při výrobě modelů budou dále podrobněji představeny.

Proto, aby byla výše zmíněná technologie opravdu maximálně využitelná, bylo však třeba zefektivnit i samotnou výrobu. Při výrobě odlitků je totiž mnoho aspektů, které je třeba vyřešit, aby byl výsledek pokud možno stoprocentní. Mezi hlavní patří kvalita samotného odlitku, kvalita povrchu, přesnost a v neposlední řadě opět rychlost a možnost inovace i během výroby. Proto se moderní slévárenství v poslední době stále více obrací na tzv. technologie přesného lití, což znamená zejména využívání vytavitelných a vypařitelných modelů, při jejichž přípravě a výrobě je nezastupitelným pomocníkem právě technologie RP.



Obr.1 Příklady možností kombinace RP a přesného lití [1]

1 RAPID PROTOTYPING

1.1 *Stručná historie RP*

Rychlé prototypování je poměrně mladá technologie, která představuje proces výroby 3D celistvých objektů a je ve větším měřítku využívána až posledních 20 let. Počátky totiž sahají teprve do 80. let 20. století, kdy spatřila světlo světa první z metod RP – Stereolitografie. Tato myšlenka patřila Kalifornské společnosti 3D Systems. Z této nejprve technické kuriozity se záhy stala uznávaná a rozšířená pomůcka při konstruování, protože byla opravdu schopna zrychlit celý proces vývoje a snížit tedy náklady s tím spojené. Původně šlo o pouhé vrstvení křehkých pryskyřičných materiálů, které sloužily spíše pro lepší vizualizaci a zrychlení schvalování modelů. Prvním cílem tedy bylo nahradit tyto materiály pevnějšími, což došlo až k možnosti vytvářet modely z kovové a plastových materiálů takové kvality, že je bylo možno použít přímo jako funkční součásti nebo alespoň k funkčním testům. Příklad současných možností je znázorněn na Obr. 1.1. [2]



Obr. 1.1 Model vytvořený pomocí RP [2]

Díky poměrně rychlému rozmachu se v příštích letech prosadilo hned několik dalších technologií, pracujících (stejně jako Stereolitografie) na principu postupného přidávání nebo vytvrzování jednotlivých vrstev materiálu.

Objevuje se systém BPM (Ballistic Particle Manufacturing), což je patent firmy BPM Technology. O rok později (r. 1988) přichází jiná firma, Helysis s technologií LOM (Laminated Object Manufacturing), která funguje na principu vrstvení tenkých fólií z papíru, nylonu nebo polyesteru. Roku 1989 se objevuje další technologie, SLS (Selective Laser Sintering), využívající technologie slinování práškových materiálů pomocí řízeného laserového paprsku, vyvinutá na Texaské univerzitě v Austinu. V roce 1992 je uveden na trh společností Stratasys systém technologie FDM (Fused Deposition Modeling), kde není, na rozdíl od ostatních metod, použit laser, ale jednotlivé vrstvy jsou tvořeny nanášením roztaveného termoplastu. Poslední, z běžně využívaných metod, vzniká roku 1993 v Massachusetts Institute of Technology a je to 3DP (Three-dimensional printing). Technologie funguje na podobném principu, jako klasický inkoustový tisk a je velmi všestranná. [3]

Časový přehled vzniku a vývoje technologií RP:

- 1986 SLA Stereolithography
- 1987 BPM Ballistic Particle Manufacturing
- 1988 LOM Laminated Object Manufacturing
- 1989 SLS Selective Laser Sintering
- 1992 FDM Fused Deposition Modeling
- 1993 3DP Three-dimensional printing

1.2 Princip a proces výroby modelu pomocí RP

Výroba modelu pomocí RP se v podstatě dělí do třech základních etap:

- a) **Preprocessing** – jedná se o etapu, související s přípravou dat. Ve většině případů to znamená tvorbu budoucího modelu, pomocí některého z CAD systémů a jeho následný převod do formátu STL. Jedná se o převod vytvořeného geometrického modelu na skupinu rovinných ploch, které mají tvar trojúhelníků. V případě některých metod RP je třeba navíc počítat se zajištěním tzv. podpurných konstrukcí u vrstev, které nejsou v určitých etapách výroby modelu samonosné. Tomuto se někdy lze, vyhnout velice jednoduše a to vhodnou orientací součástí. Tato „fáze přípravy“ je tedy velmi důležitá a lze se díky navržení vhodného postupu vyhnout zbytečným komplikacím.

- b) **Processing** – zde již probíhá samotná výroba modelu, a to vrstvením konkrétního materiálu určitým způsobem, závislým na zvolené nebo řekněme dostupné metodě. Pro lepší představu si uveďme základní principy, používané při výrobě modelu. [3]

Základní fyzikální principy jednotlivých metod:

1) **Metody světelné**

Metoda Stereolitografie – SL

SL, jako první metoda Rapid Prototyping, funguje na principu postupného nanášení jednotlivých vrstviček pryskyřice a následného vytvrzování leserem.

Metoda Selective Laser Sintering – LS

Při této metodě je opět využíván laserový paprsek, který spéká jednotlivé vrstvy materiálu. Ty jsou tvořeny nanášením jemného prášku do plochy řezu, jeho uhlazením a následným spečením k předchozí vrstvě.

2) **Metody tepelné**

Metoda Fused Deposition Modeling – FDM

FDM je metoda nanášení vrstev roztaveného materiálu, procházejícího skrz vytlačovací hlavu, která svými pohyby tvoří danou plochu.

3) **Metody spojovací**

Metoda Laminated Object Manufacturing – LOM

LOM je metoda, která je od ostatních odlišná svým způsobem tvorby vrstev. Nejprve je nanesena folie materiálu, který se následně laminátuje a poté je požadovaný obrys vyřezáván laserem nebo mechanicky.

Metoda Three Dimensional Printing – 3DP

Tato metoda, nazývaná jako 3D tisk opravdu v podstatě funguje na principu tiskárny. Vrstvy modelu jsou tvořeny přejíždějícími hlavami, které střídavě nanášejí vrstvy práškového materiálu a pojiva. Metoda patří zároveň do skupiny metod tepelných.

Metody založené na Inkjet technologii

Inkjet technologie jsou, podobě jako 3DP, založeny na principu jakéhosi „tisku“ jednotlivých vrstev. Tvorba probíhá postupným vystřikováním materiálu v tekutém stavu, který následně, buď volně na vzduchu, nebo při vystavení UV záření tvrdne.

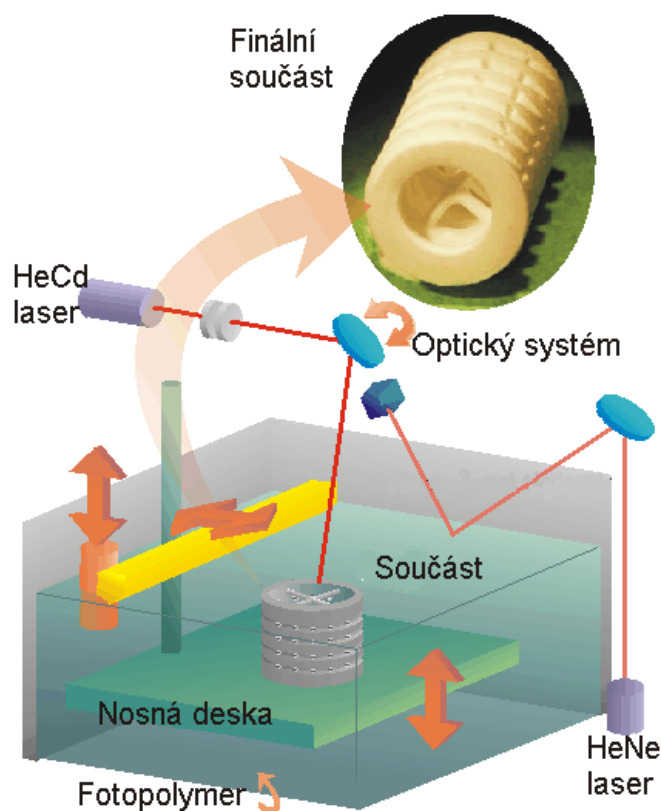
- c) **Postprocessing** – toto je poslední (podvýrobní) fáze, při které dochází k vyjmutí modelu a jeho dalšímu opracování. U některých metod je nutné nejprve odstranit okolní materiál, jako např.: odsátí přebytečného prášek, zbytků po ořezávání nebo oplach fotopolymeru. To samozřejmě závisí na metodě, kterou byl model vytvářen. Některé metody navíc vyžadují další zpracování, popřípadě opracování. Především se jedná o dodatečné dotvrzování modelů pod UV zářením nebo napouštěním tvrdidly. Poté přichází na řadu odstranění podpor (pokud jsou) a to mechanicky nebo v rozpouštědle. Pro odpovídající výsledek je ve většině případů zakončeno mechanickým opracováním modelu. Vzniklá stupňovitá struktura totiž není žádoucí pro další využití modelu a je tedy třeba zdokonalit povrch tak, aby odpovídal požadavkům na budoucí vyráběnou součást. To probíhá na základě použitého materiálu např. tmelením, broušením nebo i standardním obráběním. Součástky se v některých případech nadále barví, lakují a někdy i galvanicky pokovují. [3, 4]

1.2.1 Stereolitografie (stereolithography)

Tato metoda, zvaná také jako Fotopolymerizace, je prvním průkopníkem. Přesto je v dnešní době stále na vrcholu RP technologií. Stále o ní totiž platí, že se jedná o nejpreciznější z uvedených metod a lze tedy v modelu vytvářet i drobné prvky a otvory do 1mm. Má také poměrně široké možnosti, co se týká použitých materiálů. Hlavně díky této výhodě lze modely, zhotovené touto technologií použít nejen k vizuálním, ale v některých případech i k funkčním zkouškám. Pokud se zaměříme přímo na obor slévárenství, lze, volbou vhodného materiálu, model využít přímo jako formu pro lití. Lze tedy tuto metodu označit jako **vhodnou pro slévárenství**, což je v našem případě to nejzajímavější. Metoda má samozřejmě i určité nevýhody, ale o tom až při podrobnějším rozboru.

Princip metody:

První fází, stejně jako u všech ostatních metod, je zkonstruování 3D návrhu v některém z dostupných CAD programů. Po převedení do formátu STL (standardní formát dat pro RP), kdy je model virtuálně rozřezán na jednotlivé vrstvy o tl. 0,02 – 0,2mm, dle složitosti modelu a možností a poté již přichází na řadu zpracování dat přímo daným přístrojem. Samotná tvorba modelu potom probíhá vytvrzováním jednotlivých vrstviček tekutého fotopolymeru (plastická hmota, citlivá na světlo) pomocí UV laseru. Právě tento laserový paprsek je, na základě dat o příčných řezech modelem, zaměřován díky optické soustavě přesně na místa vzniku budoucí pevné struktury. Toto se však děje pouze v osách X a Y. Pohyb ve třetí ose a tedy i tloušťka jednotlivých vrstev je zajištěna pohyby nosné desky, která je celou dobu pod hladinou fotopolymeru a na které je model tvořen. Jednoduché schéma procesu je vyobrazeno na Obr. 1.2. V závislosti na velikosti a složitosti, potom tímto procesem model vzniká v řádu několika hodin.



Obr. 1.2 Schéma stereolitografie [5]

Nevýhodou této technologie může být poměrně pomalý proces vytvrzování polymerů a také malá tepelná odolnost některých materiálů. Navíc je třeba již ve fázi preprocessingu myslet na zakomponování potřebných podpor. Díky tomu, že vrstvy jsou vytvrzovány z tekutého polymeru, nemusí být tedy některé části modelu v určité fázi výroby samonosné. S tím souvisí i třetí fáze (postprocessing), kdy je třeba dbát na to, aby bylo možné podpory odstranit bez poškození zbytku modelu. Před tímto dodatečným opracováním se model nejprve omývá od zbylého polymeru.

Model je dále upravován tak, aby dostal svoji finální podobu a to především z hlediska kvality povrchu. Model se tedy většinou dotvrzuje pomocí UV záření a poté brousí, finišuje, případně obrábí standardním způsobem. Poté zpravidla dochází k celkové povrchové úpravě modelu barvením, lakováním nebo i galvanickým pokovením. [3, 4]

Stereolitografické přístroje:

Vzhledem k tomu, že u rozvoje této technologie stála již zmíněná společnost *3D Systems*. Současně s tím bylo samozřejmě nutno zajistit i vývoj vhodných přístrojů, se kterými tato firma přišla na trh. Mezi prvními byl přístroj *SLA-250* vybavený plynovým laserem. Dnes je toto zařízení již hodně zastaralé, ale v ČR byly pomocí této metody vyrobeny první výrobky až v roce 1998, kdy toto zařízení začal používat český zástupce – firma *3D Tech*. Možnosti tohoto zařízení byly 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 sérii přístroje). Poté následovaly další přístroje z této řady.



Obr. 1.3 stereolitografické centrum *iPro 9000 XL* s ukázkou konkrétního výrobku [6] [7]

Je sice pravdou, že v současné době je již konkurence v této oblasti vysoká, přesto si *3D Systems* drží významné postavení. Mezi novinky patří stereolitografická centra série *iPro 8000* a *iPro 9000* (obr. 1.3) nebo *Viper™ SLA® System*, který je schopen dosáhnout vysokého rozlišení a dosahovaná tloušťka jedné vrstvy je až 0,02 mm (standardně se pracuje s 0,1 mm). Navíc přesnost zařízení se pohybuje v rozmezí +/- 0,1% (min. +/- 0,1 mm). Tyto parametry řadí tento přístroj mezi špičky na trhu. Centrum *iPro 9000 XL* je navíc schopno vyrobit součásti o rozměrech až 1500 x 750 x 550 mm a v tomto nemá na trhu konkurenci.

Dále jsou využívána různá přídatná zařízení, především zdroje UV záření, sloužící k dotvrzení modelu po dokončení a vyjmutí z polymerové lázně. Tato zařízení jsou vybavena zrcadlovým systémem pro možnost rovnoměrného ozařování celého modelu. [6]

Materiály:

Co se týká možností používaných materiálů i zde došlo ke značnému posunu:

Akryláty – Původně využívané materiály na bázi akrylátu, se v dnešní době již nepoužívají. Problémem byla velká smršťivost a s tím spojená nepřesnost modelů. Akryláty také nejsou příliš vhodné s ohledem na životní prostředí.

Epoxidy – Tento moderní materiál se naopak vyznačuje minimální smršťivostí a tedy velkou přesností a je poměrně často využíván.

Plněné pryskyřice – Dnes se jedná v podstatě o nejpoužívanější materiály ve stereolitografii. Největší výhodou je možnost obohacení pryskyřičného základu o kovové nebo i keramické materiály a výsledný model tím pádem disponuje zcela jinými mechanickými vlastnostmi, než v případě použití předchozích materiálů.

V případě Firmy *3D Systems* jsou to různé druhy materiálů pod označením **Accura[®] SL Materials**. Díky nim je možno, v závislosti na složení, vytvářet modely pevné, nebo naopak ohebné, různě barevné i průhledné. [2, 4]



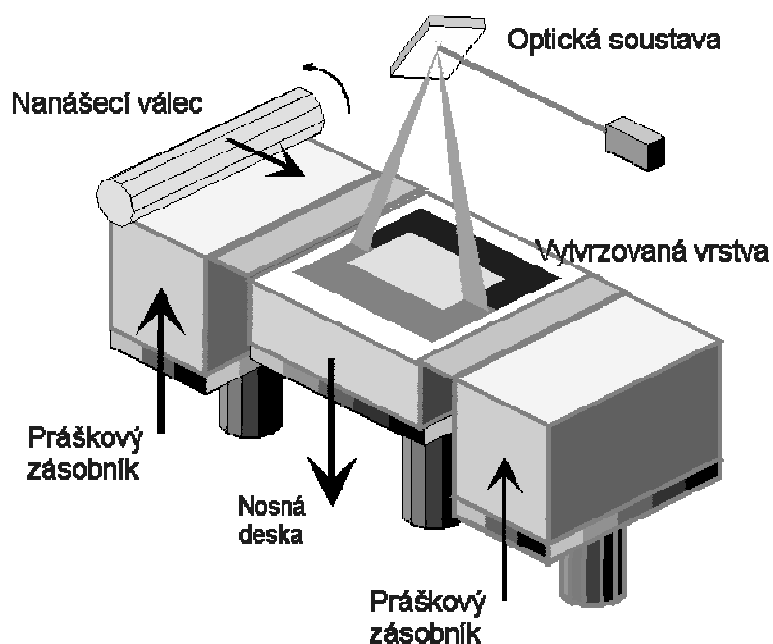
Obr. 1.4 příklady povrchových úprav stereolitografického modelu [8]

Shrnutí:

- + jedna z nejpřesnějších metod
 - + možná tvorba i velmi drobných detailů a otvorů
 - + v současnosti již velký výběr z použitelných materiálů
 - + využitelná ve slévárenství
 - + možnost dosažení dobré povrchové drsnosti
-
- často nutná tvorba a tedy i odstraňování podpor
 - malá tepelná odolnost některých materiálů
 - pomalejší proces tvrzení fotopolymerů
 - obvykle nutnost následného dotvrzení
 - náklady na velké množství tekutého fotopolymeru.

1.2.2 Metoda SLS (Selective Laser Sintering)

Tato metoda je o něco novější, než SL a oproti ní přináší výhodu zejména v odolnosti a pevnosti výsledného modelu. V dnešní době je i v tomto případě na výběr z více použitelných materiálů. V našem případě bude nejzajímavější možností spékání práškových kovů, plastů nebo přímo formovacího písku, a tedy možnost přímé výroby slévárenských forem. Lze tedy i o této metodě bezesporu říci, že **je vhodnou pro slévárenství, především pro oblast přesného lití.**



Obr. 1.5 Schéma metody SLS [9]

Princip metody:

Jak už bylo naznačeno, tato metoda, přestože se zdá být podobná stereolitografii, používá zcela odlišnou technologii tvorby modelu. Jedná se také o vytváření jednotlivých vrstviček materiálu, ale tentokrát v podobě jemného prášku.

Zařízení se skládá ze zásobníků, obsahujících práškový materiál, který je pomocí válce transportován v tenkých vrstvách na pracovní plochu, laseru a optické soustavy (viz. schéma na Obr. 1.5). Dříve byla tato metoda daleko méně přesná než stereolitografie, protože nanášené vrstvy byly v tloušťkách řádově desetin milimetru, ale v dnešní době jsou již používána zařízení, schopná pracovat s vrstvami přibližně od tl. 0,02mm. Vrstva požadované tloušťky (0,02mm – desetiny milimetru) je pak na pracovní ploše spékána pomocí CO₂ laseru. Ten je opět řízen optickou soustavou tak, aby byl prášek spékán pouze v místech průřezu modelu. Po dokončení operace je deska posunuta níže a celý proces se opakuje. Okolní (nezpracovaný) materiál pak slouží jako podpora do doby, než je model hotov, zchlazen a vyjmut z přístroje. Z toho vyplývá, že zde není nutno myslet na tvorbu dodatečných podpor. Celý proces probíhá v inertní atmosféře, která je nejčastěji zajištěna dusíkem nebo argonem. Tento plyn je zahřát na vysokou teplotu (blízkou tavicí teplotě práškového materiálu) a vytváří tak příznivější podmínky pro výrobu modelu.

Velkou výhodou je široká škála použitelných materiálů. V podstatě lze použít jakýkoli práškový materiál, který se při působení tepla taví nebo měkne. Modely se pak, například při použití kovových materiálů, vyznačují velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a lze říci, že touto metodou lze při volbě vhodného materiálu přímo vyrobit funkční součásti. Další z kladných věcí je téměř bezodpadovost této metody, protože nezpracovaný materiál je až z 98% znovu využit pro další výrobu, což je velice ekonomické a ekologické (alespoň z tohoto pohledu). [2, 3, 4]



Obr. 1.6 Šperk, vytvořený metodou SLS [10]

Jak již bylo řečeno, použitelných materiálů je nepřeberné množství, ale podle jejich druhu se tato technologie dělí na 4 základní metody:

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

Při současném stavu vývoje lze navíc se všemi materiály pracovat na jednom stroji, což tuto technologii činí velice zajímavou.

Laser Sintering - Plastic

Toto je jedna z metod, která je pro nás zajímavá především tím, že je možno ji využít k přímé výrobě slévárenského modelu. Díky této technologii jsme schopni například vyrobit polystyrenový model pro lití na vypařitelný model. V případě použití například nylonu mají vyrobené součásti zase velmi dobrou tvrdost, houževnatost a teplotní odolnost. Takovéto modely lze tedy použít i pro funkční zkoušky nebo testy lícování.

Laser Sintering - Metal

Vzhledem k použitému materiálu, speciálnímu kovovému prášku, lze touto metodou vyrobit velmi pevné, odolné a především plně funkční modely. Ty se je již možno využívat i pro takové účely, jako je přímá výroba forem pro lisování a vstřikování plastů.

Laser Sintering - Foundry Sand

Jedná se o novou metodu, pomocí které je, za použití speciálního slévárenského písku, možná přímá výroba klasické pískové formy, a to bez jakýchkoli dalších úprav. Z tohoto pohledu je tato metoda pro slévárství opět velice zajímavá.

Laser Sintering - Ceramic

Tato metoda je trošku odlišná v tom, že keramický prášek je po vrstvách míchán s pojivem, které je nanášeno pomocí Ink-Jet tryskové hlavy, vedené v osách XY. Zajímavé je opět především to, že je metoda velmi dobře využitelná ve slévárství, a to především pro výrobu keramických forem a jader pro technologii přesného lití.

Jsou zde však i některé další technologie, které si vytvořily vlastní skupiny:

Laser Micro Sintering

Metoda byla uvedena na trh roku 2003 na základě zvyšujících se požadavků na přesnost modelů, vyráběných technologií SLS. Díky prášku o velmi malé zrnitosti (wolfram) je možná výroba dílů s přesností pod 30 μm . Nanášené vrstvy bývají v tloušťkách do 0,03 mm a je možno dosáhnout velmi vysoké kvality povrchu (méně než Ra 1,5 μm).

3-D Laser Cladding

jako základní materiál je opět kovový prášek, tentokrát se však jedná o slitiny titanu, niklu, kobaltu a hliníku. Postup při výrobě je trochu odlišný v tom, že prášek je dávkován plynule přímo do dráhy laserového paprsku, který ho taví a spojuje s předcházející vrstvou. Vyrobené součásti mají tak dobré mechanické vlastnosti a hustotu, že jsou srovnatelné s díly, vyrobenými běžnými technologiemi (obráběním, litím...). Takto vyrobené součásti se používají i v takových odvětvích průmyslu, jako je letectví. V případě použití speciální slitiny Ti6Al4V, lze dokonce vyrobit funkční kloubní náhrady. [2, 3, 4]



Obr. 1.7 Příklady kloubních náhrad z titanové slitiny Ti6Al4V [11]

Shrnutí:

- + dobré mechanické vlastnosti modelů
 - + široký rozsah použitelných materiálů
 - + možnost přímého použití modelů jako funkčních součástí
 - + není nutná tvorba podpor
 - + kratší doba zhotovení modelu
 - + velká využitelnost nespotřebované směsi (ekonomičnost, ekologičnost)
-
- nutná větší vstupní energie
 - výskyt vnitřních napětí při chladnutí modelu
 - obtížnější opracování u složitějších dílů
 - možná tvorba staženin při spékání

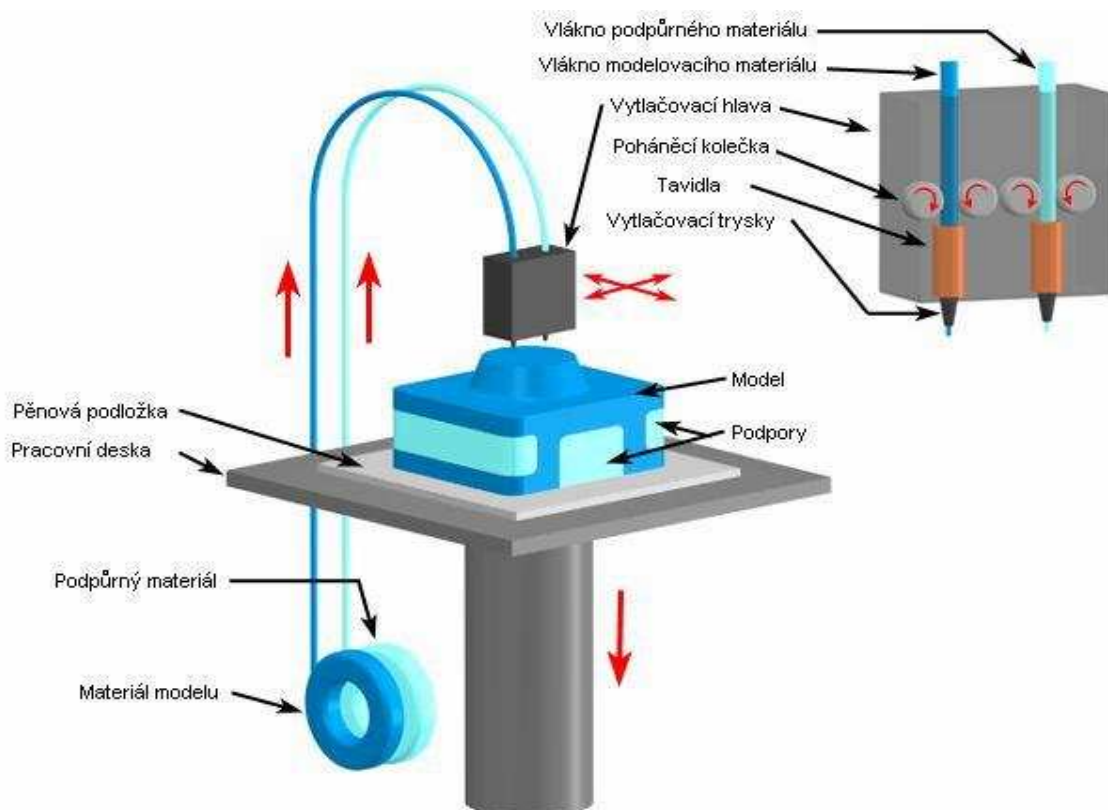
1.2.3 Metoda FDM (Fused Deposition Modeling)

Metoda je od všech předchozích zcela odlišná svojí technologií tvorby modelu. Poprvé se zde totiž nepoužívá laser, ale nanášení materiálu probíhá díky tryskám, skrz které je protlačován roztavený materiál.

Princip metody:

Nejprve materiál vstupuje do vytlačovací hlavy, v podobě tenkých vláken. Podávacím mechanismem je dávkován a protlačován skrz indukční ohřivače a poté je skrz zmíněné trysky nanášen na pěnovou podkladovou desku, popřípadě na již hotovou předchozí vrstvu. Teplota ohřevu je pouze o 1°C vyšší, než teplota tavení materiálu. Opět platí pravidlo, že to hlavní se odehrává v osách XY a posuv součásti ve vertikálním směru zajišťuje pracovní deska (Obr. 1.8).

Díky způsobu tvorby součásti je možno již dopředu odhadnout, že mezi používané materiály budou patřit především termoplasty, popřípadě různé vosky. Nejčastěji využívaným materiálem je ABS. Materiál při nanesení téměř okamžitě tuhne a tloušťka vytvářené vrstvy bývá rozmezí 0,1 – 0,3mm. Při správném výběru termoplastu je možno vytvořit součást s poměrně dobrými mechanickými vlastnostmi. V případě vosku, lze takto vymodelovat i formu pro lití na vytavitelný model. Problémem je však horší povrchová kvalita modelu, a tedy nutnost následného opracování pro dosažení žádaného výsledku.



Obr. 1.8 Schéma metody FDM (Fused Deposition Modeling) [12]

Mezi nevýhody, mimo hrubší strukturu povrchu, patří také nutná tvorba podpor. To je zajištěno podpůrným materiálem, který je dle potřeby dávkován druhou tryskou. Tento materiál je volen tak, aby se s materiálem samotného modelu nepojil a bylo jej tedy možné po vyjmutí modelu snadno odstranit. V dnešní době existují dokonce technologie, kdy je speciální podpůrný materiál rozpouštěn v k tomu určeném vodním roztoku a není tedy nutno nějak mechanicky zasahovat, což je výhodou obzvláště v případě špatně přístupných míst. Tato metoda navíc není zdaleka tak přesná, ale přesto je pro spoustu průmyslových oborů velmi zajímavá, protože přesnost je zde nahrazena rychlostí, což je v mnoha případech určující. Právě díky rychlosti tvorby modelu, většina 3D-tiskáren pracuje s touto metodou a tyto přístroje můžeme v podstatě potkat i v běžném kancelářském prostředí strojírenské firmy. [2, 3, 4]

Materiály:

ABS (akrylonitril-butadien-styren) – velmi odolný termoplast, často využívaný pro vstřikolisy. Lze z něj vytvořit i funkční prototypy a další výhodou je možnost různých barevných provedení.

PC thermoplastic (polykarbonát) – opět velmi odolný materiál, tentokrát i s dobrou tepelnou odolností.

PC-ABS – využívá výhod obou předchozích materiálů

Vosky a elastomery – různé elastomery jsou používány pro případ požadavků na pružnou součást. Díky možnosti stavby modelů z vosků je i tato **metoda vhodná pro slévárenství**, protože je zde, jak už bylo řečeno možnost tvorby voskového modelu pro lití na vytavitelný model. Ten však musí být nejprve opracován, kvůli horší dosahované kvalitě povrchu.

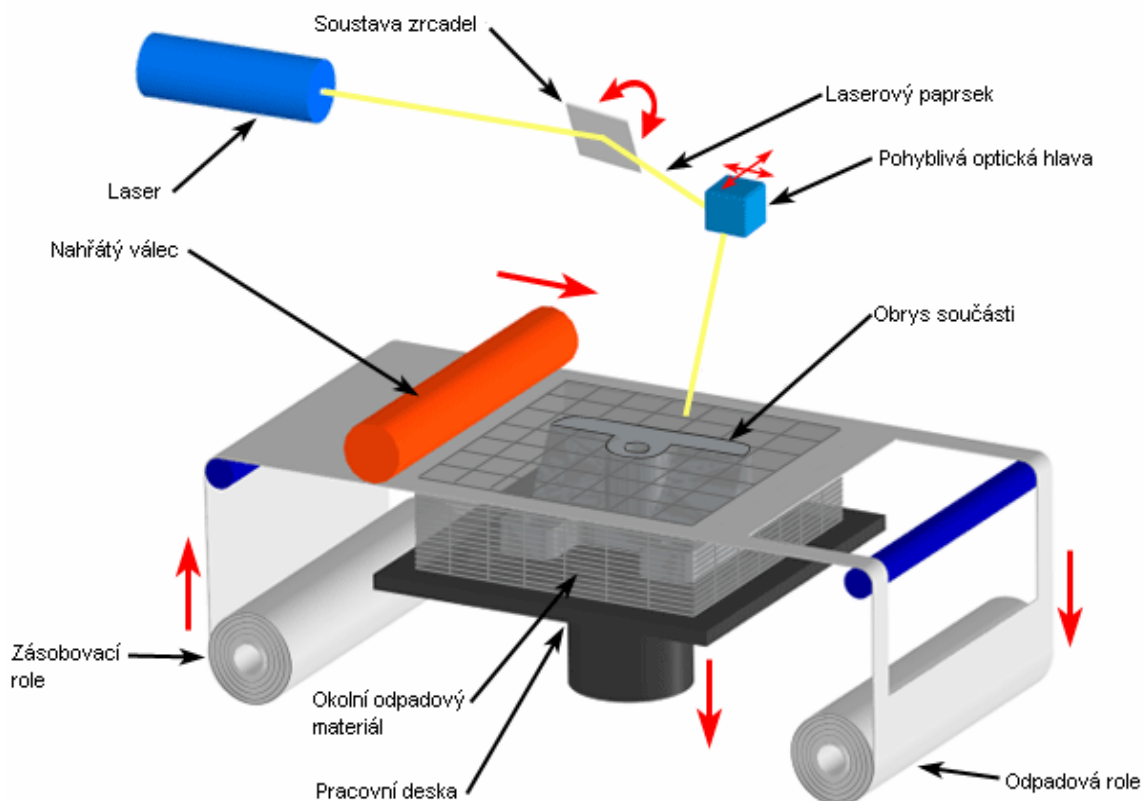
Shrnutí:

- + rychlost zhotovení modelu (2 - 4 x rychlejší, než SLA)
- + poměrně velký výběr materiálů
- + i zde možnost tvorby funkčního modelu
- + u některých materiálů dobrá tepelná odolnost
- + dobré mechanické vlastnosti termoplastů
- + vhodná pro slévárenství

- méně přesná
- nutnost použití druhého materiálu pro tvorbu podpor
- omezené možnosti při detailování
- nutnost povrchové úpravy modelu
- výhodná pouze při výrobě menšího počtu kusů

1.2.4 Laminátování – metoda LOM (*Laminated object manufacturing*)

Tato metoda opět využívá laserový paprsek, liší se však ve způsobu nanášení a druhu používaného materiálu. Model je tentokrát sestavován vrstvením papírových nebo plastových fólií, které jsou následně ořezávány do požadovaného tvaru.



Obr. 1.9 Schéma metody LOM [13]

Princip metody:

Tato metoda je, na rozdíl od ostatních velice rychlá a jednoduchá. Celý cyklus začíná natažením folie přes pracovní desku, popřípadě přes předchozí vrstvu modelu. To probíhá za pomoci dvou navíjecích válců, umístěných po stranách přístroje. V případě použití papírového materiálu bývá tato folie napuštěna zpevňující hmotou. Díky obsaženému polyetylenu jsou pak jednotlivé folie slepovány pomocí zahřátého válce, který každou vrstvu přejíždí. Jednotlivé vrstvy jsou pak ořezávány laserem do požadovaného tvaru, což je zajišťováno optickou hlavou, přejíždějící nad pracovní plochou v osách XY. Posun ve svislém směru zajišťuje opět pohyb pracovní desky. Po dokončení každé vrstvy je díky ní model posunut o tloušťku folie níž, což bývá přibližně od 0,1mm. Výroba tenčích vrstev není možná z důvodu možného trhání materiálu a dalších nežádoucích jevů.

Hlavní časovou a také ekonomickou úsporou přináší fakt, že laser nemusí v každé vrstvě zpracovávat celý průřez modelu, ale jde pouze o vyřezávání tvaru, tedy obrysů. Okolní materiál je pak rozřezáván na síť čtverců a po dokončení modelu mechanicky oddělen. Díky možnosti použití snadno tavitelných materiálů je i tato **metoda vhodná pro slévárenství** a to především pro tvorbu vytavitelných modelů. V případě použití papírového materiálu je zase vytvořena velice zajímavá struktura, připomínající objekt ze dřeva. Nevýhodou naopak může být hrubší struktura a tedy horší kvalita dosaženého povrchu a z toho vyplývající nutnost dodatečného opracování nebo také nemožnost vytváření menších detailů. [2, 3, 4]

Materiály:

Klasicky používané materiály jsou již zmíněné papírové - **LOMPaper**, nebo plastové – **LOMPlastic**. Je však možno narazit i na modely, vytvořené z kompozitů - **LOMComposite**. Tyto kompozitní modely mají navíc i poměrně slušné mechanické vlastnosti. Používány jsou především materiály s obsahem skelných vláken.



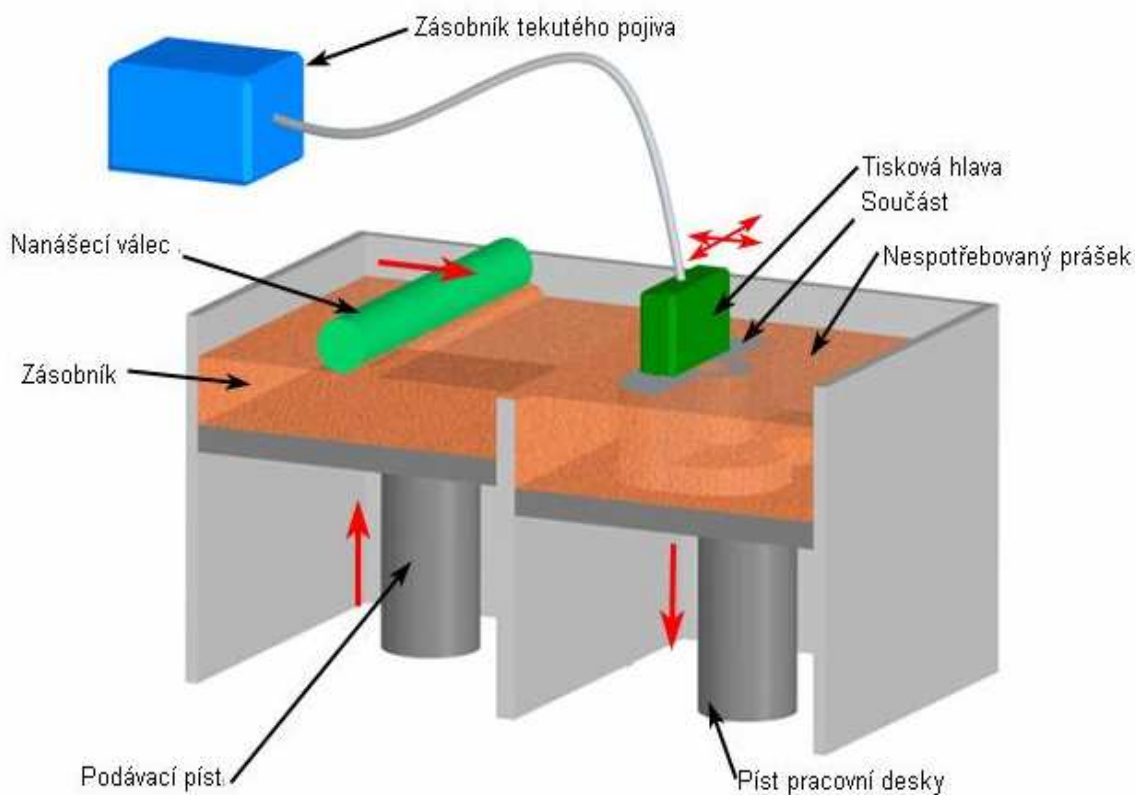
Obr. 1.10 Model, vytvořený metodou LOM, s charakteristickou strukturou [14]

Shrnutí:

- + velmi rychlá výroba modelu
 - + bez nutnosti tvorby podpor
 - + energeticky méně náročná metoda
 - + možnost uplatnění ve slévárenství
- velké množství odpadního materiálu
 - složité odstraňování okolního materiálu
 - nižší přesnost způsobená větší minimální možnou tloušťkou folií (vrstev)
 - nutná následná povrchová úprava
 - rychlost na úkor kvality

1.2.5 Three-dimensional printing (3DP)

Metoda je výsledkem práce Massachusetts Institute of Technology (MIT). Opět jde o výjimku z hlediska technologie tvorby modelu. Stejně, jako u metody FDM, není využíváno ke spojování nebo odebrání materiálu laseru.



Obr. 1.11 Schéma metody 3DP (Three-dimensional printing) [15]

Princip metody:

Nanášení materiálu funguje v podstatě, jako u metody SLS. Přes pracovní plochu přejíždí válec, který nanese tenkou vrstvu prášku. Ten ale není spojován laserem, ale pomocí pojiva, které je dodáváno injektovou hlavou, pohybující se nad plochou v osách XY a dávkující pojivo skrz jemné trysky dle potřeby. Díky tomu dochází ke spojování materiálu a model je takto opět tvořen po vrstvách. Pohyb ve svislé ose zajišťuje opět pracovní deska (základna), která taktéž určuje sílu jednotlivých vrstev (Obr. 1.11). Po dokončení je celý model ještě napuštěn tvrdidlem, aby nedocházelo k vydrolování, protože použité pojivo nebývá samo o sobě dostačující, pro odpovídající pevnost modelu. Díky poměrně jednoduchosti, dostupnosti a nenáročnosti zařízení je metoda 3DP v současnosti nejvíce využívanou a rozvíjející se technologií RP vůbec. Počet používaných zařízení, pracujících na této technologii, je přibližně 4x více, než všech ostatních dohromady. Tyto 3D tiskárny také dosahují poměrně slušných rozměrových přesností, okolo 0,1% a díky použité technologii není nutná tvorba podpor.

Další výhodou metody je velký výběr z použitelných materiálů a také barevných možností. Díky tomuto je hojně využívána pro prezentační účely, kdy jsme schopni, díky výše zmíněným přednostem, v podstatě obratem dodat náhledový model v odpovídajícího barevném provedení. [2, 3, 4]



Obr. 1.12 Příklad využití technologie 3D tisku v architektuře [16]



Obr. 1.13 Ukázky barevných a materiálových možností 3DP [17]

Právě pro široké možnosti v oblasti použitelných materiálů, má tato metoda dobré uplatnění jak při výrobě plastových a „gumových“ modelů, tak **v oblasti slévárenství**. Právě dle použitých materiálů, vhodných pro slévárenství, lze 3DP rozdělit dle několika nejrozšířenějších technologií:

ProMetal 3D Printing – pod tímto názvem se ukrývá výroba zejména kovových a keramických forem, podpořená právě technologií 3DP. Tyto formy poté slouží převážně k výrobě tvarově složitých hliníkových odlitků, hojně využívaných v automobilovém průmyslu.

ZCast® - název se odvíjí od názvu společnosti, který tuto technologii rozvíjí, *Z Corporation*. Materiál, používaný na 3D tiskárnách této společnosti, *ZCast 501*, je pak surovinou pro tvorbu forem a jader, určených k výrobě odlitků z hliníku, zinku nebo hořčíku, tedy výrobků z materiálů o nízké teplotě tavení.

Direct Shell Production Casting[®] - tato technologie, významná také pro oblast přesného lití, umožňuje přímé zhotovení keramické formy. Jedná se v zásadě o skořepiny, z čehož vychází i samotný název. S využitím takto zhotovených forem lze pak odlévat jakékoli kovy.

RealWax[™] - pomocí speciálních vosků, je díky této technologii, možno vytvořit voskový model, pro použití při přesném lití na vytavitelný model. [2, 4]

Shrnutí:

- + momentálně nejrozšířenější technologie RP
 - + velmi dobrý poměr cena/výkon (nejlepší mezi technologiemi RP).
 - + velice přesná metoda
 - + nenáročný provoz.
 - + dobré využití ve slévárenství
-
- pouze průměrná rychlost tvorby modelu
 - větší časová náročnost postprocesingu

1.2.6 Ostatní metody RP

Technologie RP zažívají veliký rozmach a díky tomu se ani nelze věnovat všem technologiím tak podrobně, jako výše zmíněným. Je mnoho dalších metod, které se liší buď používanými materiály, technikou zařízení, způsobem stavby modelu atd. Ve své podstatě však pracují podobně, jako některá z již uvedených. Na následujících stránkách je tedy uveden alespoň stručný přehled těch nejzajímavějších.

Solid Ground Curing (SGC) – tato technologie, tak jako Stereolitografie, používá fotopolymer. Odlišnost je ale v tom, že je možno vytvrdit celo u vrstvu naráz pomocí UV-lampy, a to prosvícením přes tzv. negativní masku, což je obvyklá skleněná destička s vyznačeným tvarem aktuální vytvrzované vrstvy.

Nejprve se tedy nanáší na destičku barva (elektrostaticky), na pracovní plochu je nanášena vrstvička pryskyřice a po umístění obarvené destičky nad tuto plochu se celá vrstva vytvrdí. Zbýlý materiál je odsát a nahrazen tekutým voskem, tvořící podporu modelu. Nakonec je vrstva zarovnána frézku. Po dokončení modelu je odstraněn vosk, tentokrát chemicky.

Škála použitelných materiálů je v podstatě shodná se stereolitografií, což tuto technologii také znamená, že **je vhodnou pro oblast slévárenství**. Výhodou je lepší struktura povrchu a možnost tvorby i více součástí najednou. Horší je naopak přesnost a také rychlost výroby modelu není příliš vysoká (řádově desítky hodin).

Balistic Particle Manufacturing (BMP) – funguje na principu inkoustové tiskárny, kdy je přes tryskovou hlavu nanášen na plochu termoplast a tvoří se tak jednotlivé vrstvy. Hlava má však 5 stupňů volnosti a tvorba modelu je velmi rychlá. Navíc není třeba žádných podpůrných konstrukcí.

Model Maker 3D Plotting – jedná se v podstatě o BMP s dvěma hlavami, kdy jedna materiál nanáší a druhá jej tvaruje.

Printed Computer Tomography (PCT) – opět obdoba BMP, ale rychlejší.

Multi-Jet Modeling (MJM) – Funguje jako 3DP, pomocí speciální tiskové hlavy s 96 rovnoběžně. Je nanášen termopolymer, tvořící model. Jde o velmi rychlou metodu.

Genesis 3D Pointer – opět se jedná o 3D tisk. Jako materiál slouží polyester.

Hot Plot – princip je podobný, jako u technologie LOM, ale k ořezávání je používána žhavá řezací elektroda.

Shape Meeting – jako stavební materiál jsou používány slitiny niklu. Tento roztavený kov je taven elektrickým obloukem a nanášen na příslušné místo. V podstatě se jedná o jakési postupné navařování součástí. [2, 4]

2 POUŽITÍ METOD RAPID PROTOTYPING VE SLÉVÁRENSTVÍ

Stejně, jako v mnoha ostatních průmyslových odvětvích, roste význam technologií RP i ve slévárenství. V tomto oboru je především o zhotovení prototypového odlitku, k čemuž lze dojít dvojím způsobem:

Nepřímá výroba forem

Nejprve je pomocí některé z technologií RP zhotoven model budoucího odlitku, který je dále opracován do finální podoby. Zde již nastupují klasické slévárenské postupy, kdy na základě modelu teprve vzniká forma nebo skořepina pro odlévání. Do této skupiny je zahrnuta i tvorba jader, vtokových soustav. Také výroba forem pomocí RP, které však v tomto případě slouží pouze ke zhotovení modelu.

Přímá výroba forem

Jak název napovídá, jedná se o zhotovení formy a to pískové, keramické nebo kovové, přímo pomocí některé z metod RP.

2.1 *Nepřímá výroba forem*

Tento postup byl v začátcích rozvoje technologií RP v podstatě jediný možný, jak se dalo dojít až k prototypovému odlitku. To bylo způsobeno především velice omezenými možnostmi při výběru stavebních materiálů pro výrobu modelu (viz. začátky Stereolitografie).

Jak již bylo řečeno, podstata je ve zhotovení tzv. master modelu (modelu budoucího odlitku). Teprve podle něj je klasickými slévárenskými postupy vytvořena buď trvalá, nebo netrvalá forma, určená pro lití. Co se týká sériové výroby, zde bývá určitý mezikrok, kdy se uplatňuje právě výše zmíněná výroba forem pro možnost zhotovení více modelů. Z těch jsou následně vytvořeny slévárenské formy pro lití a celý proces se tím urychlí.

Zaformování modelů může probíhat různým způsobem (všemi dostupnými metodami). Vzhledem k narůstajícím nárokům na vlastnosti odlitků, jako je tvarová složitost, kvalita povrchu, přesnost, minimální nutnost následného opracování a podobně, je pro nás však zajímavá především oblast přesného lití. Metody, používané v této oblasti slévárenství a na které bylo odkázáno již v předchozích odstavcích, si tedy blíže představíme.

2.1.1 *Metoda vytavitelného modelu (Lost Wax)*

Ačkoliv se tato metoda zdá být poměrně nová, pravda je zcela opačná. Pravděpodobně se dokonce jedná o jeden z nejstarších způsobů výroby odlitků vůbec a jde o jednu ze základních technologií přesného lití. To, že je někdy považována za přibližně pouhých 100 let starou metodu je zapříčiněno pouze tím, že byla po staletí opomenuta. Její počátky jsou však odhadovány až do dob 2000 let před našim letopočtem.

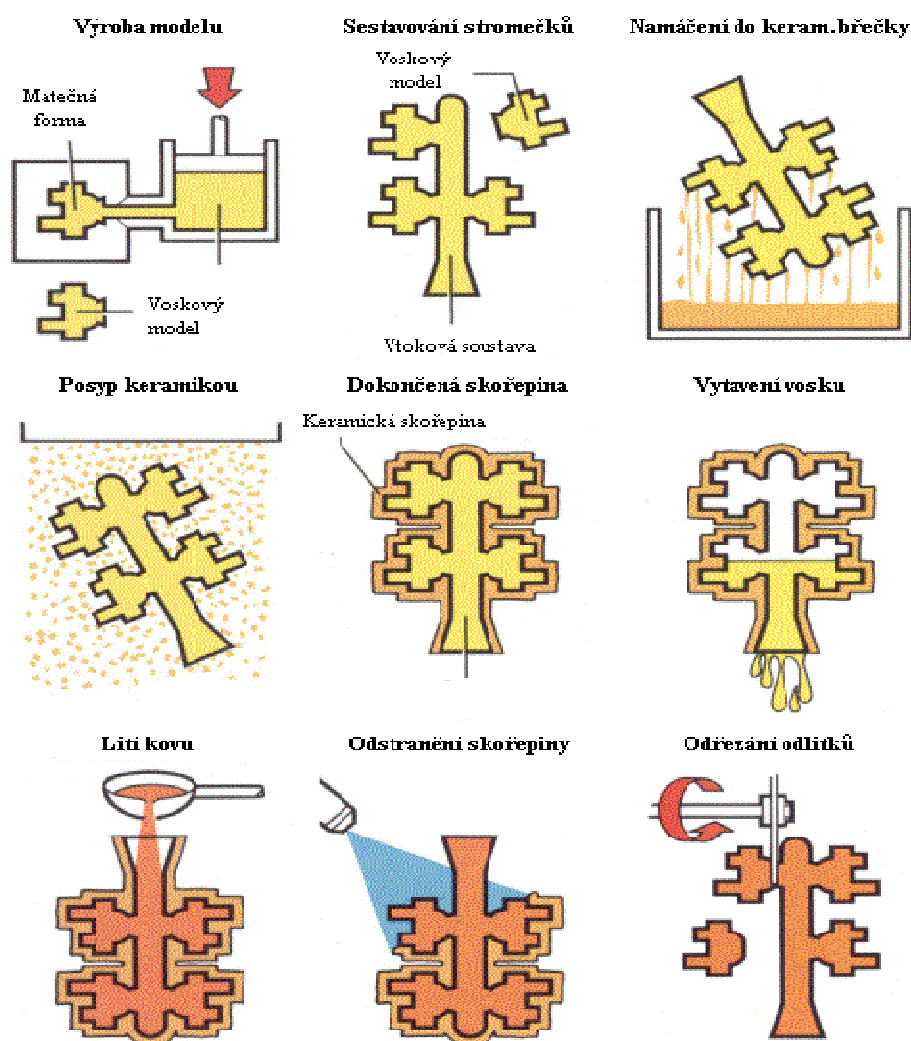


Obr. 2.1 Příklad hrubého (vlevo) a opracovaného odlitku, získaného Lost-Wax technologií [18]

Princip metody:

Základem je výroba modelů z materiálů, které mají nízký bod tání. Proto jsou nejčastěji využívány nejrůznější speciální vosky, určené k tomuto použití. Složení těchto vosků je patentováno a jedná se o složitou směs tak, aby vyhovovala požadavkům sléváren. Z tohoto vosku je pak za pomoci vstříkolisu a formy vytvořen model budoucího odlitku. Materiály používaných forem jsou různé, od různých nízkotavitelných slitin, přes sádrové a plastové formy až po silikonové, jejichž zvláštních a pro slévárenství výhodných vlastností se s úspěchem využívá zejména v poslední době. Formy mohou být zhotoveny buď klasicky nebo pro nás zajímavějším postupem, díky některé z výše uvedených technologií RP.

Poté, co je model hotov, zbývá ještě doplnění vtokové soustavy, případných náliček a podobně. Vzhledem k tomu, že se této metody hojně využívá při výrobě drobných odlitků produkovaných ve větších sériích, bývají tvořeny tzv. „stroměčky“, vznikající lepením jednotlivých modelů na společnou vtokovou soustavu, tvořící jakoby základnu. Takto uspořádaných modelů mohou být na jedné vtokové soustavě desítky.



Obr. 2.2 Postup při výrobě odlitku metodou Lost Wax [19]

Jakmile je stromeček nebo i samostatný model dokončen, následuje výroba samotné formy. V tomto případě se jedná o skořepinu. Skořepina vzniká postupným vrstvením a to tak, že je model střídavě namáčen v tzv. „břečce“, která sklouží jako pojivo a následně posypán keramickým práškem různé zrnitosti. Každá, takto vzniklá vrstva je následně vysušena. Do základních dvou vrstev je použit prášek jemný (zrnitost 0,1 – 0,25mm), aby měl budoucí odlitek co nejlepší povrch (co nejmenší drsnost) a přesnost. Následující vrstvy jsou tvořeny materiálem s hrubšími zrny (zrnitost 0,25 – 0,5mm i více), které naopak zajistí potřebnou tloušťku skořepiny. Počet takto vytvářených vrstev bývá mezi pěti až patnácti s ohledem na velikost modelu.

Po zaschnutí je voskový model vytaven a následuje vypálení skořepiny při teplotách 800 – 1100°C, čímž dojde k jejímu vytvrzení a také vytavení případných zbytků slévárenského vosku. Výhodou je, že forma je po vyjmutí z pece zároveň předežhřátá a snáze se do ní odlévá.

Jakmile je odlitek hotový, přichází na řadu, stejně jako u klasického odlévání, mechanické odstranění formy, což je v tomto případě keramická skořepina. Nejčastěji se využívá vibračního oklepávání nebo otryskávání. Poté následuje odstranění (odřezání) vtokových soustav a nálitků. Stopy po tomto odřezávání jsou následně zabroušeny a začištěny. Někdy je také nutno dodatečně odstranit zbytky skořepiny obzvláště, pokud se jedná o tvarově složitější výrobek se záhyby a podobně. To může být provedeno opět abrazivně nebo i chemickou cestou. [20]

Využití metod RP:

Možnosti využití jednotlivých metod ve slévárenství byly naznačeny již při popisu jich samotných. V podstatě to vyplývá z použitelných materiálů při stavbě modelu a způsobu jeho tvorby.

První z metod, **Stereolitografie**, původně, v případě metody vytavitelného modelu, příliš dobré využití neměla. To bylo způsobeno již zmíněným omezeným výběrem z použitelných materiálů, zvláště pro tento případ se dlouho čekalo na zavedení vhodného materiálu, který by měl pro účely přesného lití metodou Lost Wax potřebné vlastnosti. Nejprve se objevil, materiál **Accura[®] Amethyst[™]**, související s metodou **QuickCast**, používanou právě společností 3D Systéme. Tento materiál již bylo možné použít, ale stále to nebyl materiál určený přímo pro výrobu vytavitelných modelů a tomu také odpovídala omezená možnost použití. Teprve v roce 2005 sestavila se společnost **Solid Concepts** zasloužila o vývoj materiálu, určeného přímo pro potřeby slévárenství. Ten je na trhu pod označením **SC 1000**. Tento materiál má velice dobré vlastnosti a také poměrně nízkou hmotnost, tedy hustotu, což je dobré právě při vytavování modelu, kdy se model ve skořepině tolik nerozpíná. Další nezanedbatelnou výhodou je i cena, což je vzhledem k vyšší náročnosti samotného přístroje velké plus.

Další z metod, **Selective Laser Sintering**, nabízí metodu, zvanou **CastForm[™]**, což je trochu zvláštní způsob, kdy je model vytvořen z porézního materiálu, zvaného **CastForm PS** a teprve poté napuštěn běžným slévárenským voskem. Další postup je stejný až na to, že zde nedochází pouze k vytavení vosku, ale zároveň ke spalování zmíněného materiálu, který jim byl napuštěn.

RealWax[™] - metoda 3D tisku, která v dnešní době představuje možná nejlepšího pomocníka při výrobě prototypového voskového modelu.



Obr. 2.3 Příklad odlitků, vytvořených metodou Lost Wax [21]

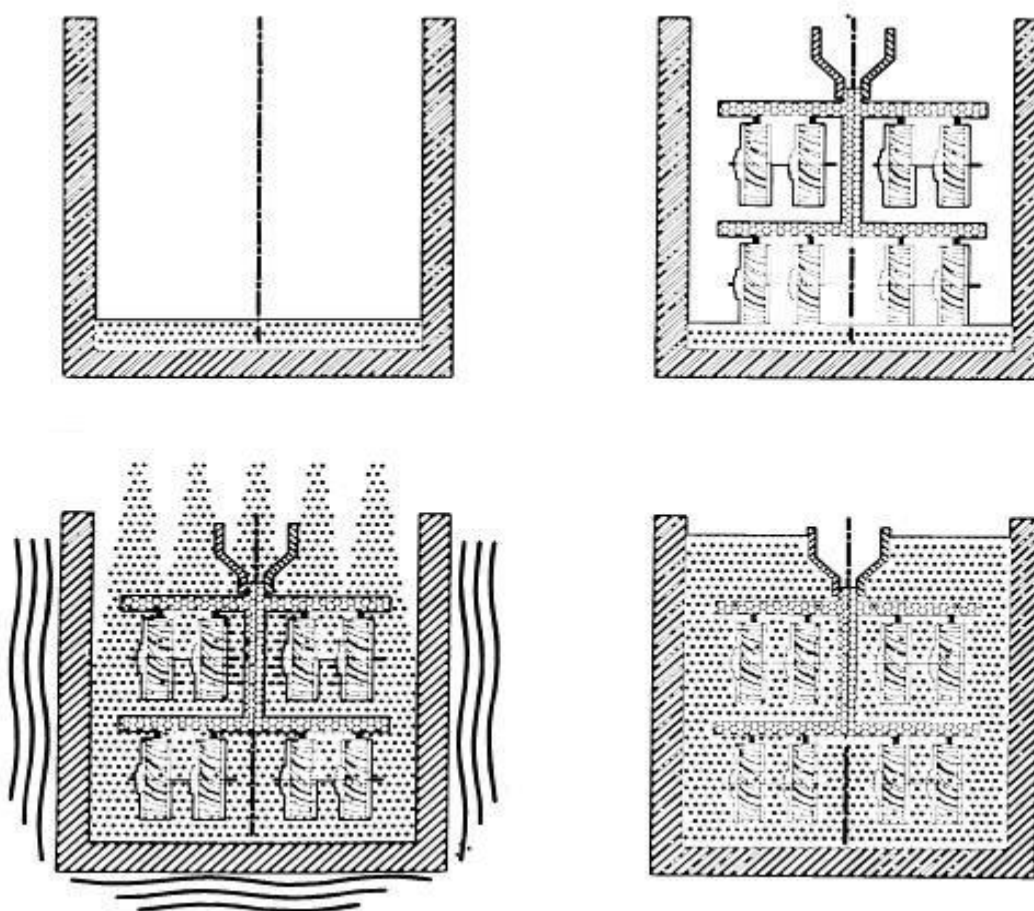
Mezi další použitelné metody patří **Fused Deposition Modeling**. Zde se jako stavebního materiálu používá opět různých vosků, ale je možno využít i ABS, což bylo uvedeno již při popisu samotné metody.

Ani technologie **3D tisku** nezůstávají pozadu. Díky jejich širokým možnostem jsou velmi často pro tyto účely využívány. Zde je navíc výhoda v cenové dostupnosti samotných zařízení, což tuto technologii v podstatě staví na vrchol. Jako nejnázornější příklad je metoda 3D tisku, **RealWax™**. Ta v dnešní době představuje možná nejlepšího pomocníka při výrobě prototypového voskového modelu.

2.1.2 Metoda vypařitelného modelu (Lost Foam)

Jak už název napovídá, metoda je založena na vytvoření modelu ze snadno spalitelného materiálu. K tomu se využívá pěnový polystyren. Model se někdy lepí i z více dílů, zvláště v případě větších a tvarově složitých odlitků.

Stejně jako u předchozí metody je vytvořený model nutno doplnit o vtokovou soustavu (opět ze stejného materiálu) a poté může být zaformován. To se provádí většinou do písku za pomoci vibrací, aby se písek dostal všude tam, kam má. Po zaformování nastává samotné lití. Díky žhavému kovu se model doslova odpaří a odchází v podobě spalin skrz prodyšný písek pryč. Tyto, vesměs jedovaté plyny, se navíc obvykle zapalují, aby došlo k jejich alespoň částečné neutralizaci.



Obr. 2.4 Princip výroby odlitku z vypařitelného modelu [22]

Výhoda je především možnost výroby odlitků s jemnými detaily a tvarově složitými prvky, protože model není nutno vzímat z formy, což je u běžných metod velmi omezeno. Nejsou zde také zapotřebí žádné úkopy, dělicí roviny a podobně.

Využití metod RP:

Při výrobě takového modelu lze využít metodu **Selective Laser sintering**, konkrétně **SLS - Plastic**. Materiál, používaný touto metodou je vhodný i pro modely, díky nimž lze posléze vyrobit keramické formy.

Další možností je třeba metoda **CastForm™**. Tyto modely jsou vhodné především k odlévání kovů s nízkým bodem tání, jako hliník, hořčík, zinek jejich slitiny. Používá se i při odlévání titanových slitin.



Obr. 2.5 Ukázka modelu a z něj vytvořeného odlitku [23]

2.1.3 Metoda vypařitelného modelu (Replicast)

Postup výroby modelu je úplně stejný, jako v předchozí metodě. Jedná se v podstatě pouze o vylepšení výše popsané technologie. Celý model je opět vytvořen z polystyrénového materiálu a taktéž se d úspěchem využívá technologie **SLS – Plastic**.

Vznik modelu je tedy obdobný, ale rozdíl najdeme až v jeho použití, kdy je díky němu vytvořena keramická forma, máčením v keramické lázni. Ta se poté vypaluje, aby došlo k jejímu vytvrzení a díky tomuto procesu je zároveň spálen polystyrénový model. V tomto případě se tedy nejedná o klasické zaformování modelu, ale přecházíme k lití do skořepinové formy.

Toto se sice může zdát, jako zbytečně složitý postup, ale má několik výhod, a to poměrně zásadních. U předchozí popsané technologie Lost Foam bylo totiž zjištěno, že výpary (především uhlík), unikající ze spalujícího se modelu, mohou mít neblahý vliv na kvalitu odlitku. To kvůli pronikání těchto nežádoucích prvků do struktury odlévaného kovu. Dále je zde možnost tvorby modelů s vyšší hustotou a tuhostí. To má pozitivní vliv na dosahovanou strukturu povrchu, která je tím pádem mnohem jemnější. Díky tomuto je také možné vytvářet mnohem objemnější a těžší modely (až stovky kilogramů), bez ztráty dobré přesnosti. [24]

2.1.4 Lití do skořepinových a silikonových forem

Jako technologii, která využívá způsobu lití do skořepinových forem, lze označit již zmíněnou metodu Replicast. Existuje však i zcela odlišný postup, co se týká materiálu modelu, na základě něhož forma vzniká i způsobu tvorby jí samotné.

Při této technologii je použita kovová deska, na které je umístěn kovový model. Proběhne zahřátí na teplotu okolo 250°C a funkční plochy jsou ošetřeny nástřikem silikonového oleje. Ten je důležitý pro to, aby se na model neapekl materiál, tvořící budoucí skořepinu. Ten tvoří směs keramického písku a formaldehydové pryskyřice. Model je připevněn na zásobník s touto směsí, celá sestava se překlápí dnem zásobníku vzhůru na dobu okolo 15s, kdy dojde k natavení pryskyřice a tedy k ulpění určité vrstvy materiálu (který bude tvořit budoucí skořepinu) na modelu. Po vypálení v peci je možno skořepinu z modelu sejmut a použít pro odlévání. Samozřejmě je však nejprve nutno vytvořit druhou část skořepiny stejným způsobem.

Zajímavou technologií je lití do tzv. „silikonové“ formy. Opět je zde použit kovový model, který je natřen speciálním separátorem, aby na něm formovací materiál neulpěl. Ten tvoří speciální dvousložkový materiál, který na vzduchu tuhne. Takto vzniklé formy lze použít pro lití nízkotavitelných kovů, nejčastěji jsou to různé zinkové slitiny. Životnost takové formy je při správné technologii lití i několik set odlitků.

Využití metod RP:

Vzhledem k tomu, že potřebujeme mít k dispozici kovový model, je zde, díky předchozím kapitolám využití metod RP již dopředu jasné. Oproti výrobě kovového modelu klasickým způsobem totiž ušetříme nemalé peníze, ale i čas.

Mezi využitelné metody lze počítat například **Laser Sintering – Metal**. Velmi rychle si pak s problémem poradí technologie 3D tisku, jako třeba **ProMetal 3D Printing** nebo **ZCast®**, které byly stručně popsány již dříve. Tyto metody lze však stejně dobře využít k výrobě forem pro voskové a polystyrenové modely, určené pro lití na vytavitelný a vypařitelný model. Zde je tedy vidět, jak jsou jednotlivé technologie provázané a hlavně je to další důkaz, jak všestranné umí metody RP být. [2, 3, 4]

2.2 *Přímá výroba forem*

Vyrobít formu, použitelnou k odlití a vyzkoušení prototypového odlitku a to bez mezikroku, pouze na základě digitálního modelu, bylo od počátku cílem. Je velkou výhodou a krokem vpřed, že současné technologie RP nám poskytují i tuto možnost.

2.2.1 *Přímá výroba pískových forem*

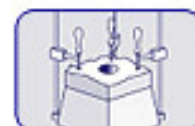
Již při popisu technologie SLS jsme se setkali s názvem **DirectCast**. Toto je označení pro postup, kdy ze speciálního křemičitého materiálu vzniká přímo na pracovní desce příslušného zařízení písková forma pro lití kovů. Pro aplikaci na výrobu prototypu nebo i malé série je tato metoda ideální. Zhotovování forem ve větší sérii by se ale naopak prodražilo a stalo se časově nevýhodné. Vzhledem k tomu, že se v případě technologií RP bavíme výhradně o zhotovování prototypů, není toto třeba brát jako nějaké mínus.



Obr. 2.6 přístroj EOSINT S750, podporující metodu DirectCast [25]

Podobná metoda, která již byla také zmíněna se jmenuje **ZCast®**. Opět jde o výrobu pískové formy, tentokrát však na zařízení, pracujícím s technologií 3D tisku. Používá se speciální písek ZCast 501. Tato metoda je však značně omezena, protože tento materiál nedovoluje odlévání kovů s vyšší teplotou tavení a využívá se tedy spíše pro výrobu odlitků z neželezných kovů.

ZCast[®] Direct metal casting



Obr. 2.7 ukázka postupu výroby odlitku metodou ZCast a výsledná součást [26]

2.2.2 Přímá výroba keramických skořepinových forem

Pro toto využití byla vyvinuta metoda, využívající kombinace 3D tisku a SLS, **Direct Shell Production Casting (DSPC)**. Forma vzniká za použití speciálních prášků a pojiv, které jsou nanášeny tiskovou hlavou, ale následně ještě slinovány laserem. Po dokončení modelu následuje standardně jeho vypálení pro vznik pevné skořepiny, která odolá teplotě roztaveného kovu. Keramický prášek však není jedinou možností a je zde na výběr z více druhů na bázi karbidů křemíku, oxidu hliníku, zirkonu, křemenů apod. Výběr materiálu obvykle závisí na použití formy. Respektive, jaký materiál do ní bude odléván. Ve všech případech je velikou výhodou možnost vytváření i jemných detailů a je dosahováno vysoké kvality povrchu. [3]

3 ZÁVĚR

Předchozí stránky se zabývají nejpoužívanějším technologiím, přicházejících na řadu v případě rychlé přípravy prototypového odlitku. Vybrány byly ty, které danou problematiku nejlépe vystihují, jsou nejvíce rozšířené a na nichž je možno názorně popsat jednotlivé postupy.

Nejprve je pozornost zaměřena na jednotlivé technologie Rapid Prototyping. Některé byly zdůrazněny více a jiné méně s ohledem na to, jaký potenciál jsou schopny v oblasti nabídnout, což je zároveň u každé z těchto metod naznačeno. V druhé části jsou již přiblíženy jednotlivé slévárenské postupy a zároveň možnosti, kterých je možno na základě jejich kombinací s technologiemi RP dosáhnout. Účel této práce není výčet všech dostupných a použitelných metod, ale nastínění dané problematiky na základě nejpoužívanějších technologií, od kterých jsou v podstatě všechny dnes známé postupy odvozené a jediným rozdílem bývá název, pod kterým daná společnost tuto technologii prezentuje.

Nejdůležitější je význam technologie RP obecně, což je rychlost a v porovnání s konvenčními metodami i finanční nenáročnost výroby prototypové součásti, která je nutná pro nastartování sériové výroby. Tato příprava výroby se tímto stává až několikanásobně rychlejší a levnější, než tomu bylo dříve. K těmto účelům je v současnosti nejvíce využíván 3D tisk, ať už je model tvořen z materiálů kovových, plastových nebo keramických, což je dáno především výhodným poměrem mezi výkonem a cenou zařízení. V případě nutnosti dosažení vyšší přesnosti však některé metody patřící do oblasti 3D tisku stále pokulhávají a zde přichází na řadu ostatní metody RP. Z tohoto důvodu se dá říci, že směr ve vývoji těchto zařízení je jasný, a to zlepšit dosahovanou kvalitu modelů při zachování nebo dokonce zvýšení rychlosti jejich výroby a snížení nákladů jak na zařízení, tak na samotný provoz.

V současnosti je již nasazení RP opravdu velké a některé ze zařízení je možno najít téměř v každé větší slévárně. Jejich pozice je totiž nezastupitelná a zvláště pro metody přesného lití nachází velkého uplatnění. Nejlepším příkladem je právě poslední kapitola, přímá výroba forem, což se mohlo ještě před dvaceti lety zdát jako hudba daleké budoucnosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Přesné odlitky* [online]. c2006 [cit. 2010-04-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.presne-odlitky.cz/foto.html>>.
2. 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/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil>>.
3. GRIMM, Todd. *User`s guide to rapid prototyping. Gogole Knihy* [online]. 2004, [cit. 2010-04-06]. Dostupný z WWW: <http://books.google.cz/books?id=o2B7OmABPNUC&pg=PA14&lpg=PA14&dq=historie+rapid+prototyping&source=bl&ots=t7pN4GE1d1&sig=58Jpl265cg9v6hzXBOP26STyrk&hl=cs&ei=li4NTPmJGoGbOITSgNUP&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=12&ved=0CFwQ6AEwCw#v=onepage&q&f=false>.
4. ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění 10. díl. *MMspektrum* [online]. 2008, č. 12 [cit. 2010-04-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil>>.
5. Princeton University, Ceramic Materials Laboratory. *Ceramic/polymer Composite Materials through Stereolithography* [online]. c2001 [cit. 2010-04-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.princeton.edu/~cml/html/research/stereolithography/>>.
6. *3D Systems* [online]. 1997-2009 [cit. 2010-04-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.3dsystems.com/>>.
7. *stereolithography.com* [online]. 2010 [cit. 2010-04-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.stereolithography.com/image-gallery.php>>.
8. *Alphaform* [online]. c1996-2010 [cit. 2010-05-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.alphaform100.de/english/case-studies/customizing/Designkonzept.html>>.
9. *Rapid Prototyping technology as used on the Bombe Rebuild Project* [online]. 1997-2002 , 2002 [cit. 2010-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.jharper.demon.co.uk/rptc01.htm>>.
10. *boingboind.net* [online]. 2010 [cit. 2010-05-07]. Dostupný z WWW: <<http://gadgets.boingboing.net/2009/04/07/3d-printer-art-draft.html>>.
11. *DiSanto Technology, Inc* [online]. c2006 [cit. 2010-05-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.disanto.com/images>>.

12. *CustomPartNet* [online]. c2009 [cit. 2010-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>>.
13. *CustomPartNet* [online]. c2009 [cit. 2010-05-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>>.
14. *REPLICATOR* [online]. c2009 [cit. 2010-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://replicatorinc.com/blog/2009/11/5000-printer-available-now-for-a-limited-time/>>.
15. *CustomPartNet* [online]. c2009 [cit. 2010-05-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>>.
16. *EARCH.ITEKT* [online]. c2008-2010 [cit. 2010-05-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.earch.cz/clanek/3946-3d-tisk-zkusenosti-atelieru-fosterpartners.aspx>>.
17. *Protocom* [online]. c2008 [cit. 2010-05-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.protocom.cz/reseni/rapid-prototyping-cad/#startphoto=0>>.
18. *Lestercast* [online]. c2009 [cit. 2010-05-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.lestercast.co.uk/?i=21608>>.
19. CHARVÁT , Ondřej, HORÁČEK, Milan. *Možnosti aplikace metod RP s použitím technologie vytavitelného modelu*. [s.l.] : [s.n.], 2007. 47 s.
20. *SLÉVÁRENSTVÍ*, Č. 1, Brno: Svaz sléváren České republiky, 2005. ISSN 0037-6825.
21. *Ningbo YinZhou YuanJie Machinery Co., Ltd.* [online]. c2008 [cit. 2010-05-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.aldiecasting.com>>.
22. *Alibaba.com* [online]. c2009-2010 [cit. 2010-05-20]. Dostupný z WWW: <<http://news.alibaba.com/article/detail/metalworking/100186560-1-metals-knowledge%253A-al-si-alloy-casting.html>>.
23. *Directory Listing* [online]. c2005 [cit. 2010-05-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.poespoes.nl/log/lost%20foam%20engine%20block.jpg>>.
24. Castings Technology International. *Castings Technology International* [online]. [2009] [cit. 2009-05-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.castingstechnology.com/>>.
25. *CeeIndustrial* [online]. c2009 [cit. 2010-05-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.ceeindustrial.com/ro/company/products/letter/E>>.

26. Castings Technology International. *Castings Technology International* [online]. [2009] [cit. 2009-05-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.castingstechnology.com/>>.
27. *4CEngineering* [online]. c2005 [cit. 2010-05-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.4c.com.tr/en/metalmould.asp>>.
28. *SLÉVÁRENSTVÍ*, Č. 1-2, Brno: Svaz sléváren České republiky, 2008. ISSN 0037-6825.
29. *SLÉVÁRENSTVÍ*, Č. 9-10, Brno: Svaz sléváren České republiky, 2008. ISSN 0037-6825.