



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MOŽNOSTI UPLATNĚNÍ MODERNÍCH
METOD PŘI VÝROBĚ PROTOTYPOVÝCH
ODLITKŮ

POSSIBILITIES OF USING MODERN METHODS IN MANUFACTURING OF
PROTOTYPE CASTINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Maincl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **David Maincl**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Milan Horáček, CSc.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Možnosti uplatnění moderních metod při výrobě prototypových odlitků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Literární rešerše problematiky zhotovení prototypových odlitků za pomoci nových moderních metod RP

Cíle bakalářské práce:

Získání literárního přehledu nejmodernějších způsobů zhotovení prototypových odlitků

Seznam literatury:

Beeley, PR., Smart, RF. (1995): Investment Casting. Cambridge: The University Press, 486 p. ISBN 0 901716 66 9.

Doškář, J., Gabriel, J., aj. (1976): Výroba přesných odlitků. Praha: SNTL, 315 s. DT 621.746.

Campbell, J. (1991): Castings. Oxford: Butterworth – Heinemann, 288 p. ISBN 0 7506 1072.

Oti, J.A. (2002): The Science, Mechanics and Construction of Investment Casting Tooling without Rework. In: Proceedings of the 50th ICI Conference. Chicago, p. 85-96.

Wimpenny, D. (2004): RP – a route to rapid castings. In: Proceedings of the 11th World Congress on Investment Casting. Edinburgh, p. 120-135.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Rapid prototyping je soubor technologií, který je nezbytnou součástí odvětví moderního slévárenství. Umožňuje zkrácení doby mezi poptávkou a zhotovením prototypu součásti. Cílem této práce je vypracovat literární rešerši zaměřenou na aplikaci těchto technologií ve slévárenství při výrobě prototypových odlitků.

Klíčová slova

slévárenství, rapid prototyping, 3D tisk, model, forma, odlitek, stereolitografie, selective laser sintering, fused deposition modeling, laminated object manufacturing

ABSTRACT

Rapid prototyping is a set of technologies , which is an essential part of modern foundry industry . It allows you to shorten the time between demand and fabrication of prototype parts. The aim of this work is to develop a literature search focused on the application of these technologies in the foundry manufacturing of prototype castings.

Key words

Foundry, rapid prototyping, 3D print, pattern, mould, casting, stereolithography, selective laser sintering, fused deposition modeling, laminated object manufacturing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAINCL, David. *Možnosti uplatnění moderních metod při výrobě prototypových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 43 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Možnosti uplatnění moderních metod při výrobě prototypových odlitků* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 21. 5. 2016

.....

David Maincl

PODĚKOVÁNÍ

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

Obsah:

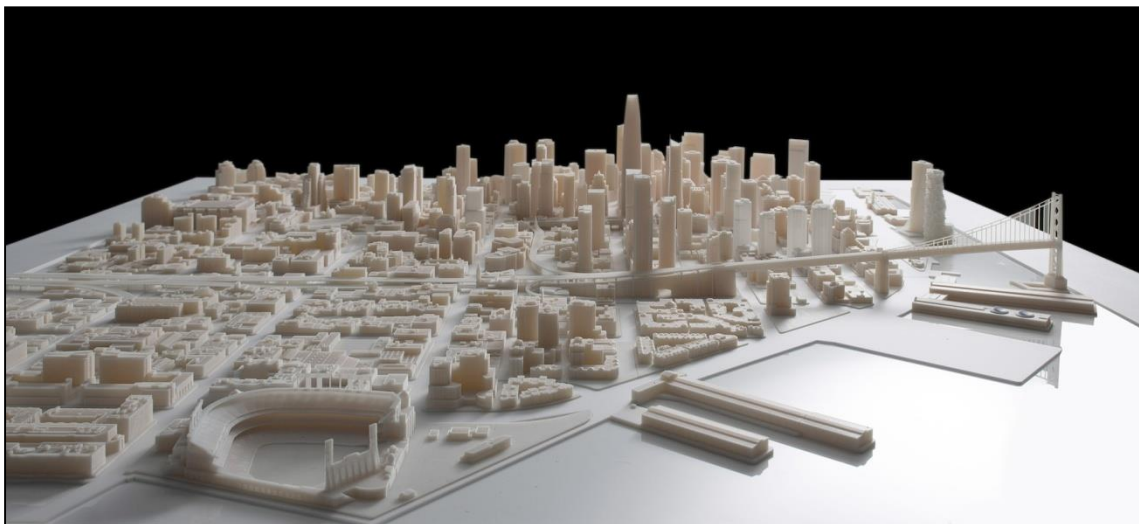
Úvod	8
1 Rapid Prototyping	9
1.1 Preprocessing	9
1.2 Processing	9
1.3 Postprocessing	10
2 Metody založené na tekutém základě (Liquid Based)	11
2.1 Stereolitography Apparatus (SLA)	11
2.2 Solid Ground Curing (SGC).....	14
2.3 Rapid Freeze Prototyping (RFP)	15
3 Metody založené na pevném základě (Solid Based)	17
3.1 Laminated Object Manufacturing (LOM)	18
3.2 Fused Deposition Modeling (FDM)	20
3.3 Multi-Jet Modeling (MJM).....	22
4 Metody založené na práškovém základě (Powder Based)	23
4.1 Selective Laser Sintering – SLS	23
4.2 Three – Dimensional Printing (3DP)	26
5 Uplatnění rapid prototypingu ve slévárenství.....	28
5.1 Nepřímá výroba forem	28
5.1.2 Quickcast	33
5.1.3 Castform	34
5.1.4 Repliwax	34
5.1.5 Metoda vypařitelného modelu Full Mold	35
5.1.6 Metoda spalitelného modelu Replicast.....	35
5.2 Přímá výroba formy.....	35
5.2.1 Přímá výroba pískových forem a skořepin	35
5.2.2 Přímá výroba keramických skořepinových forem	37
Závěr	38

ÚVOD

Žijeme v době, která je velice uspěchaná, kde jsou kladeny vysoké nároky na výslednou kvalitu a cenu. Je pravda, že čas jsou peníze a proto je technologie Rapid Prototyping vysoce využívána nejen ve strojírenském průmyslu.

Úkolem této technologie je vytvoření reálného modelu budoucího výrobku za co možná nejkratší dobu a v co nejlepší kvalitě. Pomocí této technologie jsme schopni vytvořit ve velice krátké době i tvarově složité součástky a ušetřit nemalé finanční náklady.

Cílem bakalářské práce je shrnout moderní metody Rapid Prototypingu, které se dnes využívají při výrobě prototypových odlitků. V této práci budou vysvětleny základy a principy výroby pomocí jednotlivých technologií, jejich výhody i nevýhody a následně jejich využití ve slévárenství.



Obr. 1 Ukázka města vytisknutého 3D tiskárnou [38]

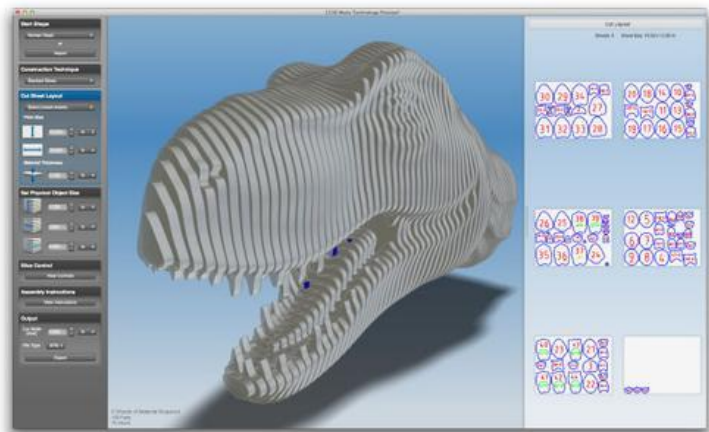
1 RAPID PROTOTYPING [1,3,4]

Mnoho technických, vědeckých či uměleckých objektů jsou příliš složité, aby mohly být správně pochopeny skrz výkres nebo obrázek. Díky již dostupným rapid prototyping technologiím můžeme vytvořit prostorové modely, na které si můžeme sáhnout a prozkoumat je ze všech možných úhlů. RP je technologie, která funguje na základě vytváření modelu po jednotlivých vrstvách z CAD dat. Celý model je vytvořen z mnoha tenkých vrstev, které jsou kladeny jedna na druhou. Metody RP se od sebe odlišují především rozdílným fyzikálním principem při tvorbě jednotlivých vrstev. Těmito technologiemi se dají vyrobit součásti se složitou vnitřní geometrií, žebry, otvory a tvarově složitými stěnami. V současnosti se díky RP vytváří i kromě modelů a prototypů také nářadí a formy pro malosériovou výrobu. Využívá se také v kosmickém, leteckém, zbrojním, lékařském a automobilovém průmyslu.

Postup při RP bývá obvykle dělen do tří částí označovaných jako preprocessing, processing a postprocessing.

1.1 Preprocessing [2,5,6]

Preprocessing zahrnuje vše od postupů až po tvorbu součásti v některém CAD/CAM systému. Vymodelovaná součást se převede do STL formátu, což je proces, při kterém se objemový model převede na polygonální model. Tento model se skládá z obrovského množství trojúhelníků, které jsou aproximovány s nastavitelnou přesností, tzn. že hodně komplexní a složité tvary, které obsahují malé poloměry je nutné aproximovat ještě větším množstvím menších trojúhelníků pro zajištění co nejpřesnějšího tvaru součásti. Tento objekt vytvořený z trojúhelníkové sítě je následně překontrolován a případně opraven, protože v závislosti na mnoha faktorech se v modelu během konverze mohou vyskytnout nechtěné struktury. Dalším krokem je rozdělení modelu do jednotlivých horizontálních řezů s konstantní tloušťkou, čímž je částečně určena přesnost hotového modelu. Posledním krokem v preprocessingu je vygenerování dráhy nástroje a podpůrných struktur, které můžeme ovlivnit vhodným natočením modelu.



Obr. 2 Ukázka možného preprocessingu [39]

1.2 Processing [2,5,6]

Processing představuje fyzickou výrobu součástí. Většina RP technologií má tuto operaci plně automatizovanou a proto nevyžaduje přímý dohled pracovníka. Proces zhotovení součásti je časově velice náročný a může trvat řádově hodiny i dny, v závislosti na velikost a složitosti a počtu součástí.

1.3 Postprocessing [2,5,6]

Postprocessing je poslední částí výroby RP. V této fázi se obvykle provádí nutné manuální operace jako vyjmutí součásti, odstranění podpor a dokončovací operace např. očištění povrchu, odstranění přebytečného zachyceného materiálu, broušení, pískování. Některé metody vyžadují ke zvýšení pevnosti vytvrzení např. UV zářením nebo impregnací jinou látkou.



Obr. 3 Vytisknutá součást [39]

2 METODY ZALOŽENÉ NA TEKUTÉM ZÁKLADĚ (LIQUID BASED) [3,6]

V těchto metodách, které jsou známé také jako metody vytvrzovací je materiál v počátečním stavu v tekuté formě, ze které je následně pomocí různých postupů, které budou popsány níže přeměněn do pevného stavu.

Většina těchto metod využívá pro výrobu dílů kád' s vytvrditelnou tekutou pryskyřicí, která díky působení koncentrovaného laserového paprsku způsobí ztuhnutí materiálu. Laser působí pouze na vrstvu, která je nejbližší k hladině materiálu, kde vytváří tvrdou vrstvu. Po skončení jedné vrstvy se kád' posune na ose Z o velikost jedné vrstvy a proces se opakuje, dokud není dokončena poslední vrstva. Existuje spousta různých variací na tuto techniku, které se liší použitým typem laseru, typem pryskyřice, zvedacím systémem nebo použitým optickým systémem.

Do této kategorie řadíme například tyto metody:

- Stereolithography Apparatus (SLA)
- Solid Ground Curing (SGC)
- Solid Creation System (SCS)
- Rapid Freeze Prototyping (RFP)
- Solid Object Ultraviolet-Laser Printer (SOUP)
- Soliform systems
- Light sculpting
- Aaroflex
- Two laser beams

2.1 Stereolithography Apparatus (SLA) [5,6,7,8,9]

Jedná se o jednu z nejpřesnějších metod RP a zároveň první komerčně používanou metodu. Tuto metodu uvedla na trh společnost 3D systems v roce 1988. Tato společnost patří dodnes k největším průkopníkům a dodavatelům různých 3D tiskáren.

Stereolitografie je v současnosti jednou z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších metod pro výrobu prototypových plastových modelů. Tato metoda vyniká nejen vysokou přesností, ale také možností použití velkého množství různých materiálů, např. akryláty, epoxidy a plněné pryskyřice. Další velkou výhodou oproti jiným metodám je schopnost vytvářet modely s milimetrovými otvory a miniaturními prvky. Stejně jako u většiny ostatních technologií RP je možno modely vyrobené touto technologií použít nejen pro vizuální kontrolu výrobku, ale v některých případech dokonce i k funkčním zkouškám. Díky možnosti použití široké škály materiálů můžeme tuto metodu použít i k výrobě forem pro vstřikování, přesné lití a lití do písku. Tato metoda byla revoluční, protože díky ní můžeme vyrábět některé modely v řádech hodin či dní, ale konvenčními metodami bychom je vyráběly několik dní, či dokonce týdnů.

Princip této metody spočívá ve schopnosti speciálních akrylátových nebo epoxidových pryskyřic po osvětlení UV zářením se vytvrdit. Stavební materiál je uložen v nádrži, na jejíž

hladinu je zaměřen tenký laserový paprsek UV záření. V místě dopadu paprsku je stavební materiál vytvrzen a po dokončení dané 2D vrstvy se posune celá platforma o zadanou vrstvu v ose Z směrem dolů. Zároveň se tím vytváří i podpůrná síť, kterou automaticky vygeneruje příslušný program v počítači a musí být tvořena tak, aby udržela celou součást a zároveň aby se dala snadno odstranit z výsledné součásti. Toto se opakuje tolikrát, dokud není dokončena poslední vrstva. U stereolitografie i u jiných RP metod slouží první vrstvy k připevnění budoucí součásti na pevnou perforovanou desku, která se v nádrži pohybuje směrem dolů. Poté co je vykreslena celá vrstva, tak se tato podložka i s již vytvořenou částí součástky ponoří pod hladinu daného stavebního materiálu přesně o tloušťku jedné vrstvy. Tloušťka jedné vrstvy bývá 0,1 – 0,2 mm. Limitujícím parametrem pro velkou tloušťku vrstvy je výkon laseru a schopnost materiálu se dostatečně vytvrdit v dané tloušťce. Většinou se používají pevnolátkové nebo plynové lasery, jejichž záření je případně změněno krystalem na potřebnou vlnovou délku. Díky velké intenzitě dodaného UV světla dochází k vytvrzení velmi rychle. Dle typu přístroje se pohybuje rychlost vytvoření jedné vrstvy v řádech desítek sekund až jednotek minut.

Nevýhodou této technologie může být relativně pomalý proces vytvrzování polymerů a také menší tepelná odolnost některých materiálů. Dále je ještě třeba myslet hned na začátku na zakomponování potřebných podpor a po dokončení výrobku také na jejich snadné odstranění. Před odstraněním podpor se součást nejdříve omývá od zbylého polymeru a po odstranění podpor bývá součást ještě dovytvrzena pomocí UV záření a poté broušena, či obráběna. Na závěr zpravidla dochází k celkové povrchové úpravě formou barvením, lakováním nebo galvanickým pokovením.

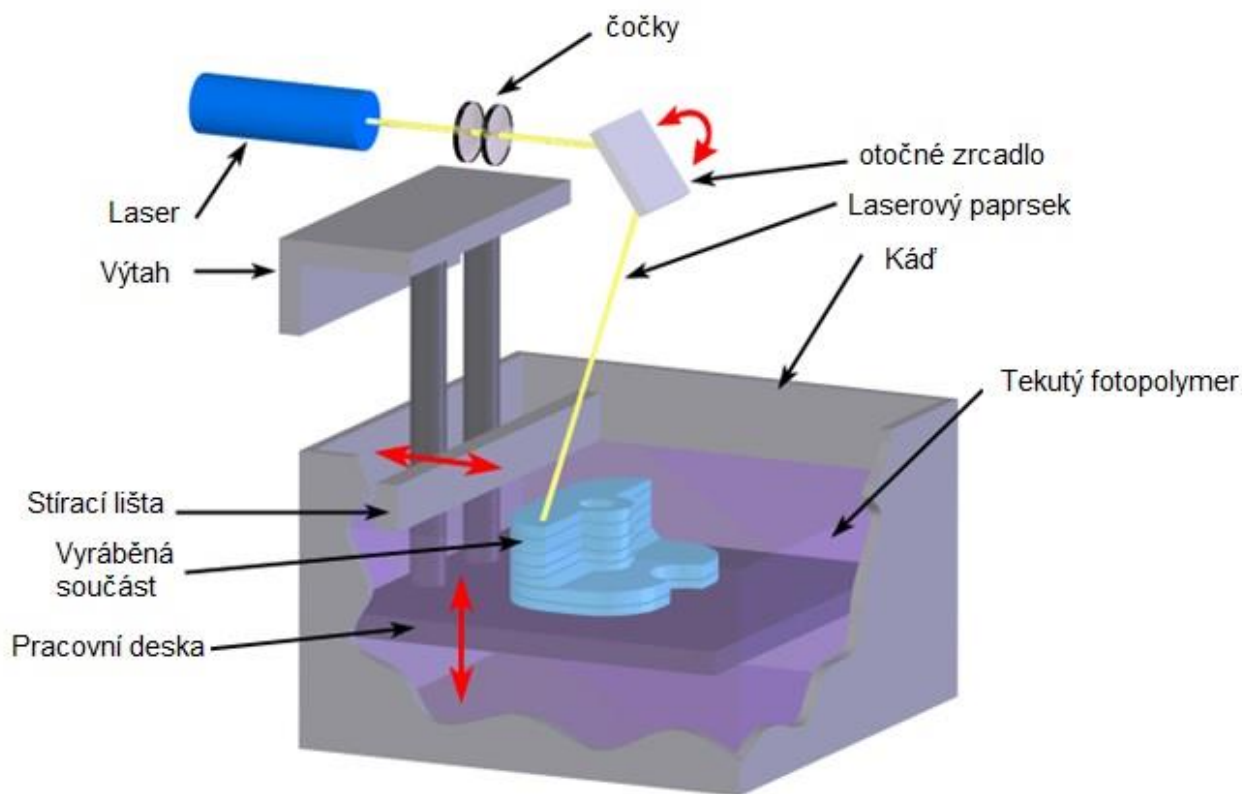
Materiály:

Akryláty – dříve používané materiály na bázi akrylátu se již dnes nepoužívají, protože měli vlastnost vysoké smrštitivosti a s tím je spojená vyšší nepřesnost modelů. Akryláty také nejsou nejvhodnější s ohledem na životní prostředí.

Epoxidy – oproti akrylátům se vyznačuje minimální smrštitivostí a tedy velmi vysokou přesností a proto je velice často využíván.

Plněné pryskyřice – tento druh materiálu je ve stereolitografii dnes nejpoužívanějším materiálem, protože jeho hlavní výhodou oproti ostatním materiálům je možnost obohacení pryskyřičného základu o kovové nebo keramické materiály a díky tomu získá výsledná součást mnohem lepší mechanické vlastnosti.

Dále existují další materiály pod různým označením jednotlivých firem. Tyto materiály mají různé vlastnosti a mohou být jako pevné, tak i ohebné či různě zbarvené.



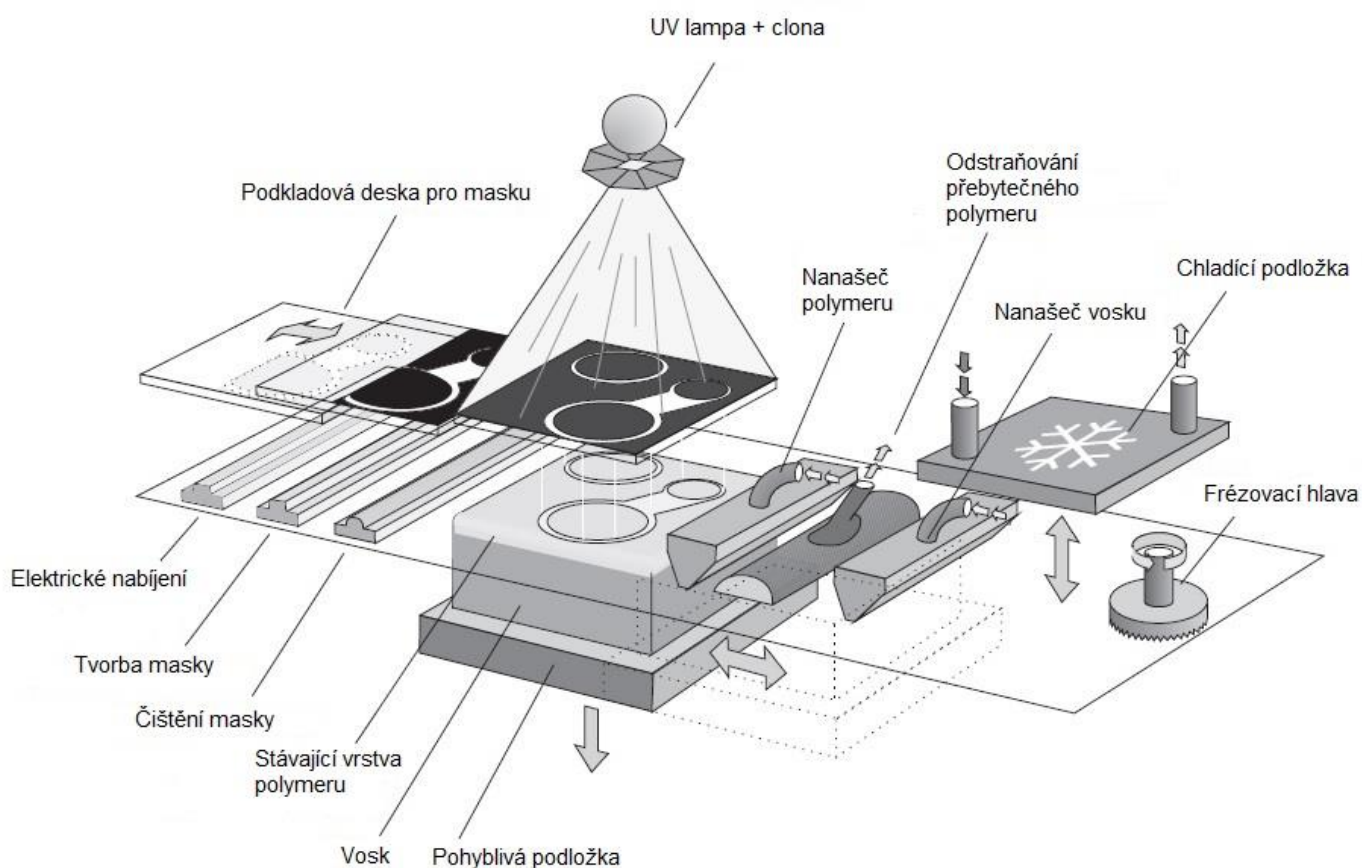
Copyright © 2008 CustomPartNet

Obr. 4 Schéma metody SLA [6]

Výhody	Nevýhody
Automatizovaný výrobní proces – není potřeba neustálý dozor a může být využíváno nepřetržitě.	Křehké díly – musí se opatrně odebrat manuálně podpůrné struktury a hrozí poškození součástí
Dobrá povrchová drsnost	Uzavřené objemy
Vysoká přesnost (+/- 0,05 mm)	Je nákladné mít velkou vanu s pryskyřicí
Relativně široká paleta použitelných materiálů	Je zapotřebí dalšího vytvrzování po vytvoření součástí

2.2 Solid Ground Curing (SGC) [3,5,6,7,10,11]

Tato metoda funguje podobně jako metoda SLA, tzn. že jako materiál se používá také tekutý opticky vytvrditelný polymer, který se postupně vytvrzuje ve vrstvách. Rozdíl ale spočívá v principu, kdy u této metody na rozdíl od SLA je celá vrstva vytvořena na jedno nasvícení UV světlem. Součástí jsou vyráběné vrstvy po vrstvách za pomoci tzv. masek. Masky jsou nejčastěji tvořeny skleněnou destičkou, na které je vyznačený obrys vytvářené vrstvy. Celá vrstva je vytvořena naráz a probíhá ve dvou samostatných a současně probíhajících cyklech. Jako první je vytvořena negativní maska a potom dojde k osvětlení fotopolymeru, který ztvrdne a neosvětlený tekutý fotopolymer je odsáván pryč a vzniklý meziprostor je ihned vyplněn voskem. Poté následuje opracování vzniklé vrstvy na požadovanou výšku vrstvy a tím jsou oba cykly ukončeny a celý proces se může znovu opakovat, dokud se nedokončí poslední vrstva. Vosk zůstane ve vytvořeném tělese až do konce procesu a potom se chemickou cestou pomocí kyseliny citrónové odstraní.



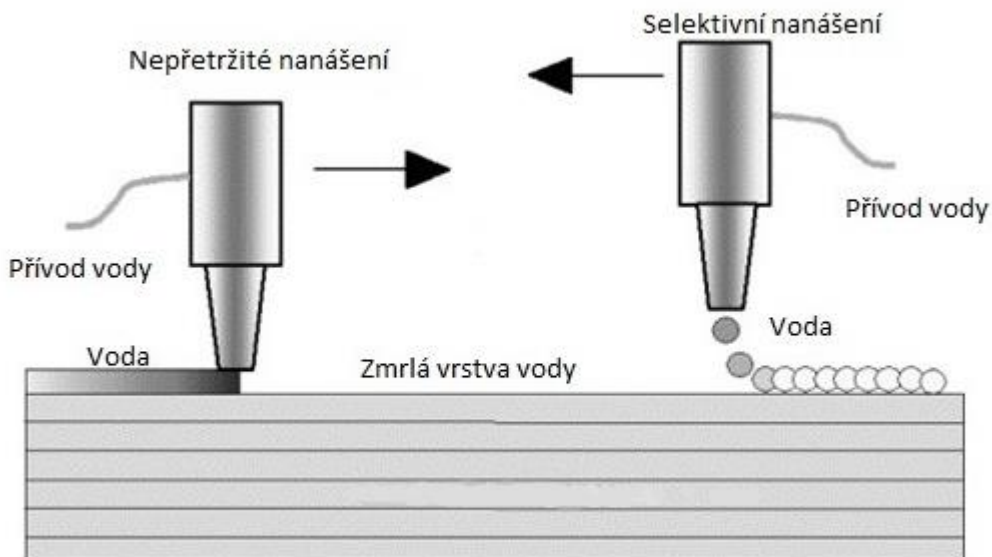
Obr. 5 Schéma metody SGC [6]

Výhody	Nevýhody
Vysoká produktivita	Vysoké nároky na pracovní prostředí
Lze vyrábět více součástí naráz	Zařízení je velice hlučné a prostorné
Není zapotřebí podpůrných struktur	Vyžaduje častou údržbu
Složitost tvaru nemá vliv na rychlost	Finančně náročnější metoda
Minimální smršťování a vysoká přesnost	Vosk se špatně dostává ze štěrbin a rohů

2.3 Rapid Freeze Prototyping (RFP) [3,6,12,13,14]

Většina existujících RP metod je relativně drahá a ne moc šetrná k životnímu prostředí, protože produkuje nežádoucí vedlejší produkty, jako je např. kouř, prach nebo jiné nebezpečné chemikálie. Cílem této metody je zajistit levnější náklady a menší zatěžování životního prostředí. Tato metoda má oproti vytavitelnému nebo vypařitelnému modelu několik výhod, které jsou spojené se snížením nákladu, s vysokou kvalitou povrchu a nepraskající skořepinou.

Princip této metody je obdobný ostatním metodám, tzn. postupně vytváříme vrstvu po vrstvě, akorát s tím rozdílem, že nanášíme na sebe kapičky vody, které nám po zmrznutí vytvoří součást. Používají se 2 způsoby nanášení vody. První způsob je nepřetržité nanášení vody, kdy je voda tryskána na předchozí vrstvu. Druhý způsob je selektivní nanášení vody a to nám umožňuje nanášet kapičky vody jen, když je to třeba.



Obr. 6 Možnosti nanášení vody [6]

Funguje to tak, že nádrž, ve které vzniká model je permanentně udržovaná při teplotě menší než $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. V nádrži se nachází stůl, který se pohybuje po ose Z nahoru a dolů a na který se postupně nanáší jednotlivé vrstvy. Jakmile je vrstva zmrazená, stůl se posune o danou vrstvu směrem dolů a celý proces pokračuje znovu. Jako stavební materiál se používá voda a jako podpůrný stavební materiál na výroby podpěr se používá cukerný roztok, který má teplotu tání $-5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po dokončení se celá součást nechá v místnosti, kde je teplota mezi teplotou tání podpěrného materiálu a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 7 Součást včetně podpor [3]



Obr. 8 Součást s rozpuštěnou podporou [3]

Zde na obrázku vlevo vidíme hotovou součást včetně podpor z cukerného roztoku a hned vedle součást již s rozpuštěnou podporou.

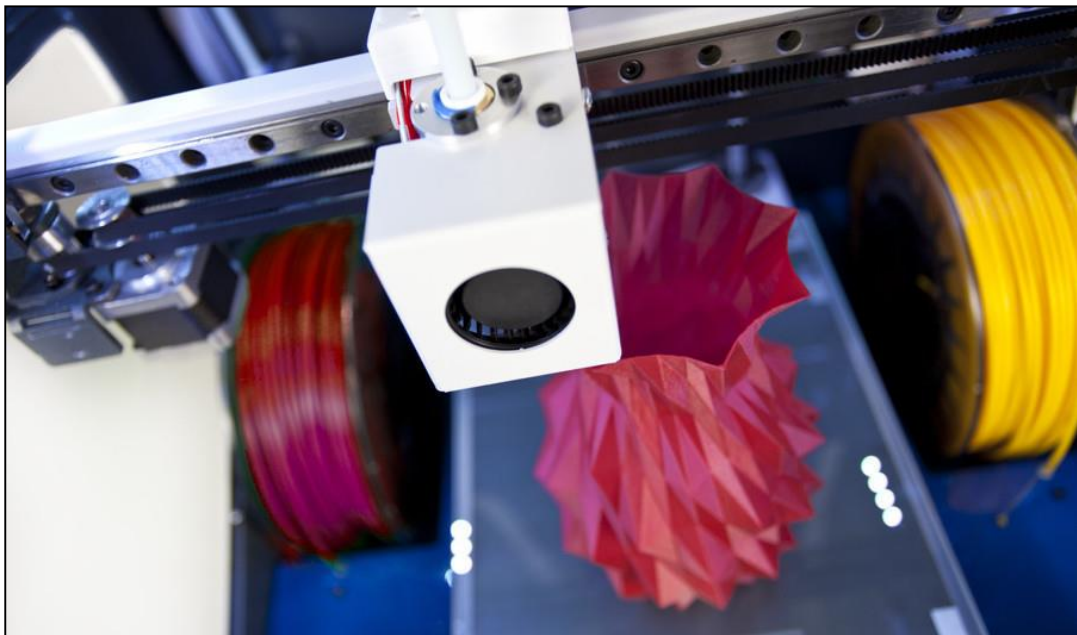
Výhody	Nevýhody
Nízké výrobní náklady	Vyžaduje mrazivé prostředí
Dobrá přesnost a kvalitní povrch	Vyžaduje pokaždé ruční dokončení modelu
Rychlá výroba součástí	Horší opakovatelnost
Šetrné k životnímu prostředí	Hotový díl musí být uchován v chladu

3 METODY ZALOŽENÉ NA PEVNÉM ZÁKLADĚ (SOLID BASED) [3,6]

RP metody pracující s pevným základem jsou od metod pracujících s tekutým materiálem velice odlišné a jsou i mnohem různorodější v porovnání mezi sebou samými. Některé metody také využívají laseru, další zase jiných vlastností materiálu. Jejich společným znakem, jak už název skupiny říká je stavební materiál v pevném skupenství. Tento stavební materiál se zpracovává v mnoha formách a tvarech, nejčastěji jako drát, laminát, kuličky, role nebo svitky.

Do této kategorie řadíme například tyto metody:

- LOM
- FDM
- PLT
- MJM
- SSM
- MEM

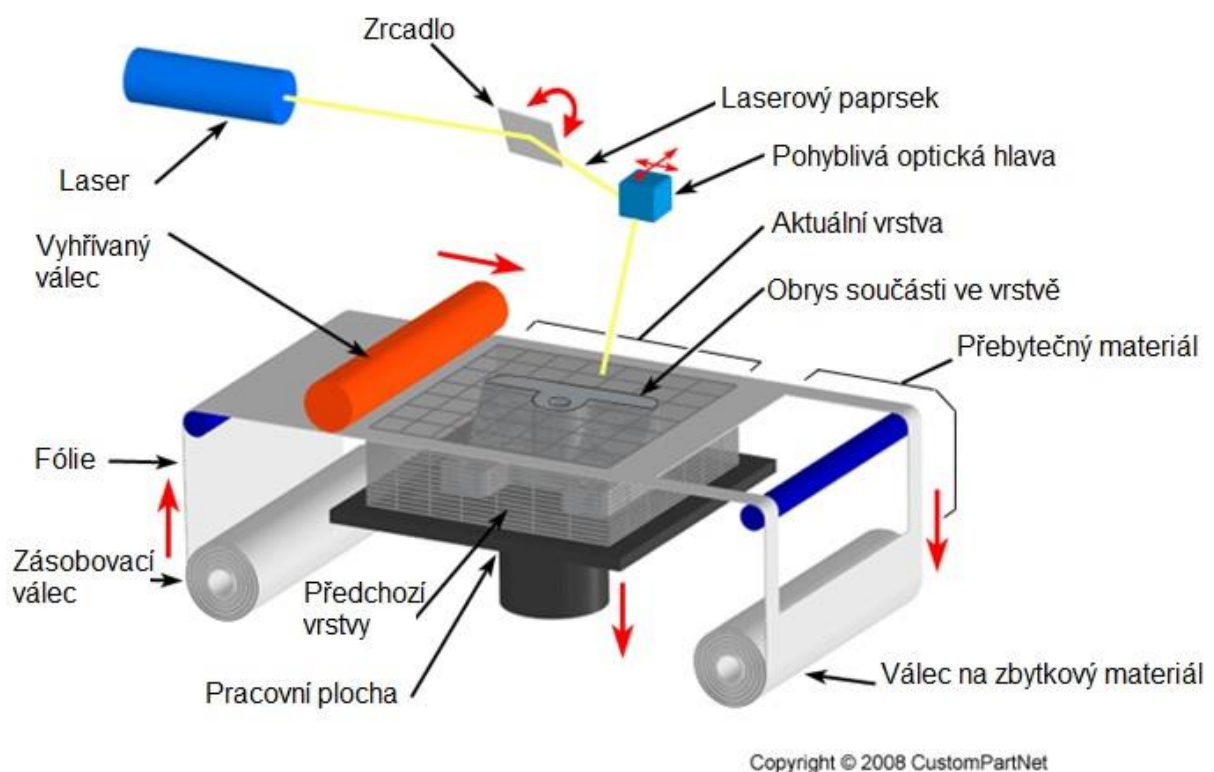


Obr. 9 Ukázka metody založené na pevném základě [40]

3.1 Laminated Object Manufacturing (LOM) [3,6,9,16 ,19]

Tato metoda byla vyvinuta roku 1995 a model je sestavován z folií, které mohou být z různých materiálů od papíru, přes plast až po kov. Během procesu jsou jednotlivé vrstvy materiálu spojovány dohromady za pomoci tepla a tlaku a poté jsou řezána do požadovaného tvaru za pomoci počítačově řízeného laserového paprsku nebo nože.

Jako u všech metod RP potřebujeme prvně CAD model, který musí být převeden do formátu STL nebo 3DS. LOM zařízení používá nepřerušovaného kusu materiálu, který je natažen přes pracovní plochu soustavou válců, které zajišťují pohyb materiálu. Plastové a papírové fólie jsou potaženy lepidlem. Dle výše uvedeného principu vyhřívaný válec přejeде přes fólii materiálu, kde rozpustí lepidlo a díky tlaku, který vyvine na podložku, tak spojí vrstvy k sobě. Poté počítačem řízený laserový paprsek popř. speciální nůž vyřiznou v materiálu požadovaný tvar. Přebytný materiál je laserem rozřezán na menší části kvůli snazšímu odstranění při dokončení součásti. Po dokončení vrstvy se pracovní plocha sníží o tloušťku jedné vrstvy, která je obvykle přibližně 1,6 mm a přes pracovní plochu se natáhne nová vrstva materiálu pomocí soustavy válců a celý proces se opakuje, dokud není celá součást dokončena. Jakmile je součást dokončena, tak se vyjme z pracovní plochy a všechny přebytný materiál se opatrně odřeže pryč. Součástky vytisknuté z papíru se většinou nalakují a tím získají ochranu proti vlhkosti.



Obr. 10 Schéma metody LOM [6]

Právě díky tomu, že laser nemusí v každé vrstvě zpracovávat celý průřez modelu, ale pouze vyřeže obrys je tato metoda velice časově a ekonomicky úsporná. Díky možnosti použití snadno tavitelných materiálů je i tato metoda vhodná pro slévárenství a to hlavně pro tvorbu vytavitelných modelů. V případě použití papírového materiálu je vytvořena struktura podobná objektu ze dřeva, což je zároveň i nevýhodou, protože tím vzniká hrubší struktura a z toho vyplývající nutnost dodatečného opracování.



Obr. 11 Struktura podobná dřevu [9]

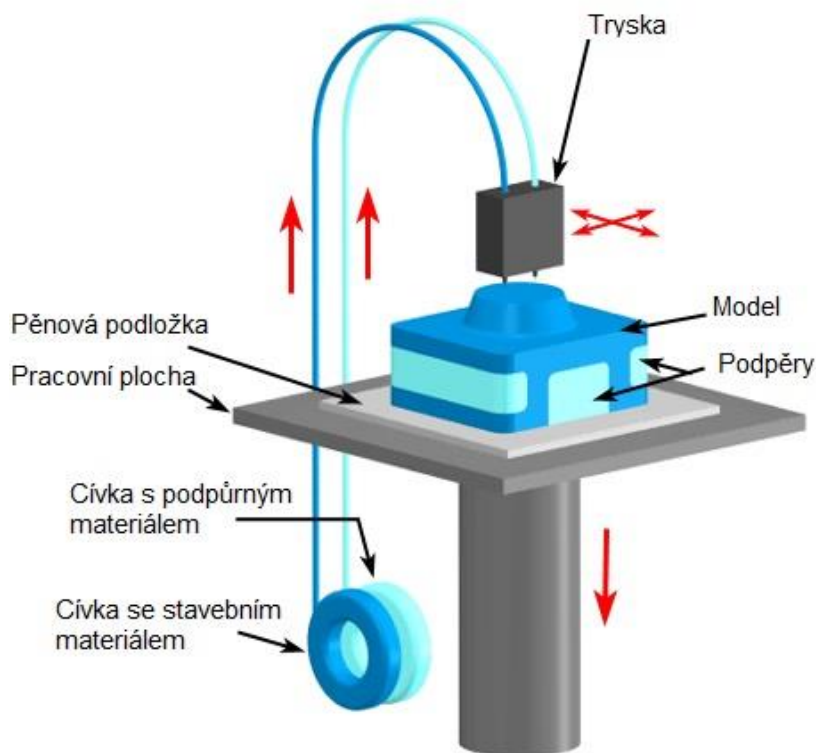
Materiály:

Nejčastěji používané materiály jsou buď papírové tzn. *LOMPaper*, nebo plastové tzn. *LOMPlastic*. Méně častou variantou jsou tzv. kompozity *LOMComposite*. Tyto kompozitní modely mají navíc i relativně slušné mechanické vlastnosti a to díky obsahu skelných vláken.

Výhody	Nevýhody
Tvarová stálost modelu	Zdlouhavé odstraňování podpor
Možnost obrábění modelu (struktura podobná dřevu)	Nemůžeme vyrábět dutiny ani tenké stěny
Výroba velmi velkých součástí	Je potřeba výkonný laser
Velká přesnost, rychlost a odolnost	Produkce nežádoucích výparů z laseru
Nepotřebujeme podpůrné struktury (součást je podepíraná svým vlastním materiálem, který se odstraní až po dokončení součástky)	Přesné nastavení laseru (laser musí být nastaven přesně, aby neřezal do předchozích vrstev)

3.2 Fused Deposition Modeling (FDM) [5,7,9,17,20]

Jedná se o technologii, která funguje na principu tavných lepících pistolí. Nejdříve se vytvoří CAD program, který se převede do vhodného formátu (nejčastěji .STL). Některé programy dokážou automaticky vygenerovat podpěry, což je velká výhoda. Jako stavební materiály se používají různé termoplasty. Na model se používá nejčastěji materiál acrylonitrile butadiene styrene (ABS) a na podpory vodorozpustný vosk nebo křehké termoplasty, například polyphenylsulfone (PPSF). Tyto materiály jsou ve formě vláken navinuty na cívkách, ze kterých se odmotávají do vytlačovacích trysek. Cívky jsou dvě, jedna pro materiál na model a druhá pro materiál na podporu. Trysky jsou zahřáté na teplotu tání plastů a mají mechanismus, díky kterému se může regulovat tok materiálu. Trysky se pohybují v osách X,Y a nechávají materiál kapat na pracovní plochu. Jakmile je jedna vrstva hotova, tak se pracovní plocha posune v ose Z směrem dolů a začne vznikat další vrstva, dokud to není hotovo. V pracovním prostředí tohoto přístroje je udržovaná nízká teplota, díky které materiál téměř okamžitě tuhne. Po dokončení je součást vyndána a musí se manuálně odstranit podpurný materiál, popřípadě se některé podpurné materiály rozpustí v speciálním roztoku. Rychlost tisku je celkem slušná, ale oproti metodám SLA a SLS se jedná o pomalejší proces. Hotovou součástku můžeme brousit, frézovat nebo lakovat pro vylepšení vzhledu.



Copyright © 2008 CustomPartNet

Obr. 12 Schéma metody FDM [9]

Termoplasty mají schopnost odolávat teple, chemickému a mechanickému namáhání a proto je tato metoda vhodná pro výrobu prototypových součástí k testování. Touto technologií se dají také vyrábět velice detailní modely, které se už nemusí dále dodělovat a jsou vhodné k montáži. Velkou výhodou této metody je, že přístroje mohou být relativně malé a mohou být používány doma i v kancelářích, protože se nevypařují do ovzduší žádné nebezpečné látky.

Materiály:

Akrylonitrile butadiene styrene (ABS) – je to velice odolný termoplast, který je často využíván pro vstřikolisy. Dají se z něj vytvářet i funkční prototypy. Další výhodou je také možnost spousty barevných variací.

Polykarbonát (PC thermoplastic) – velice odolný materiál s dobrou tepelnou odolností.

PC – ABS – tento materiál je také velice odolný a kombinuje výhody ABS a PC thermoplastic.

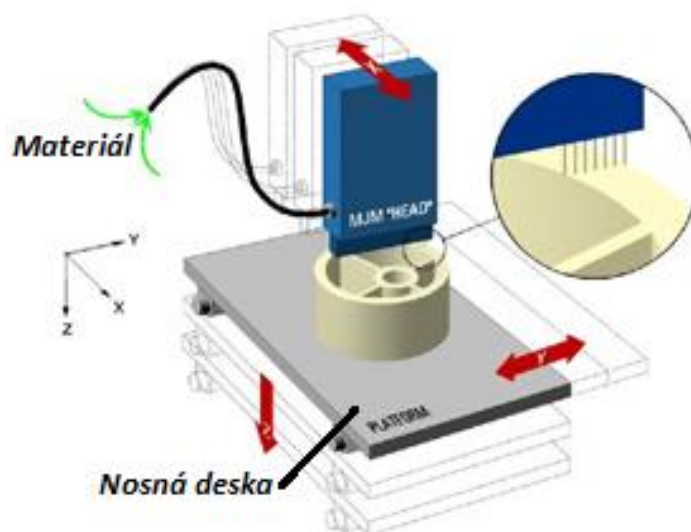
Polyphenylsulfone (PPSF) – tento materiál je vodorozpustný a díky tomu je využíván pro tvorbu podpor.

Vosky a elastomery – tyto materiály jsou pružné. Díky těmto materiálům je tato metoda vhodná pro slévárenství pro tvorbu voskového modelu pro lití na vytavitelný model. Z důvodu horší kvality povrchu musí být model dodatečně povrchově upraven.

Výhody	Nevýhody
Minimální odpad materiálu	Oproti SLS a SLA pomalejší metoda
Výroba funkčních součástí	Většinou menší tiskárny
Snadné odstranění podpor	Tloušťka vrstvy se pohybuje od 0,13 – 0,33 mm
Široká paleta materiálů – lze měnit materiály i během výroby	Nepředpověditelné stažení v modelu důsledkem prudkého ochlazení

3.3 Multi-Jet Modeling (MJM) [5,7,9,22,23,24,25,30]

Princip této metody spočívá v nanášení jednotlivých vrstev materiálu na sebe pomocí speciální piezoelektrické tiskové hlavy, která je složena z 96 trysek uspořádaných rovnoběžně vedle sebe. Jako materiál se používají vytvrditelné termoplasty nebo slévárenský vosk. Tisková hlava se pohybuje v ose X a Y a po dokončení jedné vrstvy se celá pracovní plocha posune po ose Z směrem dolů o tloušťku jedné vrstvy. Každá vrstva se rozdělí na



Obr. 13 Schéma metody MJM [5]

jednotlivé tiskové body a daný program už zajistí správné vypouštění materiálu z jednotlivých trysek. Zároveň se tisknou i všechny podpurné struktury, které mají jehličkovitý tvar a jsou lehce oddělitelné. Díky velkému počtu trysek je nanášení materiálu rychlé a rovnoměrné. V tiskárně se nachází také UV lampa, díky které se plně vytvrdí daný materiál a zaručí nám, že nanášený termoplastický materiál ihned po nanesení ztuhne. Tato metoda se používá například k výrobě ukázkových modelů i k výrobě voskových modelů pro použití ve slévárenství.

Materiály:

Akrylátový fotopolymer – tento materiál nabízí velmi dobrou kvalitu povrchu, což s sebou přináší vysokou přesnost.

Vosk – používá se na stavbu podpor.

Výhody	Nevýhody
Rychlá a efektivní metoda s docela velkou přesností (až 16 mikronů)	Oproti jiným metodám relativně malé maximální možné rozměry
Nízké provozní náklady	Omezený výběr materiálu

4 METODY ZALOŽENÉ NA PRÁŠKOVÉM ZÁKLADĚ (POWDER BASED) [3,6]

Metody používající prášek jako stavební materiál mají některé podobné rysy s ostatními metodami. Například některé metody používají také laser k vykreslení tvaru vrstvu po vrstvě, jiné používají ke spojení tmel nebo lepidlo. Mohlo by se zdát, že by se prášek dal považovat za pevný materiál, ale přece jen se tyto metody od ostatních liší a zaslouží si vlastní kategorii. Mezi technologie používající jako stavební materiál prášek řadíme například tyto:

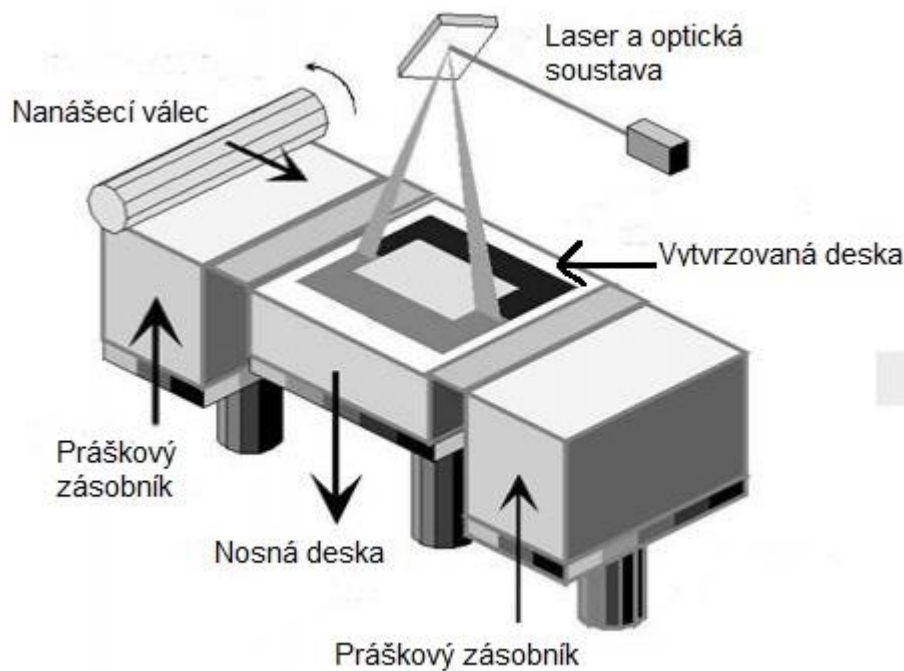
- SLS
- EOSINT systems
- 3DP
- MJS
- EBM
- Lastform technology
- DMD
- GS

4.1 Selective Laser Sintering – SLS [3,4,6,8,9,26,27]

Tato metoda je nejpodobnější stereolitografii, avšak oproti ní přináší řadu vylepšení a výhod. Jako stavební materiál se používá jemný prášek. Jako materiál se používají polyamidy využívané pro výrobu plastových funkčních výrobků, elastomery pro různá těsnění, nylon, který má velkou chemickou a tepelnou odolnost, či různé polykarbonáty, které se využívají k výrobě modelů pro lití do písku a lití na vytavitelný model. Dále se používají kovové nebo keramické prášky pro výrobu kovových prototypů nebo nástrojů.

Princip metody spočívá v nanášení jednotlivých vrstev materiálu na platformu pomocí posuvného nože. Takto nanesený prášek je poté spékán pomocí CO₂ laseru, který je řízen optickou soustavou tak, aby byl prášek spékán pouze v místech průřezu modelu. Tento proces se opakuje, dokud není dokončena poslední vrstva. Tloušťka vrstvy je od 0,02 mm, proto se jedná o velice přesnou metodu. Celý proces probíhá v inertní atmosféře (argon, dusík), kde je daný plyn zahřátý na teplotu blízkou tavné teplotě práškového materiálu a vytváří tak lepší podmínky pro výrobu modelu. Velkou výhodou této technologie je, že výrobek je po celou dobu obklopen práškem, proto nejsou potřeba podpory, protože nevyužitý prášek slouží jako podpora a po skončení procesu se dá znovu použít, což je velice ekonomicky a ekologicky výhodné. Po skončení výrobního procesu je potřeba nechat nejprve prášek vychladnout na teplotu, při níž lze s modelem manipulovat a dá se očistit od zbylého prášku.

Tato metoda má v průmyslu využití pro funkční prototypové a testovací modely, master modely pro lití do písku a výrobu funkčních nástrojů a forem pro malé série.



Obr. 14 Schéma metody SLS [9]

Jak již bylo zmíněno výše, použitelných materiálů pro tuto metodu je spousta a proto se dělí do 4 základních skupin.

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

Laser Sintering Plastic je metoda, kterou můžeme využít k přímé výrobě slévárenského modelu. Díky této metodě jsme schopni vyrobit například polystyrenový model pro lití na vypařitelný model, nebo pokud použijeme jako materiál nylon, tak mají vyrobené modely velmi dobrou teplotní odolnost, houževnatost a tvrdost. Takovéto modely lze použít i pro funkční zkoušky nebo na testy lícování.

Laser Sintering Metal je metoda, při níž se využívá kovových prášků a proto se touto metodou dají vyrábět velmi pevné, odolné a funkční modely. Časté využití je pro přímou výrobu forem pro lisování a vstřikování plastů.

Laser Sintering Foundry Sand je metoda, při níž se využívá speciálního slévárenského písku, z kterého je možné vyrábět přímo klasické pískové formy, které poté již nevyžadují žádnou další úpravu.

Laser Sintering Ceramic je trošku odlišná metoda oproti ostatním, protože se používá keramický prášek, který je míchán s pojivem, které je nanášeno pomocí Ink-Jet tryskové hlavy. Tato metoda se ve slévárenství používá především k výrobě keramických forem a jader pro přesné lití.

Laser Micro Sintering je metoda, která klade důraz na přesnost. Pomocí wolframového prášku o velmi malé zrnitosti je možná výroba součástek s přesností okolo 30 μm . Díky velice tenkým vrstvám okolo 0,03 mm pak můžeme dosáhnout vysoké kvality povrchy s drsností menší než Ra 1,5.

3-D Laser Cladding je metoda, která používá jako základní materiál kovový prášek ze slitiny titanu, niklu, kobaltu a hliníku. Oproti SLS je trošku odlišný postup nanášení a to ten, že je prášek dávkován plynule přímo do dráhy laserového paprsku, který ho taví a spojuje s předchozí vrstvou. Takto vyrobené součásti mají srovnatelné mechanické vlastnosti se součástmi vyrobenými běžnými technologiemi, jako je třeba obrábění nebo lití. Tyto součásti najdou uplatnění dokonce i v leteckém průmyslu, kde jsou kladeny opravdu vysoké nároky na mechanické vlastnosti a kvalitu nebo v medicíně jako funkční kloubní náhrady.

Výhody	Nevýhody
Dobré mechanické vlastnosti	Možná tvorba staženin při spékání
Široká paleta použitelných materiálů	Nutná větší vstupní energie
Není nutná tvorba podpor	Obtížnější opracování složitějších dílů
Velká využitelnost nespotebované směsi	Výskyt vnitřních pnutí při chladnutí materiálu



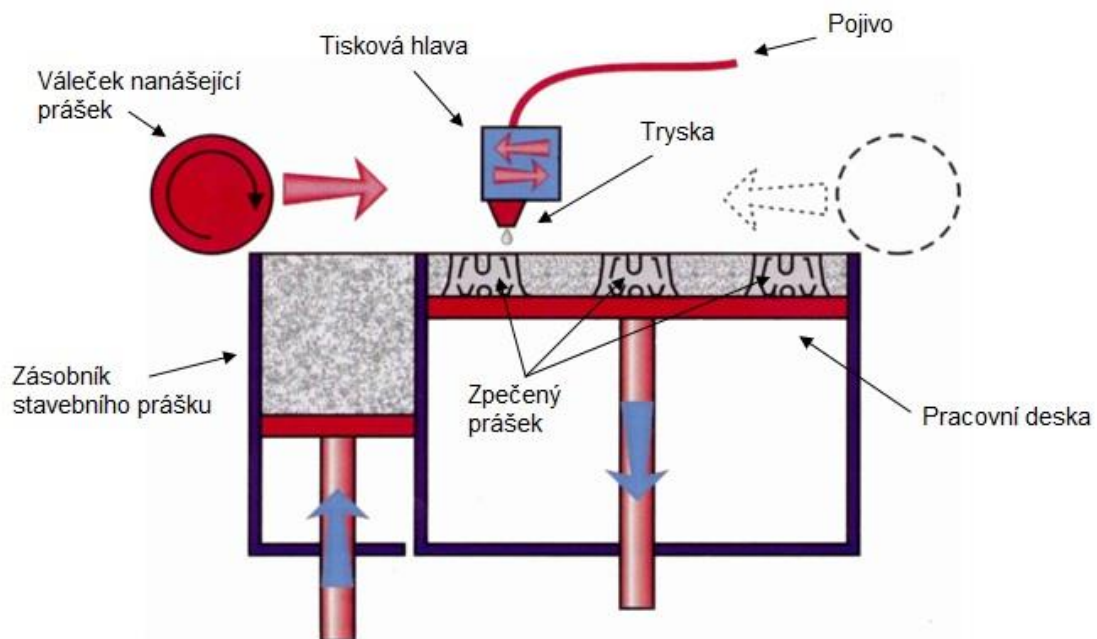
Obr. 15 Běžecské boty vytištěné pomocí metody SLS [41]

4.2 Three – Dimensional Printing (3DP) [3,4,9,28,29]

Tato metoda je podobná technologii SLS, která je popsána výše, ale místo laseru se používá tisková hlava. Zařízení pracuje na principu spojování práškového materiálu pomocí kapalného pojiva, které je dodáváno inkjektovou hlavou, pohybující se nad základnou v osách X a Y, které dávkuje pojivo skrz jemné trysky dle potřeby.

Proces začíná tím, že je za pomoci pístu vyzvednuta základna do požadované výšky. Na tuto základnu se nivelačním válcem nanese tenká vrstva prášku. Pomocí tiskové hlavy se nanese na požadovaná místa tekuté pojivo a tím dojde k propojení a vytvrzení práškových zrn. Zbylý prášek stejně jako u metody SLS zůstává a slouží jako podpora součástí. Jakmile proběhne kompletně jedna vrstva, tak se píst spustí o požadovanou vzdálenost dolů a základna klesne o tloušťku jedné vrstvy (přibližně 0,1 mm) a proces začne znovu. Toto se opakuje, dokud není nanесena poslední vrstva. Po dokončení je celý model ještě napuštěn tvrdidlem, které zabrání vydrolování prášku ze součástí, protože použité pojivo není samo o sobě dostačující pro požadovanou pevnost modelu.

Tato technologie je díky své jednoduchosti, dostupnosti a nenáročnosti zařízení jednou z nejvíce používaných metod RP. Tato technologie také dosahuje poměrně slušných rozměrových přesností, okolo 0,1%. Další výhodou je velký výběr z použitelných materiálů a také barevných kombinací, což ji dělá velice výhodnou pro prezenční účely, kdy jsme schopni během krátké doby dodat náhledový model v odpovídajícím barevném provedení. Díky tomu má tato metoda také dobré uplatnění jak při výrobě plastových modelů, tak v oblasti slévárenství. Dle použitých materiálů můžeme tuto technologii rozdělit do několika nejrozšířenějších technologií vhodných pro slévárenství.



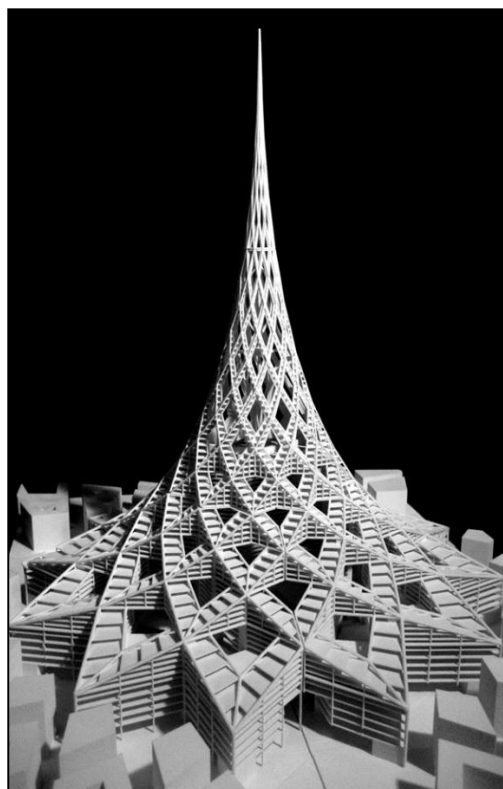
Obr. 16 Schéma metody 3DP [6]

ProMetal 3D Printing – tato metoda se využívá k výrobě kovových a keramických forem, které slouží převážně k výrobě tvarově složitých hliníkových odlitků, které jsou hojně využívány v automobilovém průmyslu.

Direct Shell Production Casting – tato metoda je významná především pro odvětví přesného lití, protože umožňuje přímé zhotovení keramické formy. V podstatě se jedná o skořepiny, což je obsaženo i v samotném názvu. S využitím takto zhotovených forem můžeme odlévat jakékoliv kovy.

RealWax – jak už vyplývá z názvu, tato metoda využívá speciální vosky, díky kterým můžeme vytvořit voskový model pro použití při přesném lití na vytavitelný model.

Výhody	Nevýhody
Nejlepší poměr cena/výkon mezi RP metodami	Oproti SLS technologii méně pevné a křehčí součásti
Přesná a nenáročná metoda	Větší časová náročnost postprocesingu
Dobré využití ve slévárenství	Průměrná rychlost tvorby modelu

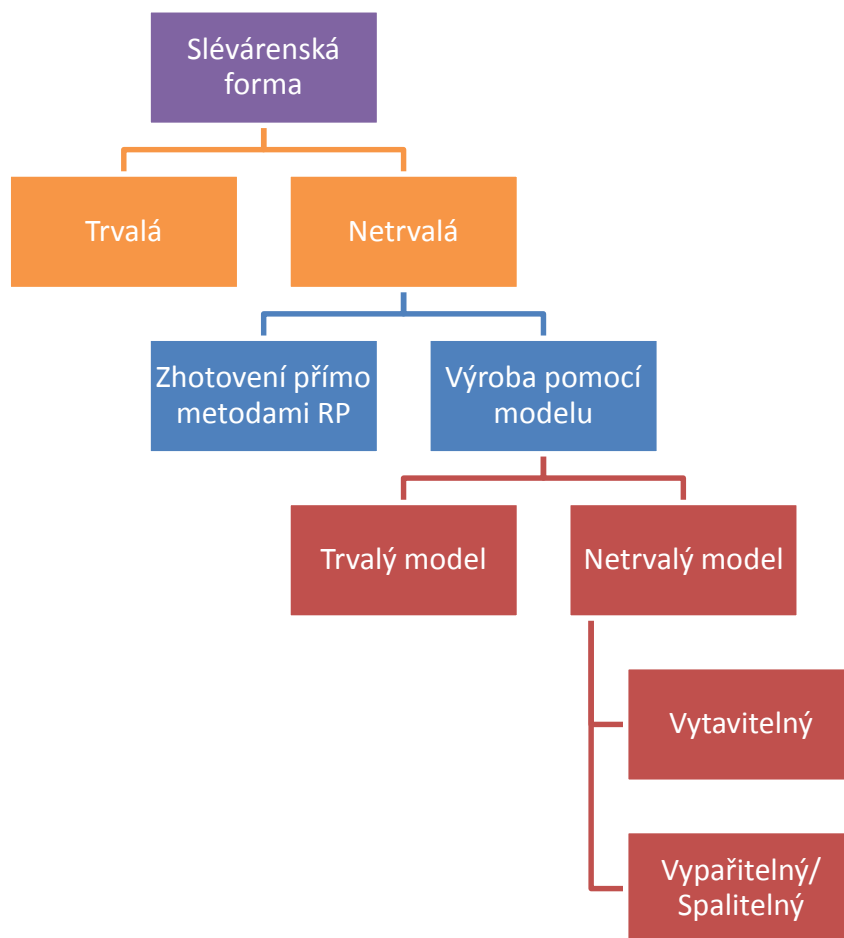


Obr. 17 Ukázka využití 3D tisku v architektuře [9]

5 UPLATNĚNÍ RAPID PROTOTYPINGU VE SLÉVÁRENSTVÍ [1,5,6,9,31]

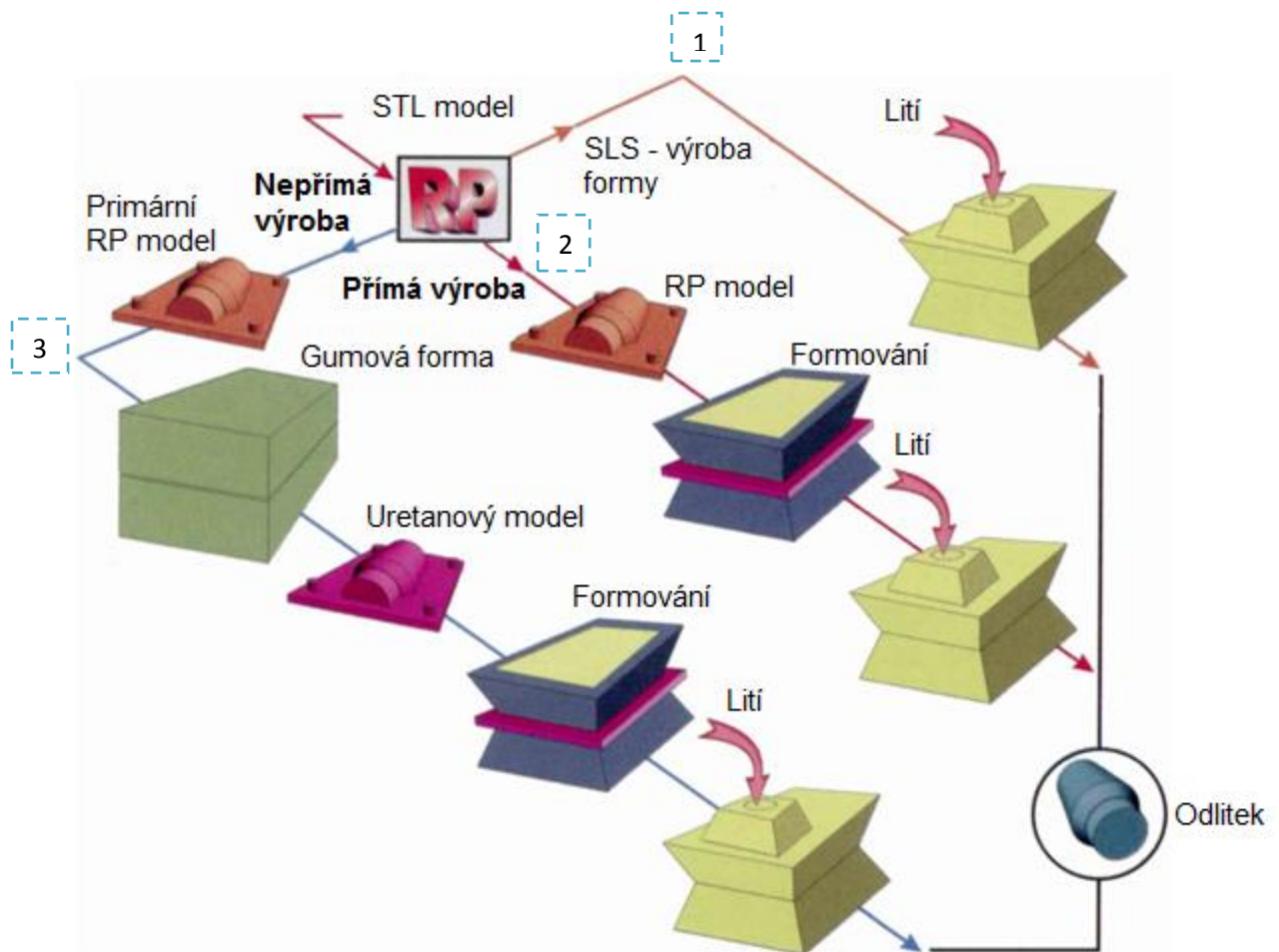
Rapid prototyping se ve slévárenství používá především na tvorbu modelu a jader, která se poté používají klasickou cestou pro různé technologie lití. Pomocí některých metod, založených na sinteringu, se dají vytvořit kompletní formy, které jsou připraveny pro lití.

Výroba odlitku se skládá ze dvou oblastí, tj. výroba slévárenské formy a výroba modelu. Modely i formy mohou být trvalé nebo netrvalé a vyrábí se několika způsoby.



Obr. 18 Možnosti výroby slévárenské formy [6]

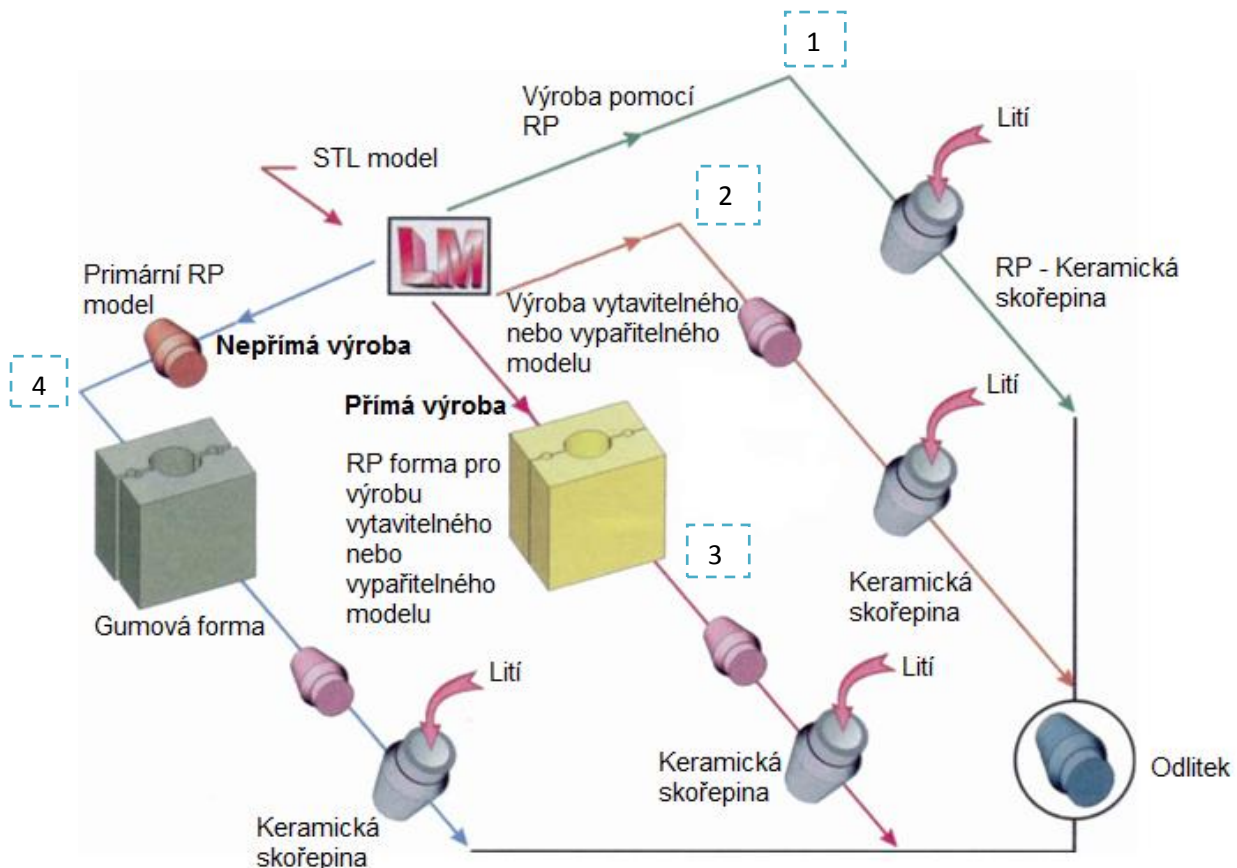
Ve slévárenství se v podstatě RP využívá ve dvou oblastech. Těmi jsou oblast klasického lití do písku a oblast přesného lití. Využití těchto technologií je ukázáno a popsáno níže.



Obr. 19 Možnosti výroby formy pro lití do písku [6]

Z výše uvedeného schématu je vidět, že existují 3 základní postupy výroby pískové formy:

1. **Přímá výroba formy** – Pomocí některé RP metody se přímo vyrobí forma, do které se přímo odlévá kov
2. **Přímá výroba formy pomocí tzv. master modelu** – Pomocí některé RP metody se vyrobí model požadovaného odlitku (master model), podle kterého je následně klasicky vyrobena forma pro odlévání.
3. **Nepřímá výroba formy** – Jedná se o víceetapové vyrobení formy. V prvním kroku je vyroben primární model odlitku, z kterého se s využitím gumové formy vyrobí uretanový nebo silikonový model, který se v poslední fázi využije k vyrobení formy pro odlévání. U silikonových forem se využívá metody vakuového lití, díky čemuž se značně urychlí výroba forem pro sériovou výrobu odlitků



Obr. 20 Možnosti výroby forem pro přesné lití na vytavitelný model [6]

Přesné lití je technologie, která umožňuje vyrábět tvarově složité součásti, u kterých se část funkčních ploch vyrábí již při lití a u kterých je dosaženo požadované přesnosti a drsnosti, takže už tyto plochy nemusíme dokončovat obráběním. U ostatních ploch, které se budou muset ještě obrábět, jsou přídatky na obrábění minimální, takže není zapotřebí tolik obrábění, čímž se viditelně snižují náklady.

1. **Přímá výroba skořepiny** – Podobně jako v předchozím případě je i zde za pomoci RP metod přímo vytvořená forma.

2. **Přímá výroba spalitelného nebo vytavitelného modelu** – Model vytvořený některou RP metodou je přímo vyroben z materiálu vhodného pro vytavení nebo spálení. Tento model se přímo použije k výrobě keramické skořepiny, ale během procesu se zničí.

3. **Výroba voskového modelu pomocí formy zhotovené RP technologií** – Pomocí RP metod se vytvoří celá forma, do které se poté odlije roztavený vosk nebo jiný materiál. Tyto voskové modely se dále využijí v dalším procesu technologií přesného lití.

4. **Výroba voskového modelu za pomoci silikonové formy a modelu zhotoveného RP technologií** – V prvním kroku se vyrobí pomocí RP metod primární model odlitku, který slouží k výrobě gumové formy pro výrobu modelů využívaných při přesném lití. Z jednoho modelu se vyrobí několik forem, což je velká výhoda při sériové výrobě.

5.1 Nepřímá výroba forem [5,6,9,32]

Nejdříve je pomocí některé z RP technologií zhotoven model budoucího odlitku, který se dále opracovává až do finální podoby tzv. master model. Teprve až podle tohoto modelu je klasickými slévárenskými způsoby vytvořena buď trvalá, nebo netrvalá forma, která je určena pro lití požadované součásti. Pro sériovou výrobu je proces doplněn o určitý mezikrok, kdy se z RP modelu vytvoří forma pro výrobu více modelů z nejrůznějších materiálů. Z těch jsou následně vytvořeny slévárenské formy pro lití. Velice často se zde využívá metoda vakuového lití do silikonových forem.

V krátkosti zde budou popsány některé metody, které spadají do oblasti lití tzv. na hotovo. To znamená, že už by se výsledná součást nemusela dále obrábět. V dnešní době je kladen velký důraz na kvalitu a vlastnosti odlitků, jejich tvarovou složitost, přesnost a kvalitu povrchu za co nejnižší možnou cenu a proto je toto velice důležité odvětví slévárenství.

5.1.1 Metoda vytavitelného modelu – Lost Wax [6,31,33]

Metoda vytavitelného modelu tzv. Lost Wax nebo investment casting je jednou ze základních a nejpoužívanějších technologií používaných při přesném lití. Tato metoda je zároveň jednou z nejstarších a její počátky se datují až do doby 2000 před naším letopočtem, kde byla využívána Egypťany k tvorbě uměleckých odlitků.

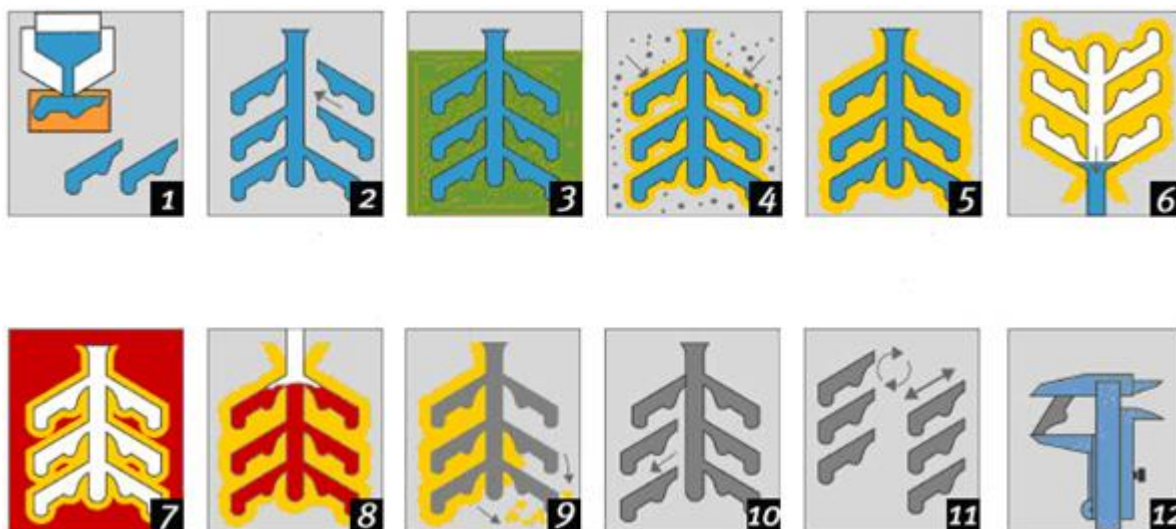
Tato technologie nám umožňuje vyrábět odlitky, které jsou tvarově velice složité, s malými rozměrovými tolerancemi a s velmi dobrou kvalitou povrchu. Používá se zejména tam, kde musíme brát v potaz složitý tvar součásti na obrábění, kde by to bylo z finančního a časového hlediska velice nákladné, popřípadě nevyrobitelné.



Obr. 21 Ukázka hrubého opracovaného odlitku (vlevo) a opracovaného odlitku [9]

Princip metody:

Výrobní proces je rozdělen do několika fází:



Obr. 22 Postup výroby odlitku metodou Lost Wax [6]

Popis jednotlivých fází:

- 1) Výroba voskového modelu – vstřikování vosku do matečné formy
- 2) Sestavení modelů do stromečku
- 3) Výroba skořepin – namáčení voskových modelů do keramické břečky
- 4) Výroba skořepin – posypávání voskových modelů žáruvzdorným materiálem
- 5) Hotová skořepina – skládá se z několika vrstev
- 6) Vytavování voskových modelů – autokláv
- 7) Vypalování skořepiny
- 8) Tavení a odlévání
- 9) Odstraňování keramiky
- 10) Oddělování odlitků od vtokové soustavy – řezání
- 11) Dokončovací operace – tryskání, broušení, leštění
- 12) Kontrola

Nejdůležitějším prvkem je materiál, který potřebuje mít nízký bod tání. Z toho důvodu se nejčastěji využívá speciálních vosků nebo třeba ABS plastu. Složení těchto vosků je velice komplikované a jednotlivé firmy si svůj recept nechávají patentovat. Následně se pomocí vstřikolisu a formy vytvoří model budoucího odlitku. Některé RP metody dokážou vyrábět přímo voskový model. Materiály používaných forem jsou různé, od nízkotavitelných slitin, přes sádrové a plastové formy až po silikonové, které mají výhodné vlastnosti pro slévárství. Stejně jako model, tak i formy mohou být vyrobeny některým RP způsobem, nebo klasicky.

Výroba takovýchto forem a modelů je vzhledem k důležitosti přesného vyhotovení složitá a časově náročná, proto je často potřeba formy dodatečně dokončit např. broušením nebo leštěním.

Příklad konkrétní metody RP, které se zde uplatňují:

- SLA – metoda Quickcast
- 3DP – výroba skořepinové formy
- SLS – Castform
- FDM – modely z ABS plastu
- Repliwax®

5.1.2 Quickcast [5,34]

Tato technologie je vyvinutá firmou 3D Systems. Protože stávající stereolitografické modely nebyly primárně vyráběné pro potřeby odlévání, proto vznikla tato metoda. Po dlouhé době výzkumů se vyvinul ftopolymer SC 1000, který absorbuje málo vody, je pevný a zároveň má nízkou viskozitu. Tento polymer je určen speciálně pro potřeby rychlé výroby odlitku.

Tato metoda je velice podobná metodě lití na vytavitelný model, akorát že místo vosku se využívá výše zmíněného polymeru. Díky tomu můžeme vytvářet i velice komplikované součástky v relativně krátké době. A protože se jedná o metodu stereolitografie, tak je tato metoda velice přesná, řádově desítky mikrometrů.



Obr. 23 Ukázka součásti vyrobené metodou Quickcast [42]

5.1.3 Castform [5,26]

Tuto metodu také vyvinula firma 3D Systems a využívá RP metody SLS. Model je vytvořen ze speciálního materiálu zvaného Castform PS, který je naimpregnován slévárenským voskem. Mezi hlavní výhody této metody patří její univerzálnost, snadná úprava modelů a nízké procento vznikajícího popílku. Oproti jiným metodám se totiž nejen vytaví vosk, ale zároveň se i spálí zmíněný materiál. Tato metoda je vhodná i pro odlévání reaktivních kovů, jako například titanu.



Obr. 24 Ukázka součásti vyrobené metodou Castform [43]

5.1.4 Repliwax [35]

Tato metoda je velice podobná metodě Lost Wax s tím rozdílem, že je zaměřená na odlévání větších odlitků, které jinak není možné obvyklou metodou vytavitelného modelu vyrábět. Hlavním rozdílem je tloušťka keramických skořepin, které jsou oproti Lost Wax velice tenké, čímž se zároveň získá větší kapacita skořepiny a snižuje se spotřeba materiálu na výrobu formy. Díky tomu, že výroba formy probíhá za pokojových teplot a forma se nemusí předehřívát, tak nehrozí nebezpečí popálením. Kvůli menší šířce skořepin se musí výsledný stromeček podpírat pískem.



Obr. 25 Ukázka součásti vyrobené metodou Repliwax [44]

5.1.5 Metoda vypařitelného modelu Full Mold [32,36]

Tato technologie využívá polystyrenové pěny ke zhotovení modelu. Model se vyrábí buď ručně, nebo se využije výhod metod RP. Takto vytvořený polystyrenový model je opatřen žáruvzdorným nátěrem a je uložen do pracovního prostoru, kde je opatrně obsypán slévárenským pískem. Tekutý kov se poté pomalu nalije do formy, ve které dochází k odpařování polystyrenu skrz nátěr a písek ven, dokud nedojde k úplnému zaplnění formy kovem. Z důvodů nebezpečných polystyrenových výparů se musí dbát na důkladné odvětrávání pracovního prostoru. Jakmile odlitek vychladne, tak se vyndá z formy a očistí se od písku, který může být zase ihned použit v další formě.

Technologie umožňuje lití tvarově velmi složitých odlitků a díky tomu, že se model vypaří a nemusí se vytahovat z formy, tak nám odpadá potřeba technologických úkosů, jader a formování s více dělicími rovinami. Oproti metodě s vytavitelným modelem je tato technologie ekonomičtější a jednodušší a to díky používanému materiálu. Protože má tato metoda vysoké počáteční náklady, tak se vyplatí spíše až pro sériovou výrobu. Touto metodou se odlévají například tyto materiály: hliník, železo, ocel, niklové slitiny a slitiny mědi.

5.1.6 Metoda spalitelného modelu Replicast [21,26,32]

Model včetně licí soustavy je vytvořen z polystyrenu například pomocí RP metody SLS – Plastic. Podle modelu se zhotoví keramická forma postupným nanášením keramiky podobně jako u metody Lost Wax. Keramická forma se před litím vyžihá, přičemž se zároveň spálí model. Výsledná součást má velice dobrou rozměrovou přesnost a vynikající povrch. Nejsou zapotřebí žádné dělicí roviny, ani jádra nebo technologické úkosy. Modely jsou sestavovány lepením polystyrenových dílů, nebo v případě složitějších tvarů pomocí některé RP metody. Využití této metody je zejména u výroby větších odlitků, kde předčí kvalitou metodu vytavitelného modelu.

5.2 Přímá výroba formy

Hlavním cílem přímé výroby formy pro lití je vyrobit ji bez mezikroku a pouze na základě digitálního modelu. Toto je opravdu obrovská výhoda, kterou nám umožňují současné technologie RP.

5.2.1 Přímá výroba pískových forem a skořepin [1,5,9,18]

V této oblasti jsou metody RP využívány k výrobě jednotlivých dílů formy pomocí RP modelu. Tento model je rozdělen v dělicí rovině na dvě poloviny, kde každá polovina modelu slouží k vytvoření jedné poloviny pískové formy. RP metody můžeme aplikovat i pro výrobu pískových jader. Některé formy mohou obsahovat i desítky vnitřních jader a v takovém případě vyrobit formu klasickou metodou je velice časově a finančně náročné. Díky RP

můžeme potřebný čas a z toho plynoucí náklady snížit i o polovinu a v případě jakýchkoliv problémů máme k dispozici CAD data, které můžeme během chvilky upravit a celý proces zopakovat. K dispozici máme spoustu materiálů a metod, některé z nich jsou popsány v jiných kapitolách. Například metoda FDM využívá univerzální ABS materiál, metoda LOM používá papír, metoda SLS využívá epoxidové polymery pro přesné pískové lití a další.

Dalším možným přístupem je použití RP metod k přímému zhotovení pískových forem a jader. Tento přístup je vskutku revoluční a má veliký dopad pro výrobu forem pro lití do písku. Takto můžeme vyrábět i velice složité formy a to díky tomu, že je forma tisknuta vrstvu po vrstvě tak nejsou vyžadovány žádné modely ani jádra. Jedním z představitelů této technologie je firma EOS pocházející z Německa. Jejich největší tiskárna EOSINT S 750 pracuje na principu SLS a dokáže vyrobit kompletní pískovou formu až do velikosti 720x380x380 mm. Tento systém se hodí zejména pro výrobu náhradních dílů, složitých odlitků, například pro motory nebo čerpadla nebo sériovou výrobu v malých objemech. EOSINT dokáže pracovat s několika druhy licích písků, které mají podobné vlastnosti jako většina písků, které se standardně využívají. Dokonce jsme schopni díky tisku vrstvě po vrstvě vytvořit podřezané a vnitřně zakřivené tvary, které by byly konvenčními metodami nevyrobitelné.



Obř. 26 Ukázka odlévání do forem [46]

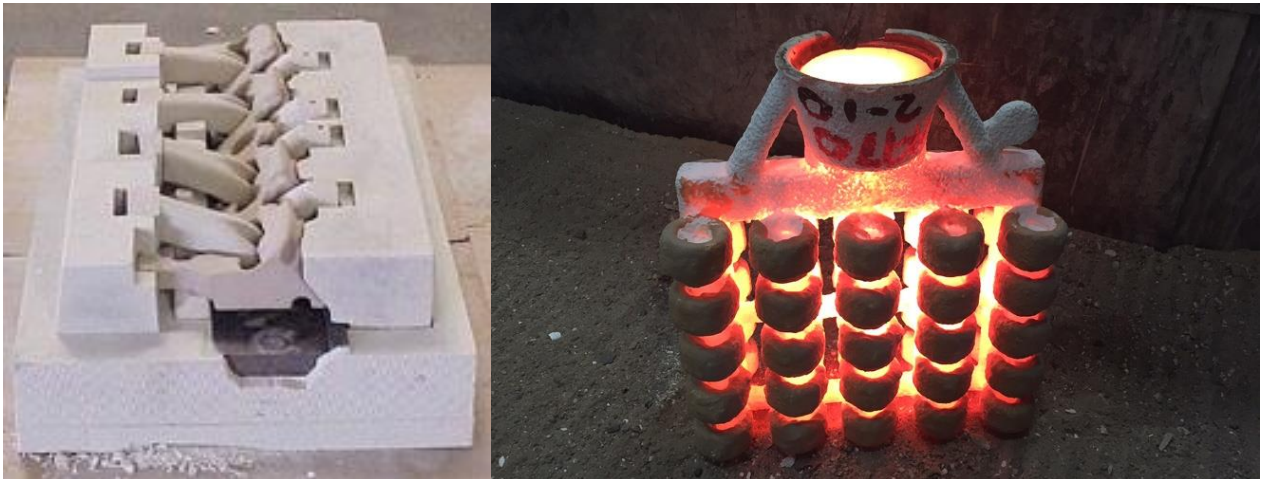
Jednou z metod je **DirectCast** vyvinutá firmou EOS, kterou jsem popsal výše a využívá zařízení EOSINT S 750 a speciální křemičitý materiál, díky kterému je možno zhotovit kompletní pískové formy pro lití kovů. Tato metoda se ekonomicky vyplatí pouze při zhotovování odlitků v malých sériích.

Další podobná technologie je **ZCast**. Tato technologie se zatím využívá pouze při lití nízkotavitelných nezelezných kovů. Oproti DirectCast funguje na principu 3DP a k tisku využívá speciální písek ZCast 501, pomoci kterého dokážeme dosáhnout přímého tisku celé formy nebo jednotlivých jader.

5.2.2 Přímá výroba keramických skořepinových forem [3,9,15,31]

K tomuto účelu byla vyvinuta technologie zvaná **Direct Shell Production Casting** neboli **DSPC**. Tato technologie je kombinací technologií SLS a 3DP a k tvorbě forem a skořepin využívá materiálů na bázi keramických prášků. Ten je zde spojován pomocí tekutého pojiva, nanášeného ink-jet tryskovou hlavou a následně je zde každá jednotlivá vrstva slinována laserem. Po dokončení tisku formy se musí standardně vypálit v peci a teprve potom jsou připraveny pro lití.

Pro tuto metodu můžeme využívat i jiné materiály než jen keramický prášek. Můžeme použít například prášky na bázi karbidů křemíku, oxidu hliníku, zirkonu, křemene a další. Výběr materiálu se odvíjí od materiálu, který se do dané formy bude lít. Ve všech případech lze vytvořit velice tvarově složité formy, jemné detaily a je dosahováno vysoké kvality povrchu.



Obr. 27 Forma hlavy motoru vyrobená metodou DSPC (vlevo) a ukázka odlití do formy [6,45]

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo shrnout základní a nejpoužívanější technologie, které se využívají pro rapid prototyping. Tyto technologie jsou relativně mladé a pořád se vyvíjejí, zlepšují a hlavně zlevňují.

V první části této práce byly popsány a přiblíženy principy a rozdíly mezi jednotlivými metodami, které byly rozděleny do třech podskupin, podle toho, zda používají materiály na pevném, tekutém nebo práškovém základu. Druhá část je zaměřená na využití těchto technologií ve slévárenství. Zde jsem v krátkosti nastínil postupy a možnosti, kterých můžeme pomocí jednotlivých RP technologií a jejich kombinací dosáhnout.

Rapid prototyping nezasahuje pouze do odvětví slévárenství, ale dá se využít skoro všude. Velice rozšířené odvětví jsou letectví, automobilový průmysl, lékařství nebo dokonce umění. Postupem času, až se 3D tiskárny ještě trochu zmenší a hlavně zlevní, tak věřím tomu, že budou běžnou součástí každé domácnosti a dokonce si dokážu představit, že díky tomu vznikne úplně nový systém obchodu, konkrétně obchodu s daty. Místo toho, abych si objednal v obchodě hotovou součást, tak si koupím pouze model v CADu a doma si ji vytisknu. Obří potenciál je také v možnosti tisknout ve vesmíru náhradní součástky. Možnosti jsou opravdu neomezené a věřím, že na tomto poli nás ještě čeká velký posun v následujících letech.

Co se týče oboru slévárenství, tak zde je nejpodstatnější význam RP metod v rychlosti výroby prototypové součásti v porovnání s konvenčními metodami. S rychlostí je také spojena cena, kdy nastartování výroby vyjde cenově mnohem levněji. Dále můžeme RP technologie aplikovat při přímé nebo nepřímé výrobě forem a modelů. Pro lití na vytavitelný model jsou nejčastěji využívány technologie SLS, SLA, FDM a 3DP. Některé technologie se využívají k více věcem, např. SLS nebo 3DP se často využívají i při lití na vypařitelný model a lití do skořepinových forem.

Na závěr bych už jen dodal, že budoucnost patří 3D tiskárnám a 3D tisku obecně.

Seznam použitých zdrojů

1. Co znamená Rapid Prototyping. *Vu.vutbr.cz* [online]. Miloslav Drápela [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.vu.vutbr.cz/digidesign/Moduly/Rapid%20Prototyping%20-%20Ing.%20Dr%C3%A1pela.pdf>
2. CHUA, Chee Kai., Kah Fai. LEONG a Chu Sing. LIM. *Rapid prototyping: principles and applications*. 2nd ed. New Jersey: World Scientific, c2003. ISBN 98-123-8120-1.
3. CHUA, Chee Kai., Kah Fai. LEONG a Chu Sing. LIM. *Rapid prototyping: principles and applications*. 2nd ed. New Jersey: World Scientific, c2005. ISBN 98-123-8120-1.
4. GEBHARDT, Andreas. *Rapid prototyping*. Munich: Hanser Publishers, 2003. ISBN 34-462-1259-0.
5. KADLECOVÁ, Hana. *Metody rychlého prototypování použitelné ve slévárenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 42 s., Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc..
6. VAŠEK, Vojtěch. *Možnosti uplatnění moderních metod při výrobě prototypových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 44 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc..
7. Co znamená Rapid Prototyping. *Robo.hyperlink.cz* [online]. Ing. Robert Navrátil [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/index.html>
8. Technologie rapid prototypingu. *Mmspektrum.com* [online]. 2002 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-rapid-prototypingu>
9. SYSEL, Karel. *Název: 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.
10. Rapid prototyping: SGC. *Efunda.com* [online]. 2016 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/sgc.cfm
11. Solid Ground Curing. *Robo.hyperlink.cz* [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/main08.html>
12. Rapid Freeze Prototyping (RFP). *Laserrepro.com* [online]. 2012 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.laserrepro.com/rapid-freeze-prototyping-rfp/>

13. ZHANG, Wei, et al. Investment casting with ice patterns made by rapid freeze prototyping. In: *11th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, Austin, TX, USA*. 2000. p. 66-72.
14. LIU, Qingbin, Guanghua SUI a M.C. LEU. Experimental study on the ice pattern fabrication for the investment casting by rapid freeze prototyping (RFP). *Computers in Industry*. 2002, vol. 48, issue 3, s. 181-197. DOI: 10.1016/s0166-3615(02)00042-8.
15. What is DSPC. [1998]. *Soligen Technologies, Inc.* [online]. [cit. 2016-05-13].
Dostupné z: www.soligen.com/articles/whatsdspc.shtml
16. MUELLER, Bernhard a Detlef KOCHAN. Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry. *Computers in Industry*. 1999, vol. 39, issue 1, s. 47-53. DOI: 10.1016/s0166-3615(98)00127-4.
17. What is Laminated Object Manufacturing? 2013. PALERMO, Elizabeth. *Livescience* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>
18. EOSINT S750. *3rsystems.cz* [online]. 2014 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.3rsystems.cz/3d-tisk/3d-tisk-keramika/zarizeni/eosint-s750>
19. *Sps-prosek.cz* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.sps-prosek.cz/soubory/S/CAX/LOM.pdf>
20. *Alphaprototypes.com* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.alphaprototypes.com/FDM-Fused-Deposition-Modeling.aspx>
21. Replicast®.[2013].*Castings Technology International* [online].[cit. 2016-05-13].
Dostupné z: <http://www.castingstechnology.com/public/services/specialprocesses/screplicastmain.asp>
22. *Engineershandbook.com* [online]. 2004 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.engineershandbook.com/RapidPrototyping/mjm.htm>
23. *Robo.hyperlink.cz* [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/main11.html>
24. *3dsystems.com* [online]. 2015 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.3dsystems.com/resources/information-guides/multi-jet-printing/mjp>
25. *Mastergraphics.com* [online]. 2015 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://3d-labs.de/mjm/?lang=en>

26. Learning Center. 2015. *3D Systems* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.3dsystems.com/resources/learning-center>
27. Selective Laser Sintering. 2014. *3D-tisk: Adaptivní výroba & Rapid Prototyping* [online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
28. 3D Printing. [2009]. *Custompart.net* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>
29. LIOU, Frank W. *Rapid prototyping and engineering applications: a toolbox for prototype development*. Boca Raton: CRC Press, c2008. Mechanical engineering (Taylor, 210. ISBN 08-493-3409-8.
30. Stereolithography (SLA) vs Multi Jet Modeling (MJM). *Mastergraphics.com* [online]. Jack Wolf, 2014 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.mastergraphics.com/imagingsolutions/stereolithography-sla-vs-multi-jet-modeling-mjm-2/>
31. HERMAN, Aleš. 2010. Lití na vytavitelný model [online]. Praha [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytaviteln%C3%BDy%20model.pdf>.
32. Horáček, M. – Slovák, V., *Metody rychlého prototypování (RP) použitelné ve slévárenství*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 6 s.
33. *Dongying Dyne Casting* [online]. 2003. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.dyne-casting.com/>
34. QuickCast ®. *Solid Concepts: A Stratasys Company* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.solidconcepts.com/technologies/quickcast/>
35. The Repliwax® Process. [2013]. *Castings Technology International* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.castingstechnology.com/public/services/specialprocesses/SCPRepliwaxMain.asp>
36. KALPAKJIAN, Serope. 2006. *Manufacturing engineering and technology*. 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 1295 p. ISBN 01-314-8965-8.
37. Replicast®.[2013].*Castings Technology International* [online].[cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.castingstechnology.com/public/services/specialprocesses/scpreplicastmain.asp>

38. 3D Sand Francisco. *Nazdi.cz* [online]. 2014 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.nazdi.cz/2014/05/3d-san-francisco-detailni-model.html>
39. Laser cut cardboard model of a T-Rex head. *Epiloglaser.com* [online]. 2015 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.epiloglaser.com/resources/sample-club/trex-head-3d-model.htm>
40. BCN SIGMA PROFESSIONAL GRADE DUAL MATERIAL / COLOR 3D PRINTER. *Printedsolid.com* [online]. 2016 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://printedsolid.com/products/bcn-sigma>
41. 3D Printing Shoes with New Balance. *Shapeways.com* [online]. 2014 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.shapeways.com/blog/archives/2510-3d-printing-shoes-with-new-balance-video.html>
42. Quickcast 3D Printed Patterns. *Http://3dquickcasttx.com/* [online]. 2016 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://3dquickcasttx.com/>
43. CastForm™ PS. *Www.cadblu.com* [online]. 2016 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.cadblu.com/all-products/menu-printer-materials/production-materials/production-material-sls-cat/sls-castform-ps>
44. Repliwax®. *Www.castings-technology.com* [online]. 2016 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://castings-technology.com/PageContent.aspx?ProductID=9>
45. The Casting Process. *Www.mckennaprecision.co.uk* [online]. 2015 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.mckennaprecision.co.uk/resource-centre/the-casting-process/>
46. Repase a repliky doplňků. *Www.janosik.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.janosik.cz/repase-a-repliky-doplňku/>

Seznam obrázků

Obr. 1 Ukázka města vytisknutého 3D tiskárnou [38].....	8
Obr. 2 Ukázka možného preprocessingu [39]	9
Obr. 3 Vytisknutá součást [39]	10
Obr. 4 Schéma metody SLA [6].....	13
Obr. 6 Možnosti nanášení vody [6]	15
Obr. 7 Součást včetně podpor [3]	16
Obr. 9 Ukázka metody založené na pevném základě [40]	17
Obr. 10 Schéma metody LOM [6].....	18
Obr. 11 Struktura podobná dřevu [9]	19
Obr. 12 Schéma metody FDM [9].....	20
Obr. 13 Schéma metody MJM [5]	22
Obr. 14 Schéma metody SLS [9]	24
Obr. 15 Běžecké boty vytištěné pomocí metody SLS [41].....	25
Obr. 16 Schéma metody 3DP [6].....	26
Obr. 17 Ukázka využití 3D tisku v architektuře [9].....	27
Obr. 18 Možnosti výroby slévárenské formy [6].....	28
Obr. 19 Možnosti výroby formy pro lití do písku [6].....	29
Obr. 20 Možnosti výroby forem pro přesné lití na vytavitelný model [6]	30
Obr. 21 Ukázka hrubého opracovaného odlitku (vlevo) a opracovaného odlitku [9].....	31
Obr. 22 Postup výroby odlitku metodou Lost Wax [6].....	32
Obr. 23 Ukázka součásti vyrobené metodou Quickcast [42]	33
Obr. 24 Ukázka součásti vyrobené metodou Castform [43]	34
Obr. 25 Ukázka součásti vyrobené metodou Repliwax [44]	34
Obr. 27 Forma hlavy motoru vyrobená metodou DSPC (vlevo) a ukázka odlití do formy [6,45]	37