



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

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

VOJTĚCH VAŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vojtěch Vašek

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

v anglickém jazyce:

Possibilities of using modern methods in manufacturing of prototype castings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Literární rešerše problematiky zhotovení prototypových odlitků za pomoci nových moderních metod RP. Uvedení konkrétních příkladů úspěšné aplikace metod RP ve slévárenské praxi.

Cíle bakalářské práce:

Získání literárního přehledu nejmodernějších způsobů zhotovení prototypových odlitků.



J. Vašek

[Signature]

Seznam odborné literatury:

BEELEY, P.-R., SMART, R.-F. Investment Casting. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0 901716 66 9.

DOŠKÁŘ, J., GABRIEL, J., aj. Výroba přesných odlitků. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.

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

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

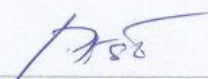
WIMPENNY, D. RP – a route to rapid castings. In: Proceedings of the 11th World Congress on Investment Casting. Edinburgh, 2004, p. 120-135.

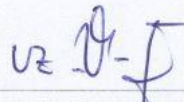
Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 5.11.2014




prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu


doc. Ing. Jaroslav Kátolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

Soubor technologií Rapid Prototyping je důležitou součástí průmyslu. Umožňuje zkrácení doby mezi poptávkou a zhotoveným prototypem součástí. Cílem práce je vypracovat literární rešerši zaměřenou na aplikaci těchto technologií ve slévárenství při výrobě prototypových odlitků.

Klíčová slova

slévárenství, rychlé prototypování, stereolitografie, 3D tisk, model, forma, odlitek

ABSTRACT

Rapid Prototyping technologies are an important part of the industry. They allow reducing the time between the demand and the crafted prototype component. The main aim of these theses is to create a literature survey, focused on the application of these technologies in the foundry industry in the production of prototype castings.

Key words

foundry, rapid prototyping, stereolithography, 3D printing, pattern, mould, casting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VAŠEK, V. *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..

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 29. 5. 2015

.....

Vojtěch Vašek

PODĚKOVÁNÍ

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

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod	8
1. Rapid Prototyping.....	9
1.1. Preprocessing.....	9
1.2. Processing.....	10
1.3. Postprocessing.....	10
2. Přehled nejvýznamnějších RP metod.....	11
2.1. Metody RP založené na tekutém základě (Liquid-Based)	11
2.1.1. Stereolithography Apparatus (SLA)	12
2.1.2. Solid Ground Curing (SGC)	14
2.1.3. Rapid Freeze Prototyping (RFP).....	15
2.2. Metody RP založené na pevném základě (Solid-Based).....	16
2.2.1. Laminated Object Manufacturing (LOM)	17
2.2.2. Fused Deposition Modeling (FDM)	18
2.2.3. Multi-Jet Modeling (MJM).....	20
2.3. Metody RP založené na práškovém základě (Powder-Based).....	21
2.3.1. Selective Laser Sintering (SLS)	22
2.3.2. Three-Dimensional Printing (3DP)	23
3. Uplatnění RP ve slévárenství	25
3.1. Trvalá forma	28
3.2. Netrvalá forma	31
3.2.1. Přímá výroba formy metodami RP	31
3.2.2. Výroba formy pomocí modelu	33
3.3. Trvalý model.....	33
3.4. Netrvalý model.....	34
3.4.1. Vytavitelný model.....	34
3.4.2. Vypařitelný model	36
3.4.3. Spalitelný model.....	38
4. Závěr	39
5. Seznam použitých zdrojů	40
6. Seznam obrázků.....	44

ÚVOD

Mezi hlavní rysy moderní doby patří zvyšující se nároky na rychlost, kvalitu a ekonomickou úsporu. To platí nejen v průmyslu, ale i v zemědělství a ostatních odvětvích.

V průmyslové výrobě má na tyto požadavky odpověď soubor technologií nazývajících se se souhrnně Rapid Prototyping (rychlé prototypování). Tyto technologie umožňují výrazné zkrácení doby od zadání zakázky ke zhotovení prvního prototypového kusu. Technologií RP je velké množství a správný výběr, tj, výběr nejlépe odpovídající požadavkům, zaručí optimální rychlost, kvalitu a sníží i ekonomické náklady.

Ve slévárenském průmyslu jsou tyto metody obzvláště ceněné a využívané. Umožňují získat první prototypový odlitek v daleko lepším čase než metody konvenční. Tím se zkracují dodací lhůty, je možné vyhovět více zakázkám a tak zůstat konkurenceschopným na poli strojírenské výroby.

Cílem bakalářské práce je shrnout moderní metody, které pomáhají při rychlé výrobě prototypových odlitků. V této práci bude vysvětleno několik základních pojmů týkajících se RP, jeho nejvýznamnější metody a poté jejich využití ve slévárenské praxi.

1. RAPID PROTOTYPING

Vývoj technologií Rapid Prototyping (RP) je úzce svázán s vývojem a aplikací počítačů v průmyslu. Vzdávající využití počítačů značně urychlil vývoj mnoha odvětví s ním spojených včetně Computer-Aided Design (CAD), Computer-Aided Manufacturing (CAM) a Computer Numerical Control (CNC) strojů. Tento rozvoj byl velmi důležitý pro vznik technologií RP.

Rapid Prototyping neboli rychlá výroba prototypu, představuje po manuální a virtuálním (lehkém) prototypování třetí fázi vývoje výroby prototypové součásti. Jedná se o nejmodernější postupy a technologie, které umožňují vytvářet modely v relativně krátkém čase¹ i úsporou výrobních nákladů přímo z 3D dat vytvořených v CAD/CAM systémech.[1] Ve většině případů se jedná o aditivní technologie, kde je na rozdíl od konvenčních metod obrábění materiál přidávám namísto jeho postupného odebrání (soustružení, frézování,...). Všechny v průmyslu používané metody RP pracují ve vrstvách, které se postupně vytvářejí na vrstvě předchozí a tím vytváří výslednou součást.[2]

V současnosti existují desítky RP metod, které se od sebe liší hlavně fyzikálními principy výroby modelu. Největším průkopníkem a výrobcem strojů v této oblasti je americká společnost 3D Systems. Jejich výrobky (3D tiskárny s technologiemi SLA, MJM nebo SLS) tvoří zhruba polovinu všech strojů v RP průmyslu.[1]

Postup RP bývá často dělen do 3 základních etap zpracování. Jsou to preprocessing (preparing), processing (building) a postprocessing. [1]

1.1. Preprocessing

Preprocessing shrnuje všechny postupy a opatření potřebné k přípravě dat pro tvorbu součásti. Patří sem převod CAD/CAM nebo jiného formátu na formát STL, se kterým tiskárny nejčastěji pracují. Při této konverzi dochází k aproximaci geometrického tvaru součásti na malé trojúhelníky, jejichž velikost a množství lze podle požadavku na přesnost regulovat. Hodně komplexní tvary a tvary obsahující malé poloměry je nutné aproximovat ještě větším množstvím menších trojúhelníků k zajištění co nejpřesnějšího tvaru součásti. Tato trojúhelníková síť je poté zkontrolována a případně opravena, protože v závislosti na mnoha faktorech se v modelu mohou během konverze objevit nechtěné struktury (pukliny, díry,...).

Následujícím krokem je rozdělení modelu na jednotlivé horizontální řezy s konstantní tloušťkou² a tím je částečně také určena přesnost hotového modelu.

¹ Rapid – v překladu „rychlý“ v tomto případě znamená zkrácení výroby modelu na hodiny popř. dny, pokud uvažujeme i návrh a počítačové modelování součásti.

² Např. pro metodu SLA je velikost jedné vrstvy již od 0,12 mm.

V poslední fázi se navrhnu potřebné podpůrné struktury a vygenerují se dráhy pro nástroj. Množství podpůrných struktur a do jisté míry i přesnost součásti lze také ovlivnit vhodným natočením modelu.

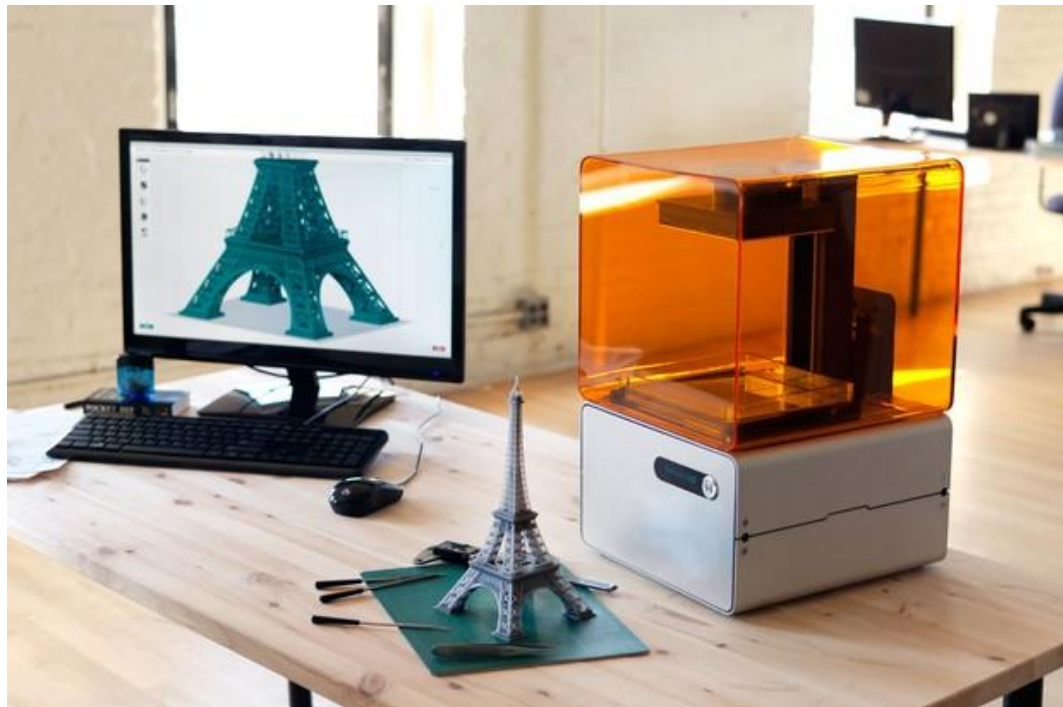
1.2. Processing

Processing (často také Building) představuje vlastní výrobu součásti. Většina RP technologií má tento krok plně automatizován a není tedy potřeba dohled odpovědného pracovníka a součást lze vytvářet „přes noc“. Proces zhotovení součásti může být poměrně časově náročný v závislosti na velikosti a počtu součástí³.

1.3. Postprocessing

Postprocessing je posledním článkem ve výrobním řetězci. V této fázi je obvykle nutné provádět další manuální operace, které mohou způsobit dodatečné poškození součásti. Součást se musí nejprve vyjmout ze zařízení a poté se provádí dokončovací operace. Mezi tyto operace patří odstraňování podpůrných struktur buď mechanicky nebo např. rozpuštěním. Dále odstranění přebytečného zachyceného materiálu například odsáváním (prášek) nebo proudem vody (polymer). Součást může být poté také pískována, broušena, barvena, lakována atd.

Některé metody vyžadují další zpracování k zajištění dostatečné pevnosti, tj. např. vytvrzování UV zářením nebo impregnací další látkou.



Obr. 1: Fáze 3D tisku [3]

³ Počet součástí, které lze vytvářet najednou je omezen velikostí tvořící plochy.

2. PŘEHLED NEJVÝZNAMNĚJŠÍCH RP METOD

Většina technologií RP se dá rozdělit do tří základních skupin:

- 1) Metody RP založené na tekutém základě
- 2) Metody RP založené na pevném základě
- 3) Metody RP založené na práškovém základě

V této kapitole bude uvedeno několik možných RP postupů pro každou skupinu. Důkladněji budou probrány pouze ty nejdůležitější a nejdůležitější pro využití ve slévárenství.

2.1. Metody RP založené na tekutém základě (Liquid-Based)

V těchto metodách, běžně známých jako vytvrzovacích je v počátečním stavu materiál v tekuté formě, ze které je poté různými postupy přeměňován na tuhý stav. Nejvíce těchto metod využívá pro výrobu dílů kád' s vytvrditelnou tekutou pryskyřicí, která působením laseru v oblasti UV vlnových délek způsobuje ztuhnutí materiálu. Laser působí pouze na vrstvu nejbližší k hladině, kde vytváří tvrdou vrstvu. Když je tato vrstva hotova, je poté spuštěna hlouběji do kádě, což umožní, aby se na jejím povrchu vytvořila další vrstva. Tento proces se opakuje, dokud není celá součást hotová. Kád' se poté vysuší, součást se vyjme, a pokud je to nutné, dále se součást opracuje. Existuje mnoho různých variací na tuto techniku, závisející na výrobcích těchto strojů. Liší se použitým typem laseru, metodou skenování, typem pryskyřice, zvedacím aparátem nebo použitým optickým systémem.[1]

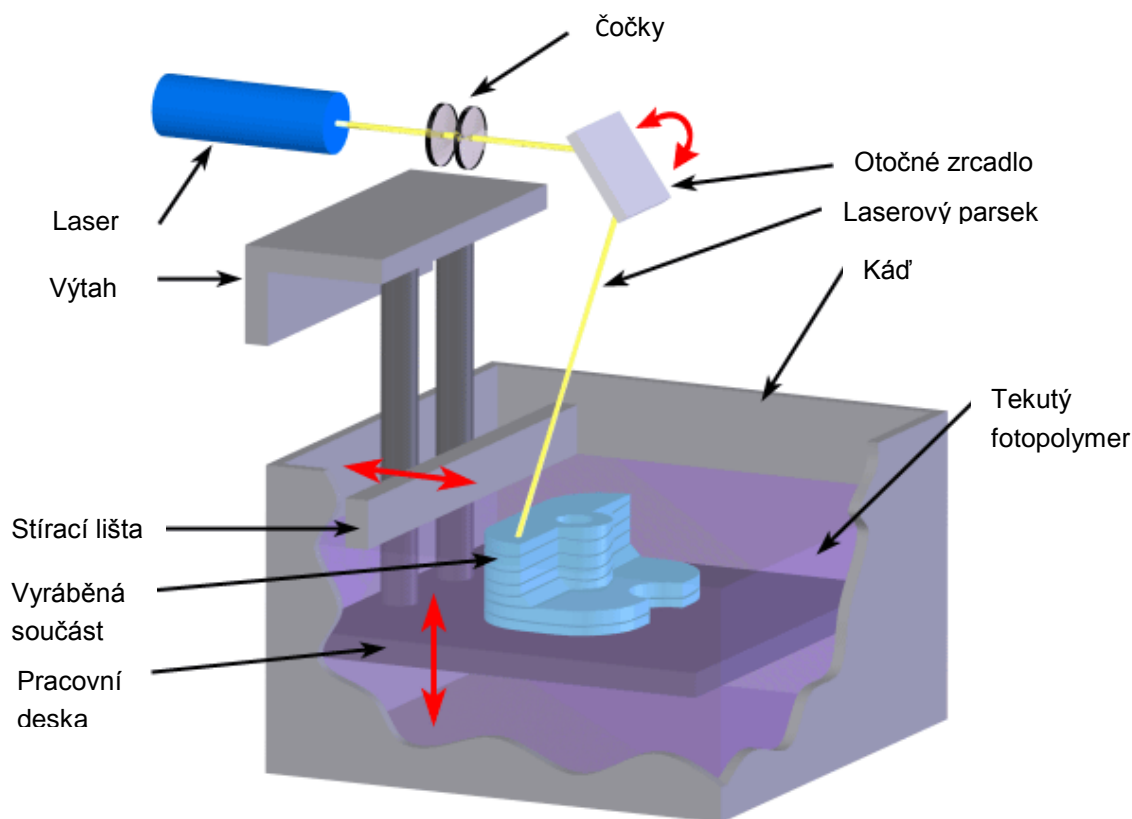
Do této kategorie patří například následující metody:

- Stereolithography Apparatus (SLA)
- Solid Ground Curing (SGC)
- Solid Creation Systém (SCS)
- Solid Object Ultraviolet-Laser Printer (SOUP)
- Soliform Systems
- Light Sculpting
- Aaroflex
- Rapid Freeze Prototyping (RFP)
- Two Laser Beams

2.1.1. Stereolitography Apparatus (SLA)

Stereolitography Apparatus, v češtině Stereolitografie, je běžně označována jako průkopník v technologii Rapid Prototypingu. Byl to první komerční systém uvedený na trh v roce 1988 společností 3D Systems, založenou roku 1986. Tato technologie získala více než 40 patentů v USA a 20 mezinárodních patentů a na přiznání dalších patentů ještě čeká.[1] Byla to revoluce ve vývoji napříč všemi odvětvími od dopravy, rekreace a zdravotnictví po spotřebitelské zboží i vzdělávání.[4] Stereolitografie je v současnosti jednou z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších metod rychlé výroby prototypů plastových modelů.[5] Oproti jiným technologiím je možno stereolitografií vytvářet modely s milimetrovými otvory a miniaturními prvky. Stejně jako u většiny ostatních technologií je možno modely vyrobené stereolitografií použít pro vizuální kontrolu návrhu výrobku a prezentace výrobků. V některých případech i k funkčním zkouškám a díky široké paletě materiálů i jako forem pro vstřikování a lití (přesné lití a lití do písku).[1,6] Její hlavní princip, tedy vytváření výrobku po vrstvách, byl později použitý ve všech dalších metodách rychlé výroby prototypů.[7]

Metoda stereolitografie využívá schopnosti některých speciálních akrylátových nebo epoxidových pryskyřic vytvrzovat při osvětlení UV zářením. Stavební materiál (pryskyřice) je uložen ve velkém zásobníku – nádrži (kádi) – na jejíž hladinu je zaměřen úzký laserový paprsek UV záření. Paprsek se po hladině pohybuje tak, že postupně vykreslí obrysy a vyšrafuje hustou síť vnitřní plochu příslušného řezu budoucího výrobku. Vytváří se zároveň i podpurná síť, která musí být poté odstraněna. K vytvrzení dochází vlivem přenesení určitého kvanta energie do bodu ve tvaru polokoule o průměru asi 0,2 mm. Tím se vytváří také tloušťka vrstvy. K největšímu vytvrzení dochází samozřejmě ve středu této polokoule, směrem k jejím okrajům se stupeň vytvrzení (pevnost a hustota polymerových vazeb vytvořených v pryskyřici) snižuje. Tak dostaneme dvourozměrný řez výrobkem. Třírozměrný model dostáváme složením jednotlivých řezů na sebe. U stereolitografu – a stejně tak i u jiných metod – slouží první vrstvy k připevnění budoucího modelu na pevnou – perforovanou – desku, která se v nádrži pohybuje dolů. Po vykreslení každé vrstvy se tato podložka – spolu s již vytvořenou částí modelu – zanoří pod hladinu pryskyřice právě o tloušťku jedné vrstvy. Tato tloušťka musí být dostatečně malá, aby byla zachována požadovaná přesnost modelu ve vertikálním směru, a dostatečně velká, aby byla zachována vysoká produktivita výroby. Omezujícím parametrem pro velkou tloušťku vrstvy je obvykle výkonnost laseru a schopnost pryskyřice dostatečně vytvrdit v dané tloušťce. Obvykle se používají plynové nebo pevnolátkové lasery, jejichž záření je popřípadě změněno krystalem na příslušnou vlnovou délku, při které daná pryskyřice polymeruje. Vzhledem k vysoké intenzitě dodaného světla dochází k vytvrzení ve velmi krátké době.[7]



Copyright © 2008 CustomPartNet

Obr. 2: Schéma metody SLA [8]

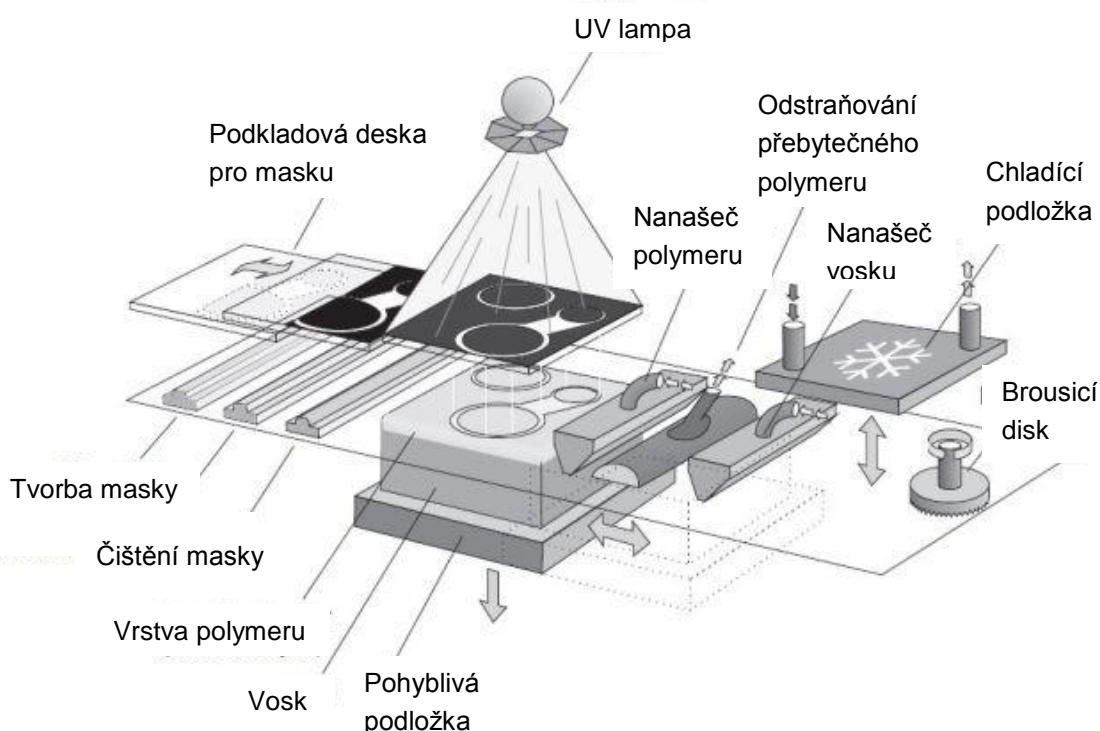
Výhody a nevýhody [1,2,4]

- + Nepřetržitá metoda – SLA může být využívána nepřetržitě a bez nutnosti dozoru.
- + Produktivní – Součást může být vyrobena v relativně krátké době.
- + Automatizovaný proces – Není nutný nepřetržitý dohled.
- + Objemová přizpůsobivost – Různé SLA stroje mohou zpracovávat různé objemy pryskyřic a vyrábět tak značně rozměrné součásti (až 1524 mm).
- + Preciznost a přesnost – Tolerance na SLA vyrobených součástkách jsou typicky menší než 0,05 mm a drsnosti povrchu lepší než nabízí jiné aditivní RP procesy.
- + Široká škála materiálů – Využívá se různých druhů materiálů s rozdílnými mechanickými vlastnostmi, např. polypropylen, ABS i biokompatibilní materiály pro výrobu chirurgických nástrojů, zubních implantátů apod.
- Vyžaduje podpory – Konstrukce, které obsahují přesahy nebo vybrání musí mít podpory, které jsou zahrnuty už v návrhu pro SLA výrobu a jsou zhotoveny zároveň s hlavní konstrukcí.
- Nutnost post-procesingu – Zahrnuje odebrání podpurných struktur, jiných nechtěných materiálů a celkové čištění, což je zdouhavé a hrozí nebezpečí poškození modelu.
- Nutnost dalšího ošetření kvůli zajištění celkové integrity struktury - vytvrzováním.
- Nákladné – Vysoká pořizovací cena stroje a drahý materiál.

2.1.2. Solid Ground Curing (SGC)

Metoda byla vyvíjena izraelskou společností Cubital Ltd. v letech 1987-1991.[1] Metoda využívá, podobně jako metoda SLA, opticky vytvrditelný polymer zpracovávaný ve vrstvách. Liší se ale principem, ve kterém je celá vrstva vytvořena na jedno osvětlení.[9] Využití této metody je kromě obecných aplikací jako prezentace výrobku, kontrola designu a jeho úpravy i ve zdravotnictví (výroba protéz) a slévárenství. Ve slévárenství se uplatňuje v oblasti přesného lití (investment casting), lití do písku (sand casting). Dále také ve výrobě forem a nástrojů za použití různých „tooling“ technologií (silicon rubber tooling, epoxy tooling, acrylic tooling,...).

Součásti jsou vyráběny vrstvu po vrstvě z tekutého polymeru citlivého na světlo za pomoci „masek“, přes které se ultrafialovým světlem vytvrzuje fotocitlivý polymer. Zdrojem záření je v tomto případě UV lampa. Masky jsou nejčastěji tvořeny skleněnou destičkou, na které je vyznačený tvar vyráběné vrstvy. Celá vrstva se v tomto případě vytváří naráz. Vznik tělesa tedy probíhá ve dvou oddělených, současně probíhajících cyklech. Nejdříve je vytvořena negativní maska a potom dojde k osvětlení fotopolymeru. Osvícený fotopolymer ztvrdne, neosvětlený tekutý fotopolymer je odsáván a vzniklý meziprostor se vyplní voskem. V dalším kroku je povrch vytvořené vrstvy opracovaný na požadovanou výšku vrstvy a tím je připravený na nanášení další tenké vrstvy tekutého fotopolymeru. Vosková výplň zůstane ve vytvářeném tělese až do konce procesu vytváření, potom je chemickou cestou (pomocí kyseliny citrónové) odstraněna.[1][6]



Obr. 3: Schéma metody SGC [10]

Výhody a nevýhody [1]

- + Výroba více součástí
- + Není potřeba podpůrných struktur.
- + Minimální smršťování a vysoká přesnost.
- + Vysoká pevnost a stabilita – Vytvrzovací proces minimalizuje vznik vnitřních napětí.
- + Neprodukuje výpary – Pryskyřice je ve velmi krátké době vytvrzena a přebytečná hmota ihned odstraněna.
- Zařízení vyžaduje hodně místa a je hlučné.
- Vosk se špatně dostává z rohů a štěrbin – Hlavně u složitějších výrobků.
- Velké množství odpadového materiálu.

2.1.3. Rapid Freeze Prototyping (RFP)

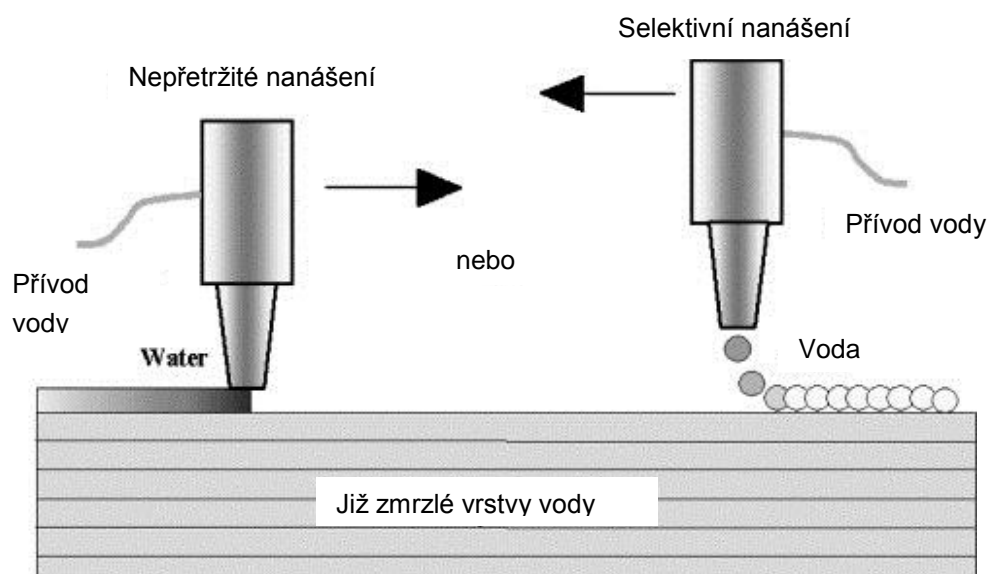
Většina existujících postupů RP je relativně nákladná a mnoho z nich produkuje nežádoucí produkty jako kouř, prach, nebezpečné chemikálie apod., které jsou škodlivé lidskému zdraví i přírodě.[1] Metoda RFP byla vyvíjena na Missouri University of Science od roku 2002.[11] Cílem bylo vyvinout RP postup šetrný k životnímu prostředí, využívající levnějších nezávadných materiálů a který dokáže kombinovat silné spojení materiálu, dobrou přesnost a rychlost výroby. Tato metoda je velmi vhodná po použití ve slévárenství. Firma DURAMAX zkoumala využití ledového vzorku a vyvinula speciální technologii vytavitelného modelu, tzv. Freeze Cast Process (FCP). Tato metoda má oproti vytavitelnému nebo vypařitelnému modelu několik výhod jako je snížení nákladů, vysoká kvalita, kvalitní povrch, nepraskající skořepina apod.[1]

Základním principem této metody je postupné vytváření vrstev mrznoucími kapkami vody.[11] Existují 2 způsoby nanášení vody: nepřetržitý a selektivní (drop-on-demand). Při nepřetržitém postupu je voda tryskána na předchozí vrstvu oproti tomu selektivní postup umožňuje vypustit kapku jen, když je třeba. V modelovacím prostoru je udržována teplota pod bodem mrazu vody. Dopadající kapky ihned díky konvekci a kondukcii zamrzají. Po dokončení jedné vrstvy je tryska posunuta o výšku vrstvy nahoru kde předem určenou dobu čeká, než voda zcela ztuhne. Celý proces se opakuje, dokud není vytvořena celá součást. [12,13]

Výhody a nevýhody [1]

- + Nízká výrobní cena – Levnější materiál i menší spotřeba energie
- + Dobrá přesnost – Metodou RFP lze vytvářet přesné součástky z ledu s velmi kvalitním povrchem. K tomu dopomáhá snadné odstranění RFP součásti z formy zvýšením teploty a roztáním ledu.
- + Rychlá výroba součástí – Součást může být vyrobena jako „skořepina“, která je poté vyplněna proudem vody (takto lze vytvářet i průhledné nebo barevné modely).
- Vyžaduje chladné prostředí

- Potřeba dodatečné úpravy rozměrů – Kvůli specifickým vlastnostem vody mohou nastat nepřesnosti v rozměrech modelu. Proto se musí každý výrobek kontrolovat a dodatečně upravit.



Obr. 4: Schéma metody RFP [1]

2.2. Metody RP založené na pevném základě (Solid-Based)

RP metody pracující s pevným základem se nejen velmi liší od metod, které využívají výchozího materiálu v tekutém stavu. Liší se značně i mezi sebou navzájem, ačkoli některé metody ve své technologii výroby prototypu také využívají laseru. Základní společný znak této skupiny je, že všechny metody využívají pevné látky jako primární prostředek k vytvoření prototypu. Pevné látky se zpracovávají v mnoha formách a tvarech, například jako drát, kuličky, laminát, role nebo svitky. Speciální skupinou těchto metod RP jsou ty, které zpracovávají prášek jako základ výroby prototypu. Tato podskupina bude vysvětlena v další kapitole. [1]

Pod tuto definici můžeme zahrnout například tyto metody:

- Laminated Object Manufacturing (LOM)
- Fused Deposition Modeling (FDM)
- Paper Lamination Technology (PLT)
- Multi-Jet Modeling (MJM)
- Slicing Solid Manufacturing (SSM)
- Melted Extrusion Modeling (MEM)

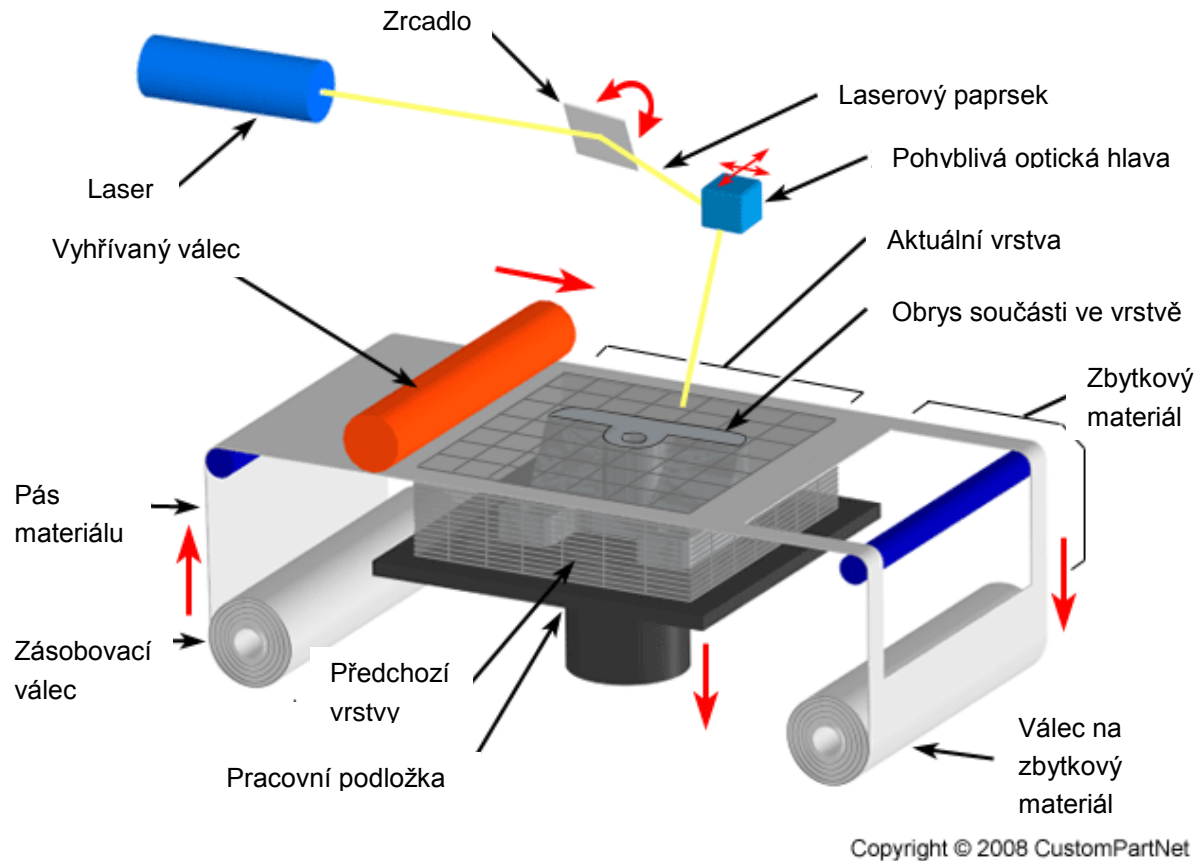
2.2.1. Laminated Object Manufacturing (LOM)

Metoda byla vyvinuta firmou Helisys Inc. (dnešní Cubic Technologies) roku 1995 v USA.[1] Základním principem této metody je, že se model sestavuje z plastových folií nebo z mnoha vrstev papíru napuštěného zpevňující hmotou, které jsou oříznuty do správného tvaru laserem. Je to technologie se širokým spektrem uplatnění. Své největší využití však má v oboru slévárenství, kde slouží k výrobě méně komplexních nebo objemnějších master modelů pro lití do písku, vakuové, odstředivé, tlakové lití i lití na vypařitelný a vytavitelný model. Pro svoji menší přesnost se ovšem nehodí k výrobě funkčních prototypů. [14,15]

LOM zařízení využívají nepřerušovaného pruhu materiálu (plast, papír, méně často plech), který se natáhne přes pracovní plošinu soustavou válců (zásobníkový válec a válec se zbytkovým materiálem). Plastové a papírové fólie jsou napuštěny spojovací hmotou (lepidlem). K vytvoření součásti dochází tak, že vyhříváný válec přejezdí přes pruh materiálu na pracovní plošinu, kde rozpustí lepidlo a vytvoří tlak na podložku. Počítačem řízený CO₂ laserový paprsek nebo nůž poté vyřeže v materiálu požadovaný tvar. Laser zároveň rozřeže přebytečný materiál na menší části, což ulehčí jeho odstraňování po dokončení součásti. Poté co se takto vytvoří jedna vrstva, plošina je snížena o tloušťku vrstvy fólie. Přes pracovní desku je natažena nová vrstva a celý proces se opakuje, dokud není požadovaná součást hotová.

Výhody a nevýhody [1,14,15]

- + Malá vnitřní napětí – Menší riziko vzniku zkreslení, smrštění a deformace.
- + Velká pevnost, odolnost a malá křehkost modelu
- + Výroba velmi velkých součástí
- + Materiál – Velká různorodost použitelných materiálů (papír, plast, kov, kompozity, keramika).
- + Rychlost výroby a dobrá obrobiteľnosť součásti
- + Není potřeba podpurných konstrukcí – Součást je podepíraná svým vlastním materiálem na vnějším okraji. Tento materiál není během procesu odebírán a souží jako podpora.
- Nemožnost vyrábět dutiny a tenké stěny
- Problematické řízení přesnosti v ose Z – Může docházet k různým vyvýšeninám.
- Přesné nastavení síly laseru – Síla laseru musí být přesně nastavena, aby laser řezal jen aktuální vrstvu laminátu a neproniknul do vrstev předchozích.
- Problémové oddělení součásti a okolní struktury – Obvykle se využívá řezbářských pomůcek k oddělení těchto částí, což může být velmi namáhavé, zdlouhavé a pracovník provádějící tento úkon musí být velmi opatrný a musí znát celkový tvar součásti, aby nedošlo k jejímu poškození.



Obr. 5: Schéma metody LOM [8]

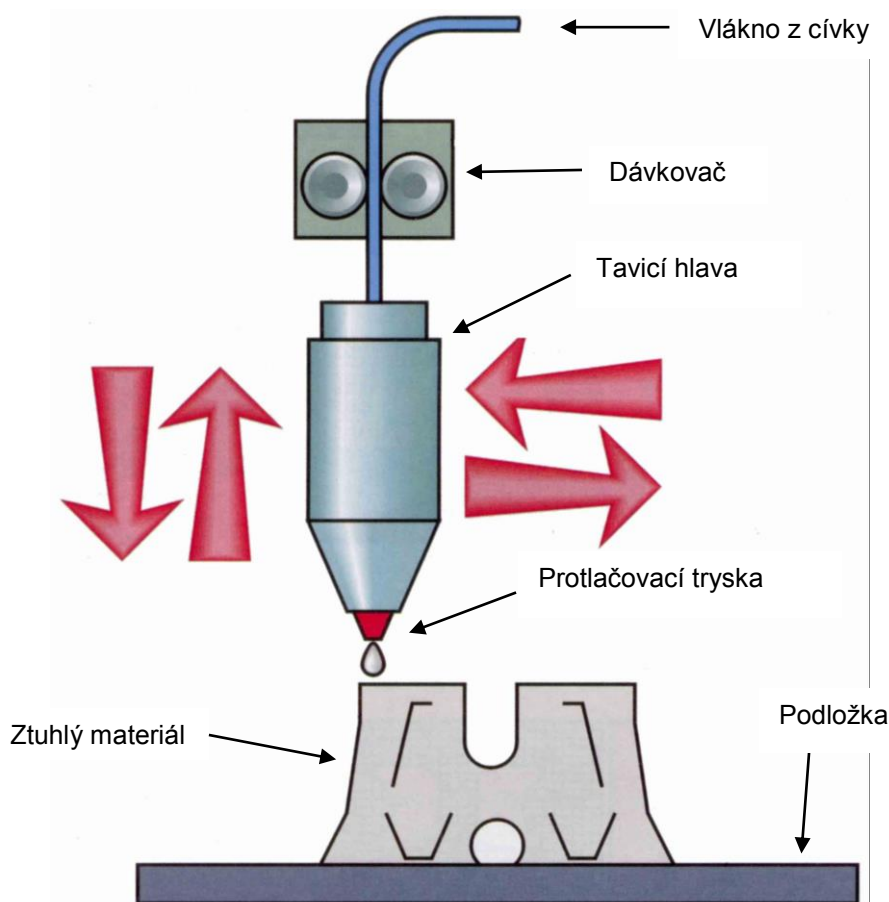
2.2.2. Fused Deposition Modeling (FDM)

Technologie byla vyvinuta na počátku 90. let 20. století firmou Stratasys Inc. v USA. Metoda se rychle ujala a její využití významně vzrostlo.[1] Název lze volně přeložit jako „modelování za pomoci roztaveného materiálu“ a jedná se o druhou nejpoužívanější RP technologii hned po Stereolitografii. Princip je podobný jako u tavných lepicích pistolí. Materiál je ale v tomto případě ve formě vláken navinutých na cívce (podobně jako rybářský vlasec), která jsou poté roztavena v hubici roztavena.[2] Využití této metody je široké. Od prezentačních a designových modelů po funkční a technické prototypy. Ve slévárnictví slouží tyto modely například jako master modely k výrobě forem (lití do písku, vytavitelný model,...).[1,2]

Plastové vlákno je odmotáváno z cívky a tím je zajištěn přísun materiálu do vytlačovací hubice. Tato hubice/tryska je zahřáta na teplotu tání plastu a má mechanismus, který umožňuje regulovat tok materiálu. Vedle této trysky je ještě jedna, která dodává materiál pro podpory. Tryska se poté pohybuje v X-Y směru po požadované geometrii, zároveň vypouští tenké kapičky vytlačovaného plastu. V celém systému je udržována nízká teplota a plast tak okamžitě tuhne a spojuje se s předchozí vrstvou a tím vytváří vrstvu novou. Model je umístěn na modelové desce, která se

pohybuje ve vertikálním směru dolů vrstvu po vrstvě a tak dojde k vytvoření celé součásti. [16]

Tato metoda má neodmyslitelnou výhodu, že existuje software Insight, který automaticky generuje podpory (jiné používané softwary jako QuickSlice® a SupportWork™ toto neumožňují). Pomocí tohoto softwaru je CAD model po nastavení ideální pozice rozdělen na horizontální vrstvy a jsou vygenerovány nutné podpory.[1]



Obr. 6: Schéma metody FDM [17]

Výhody a nevýhody [1,2,16]

- + Výroba funkčních součástí – Lze vytvářet součásti z materiálu, který má podobné vlastnosti jako skutečný výrobek. Například z ABS plastu lze vyrobit plně funkční součást, která má až 85% pevnost skutečné součásti.
- + Minimální odpad – Metoda využívá minimum materiálu, který je potřebný k výrobě součásti i podpurných konstrukcí.
- + Snadné odstraňování podpor – K vytvoření podpor se využívá materiálů, které lze snadno rozbít nebo je stačí pouze smýt vodou.

- + Možnost využití široké palety materiálů a změny materiálu i během procesu – Je možné kontinuálně během výroby doplňovat, měnit materiál i jeho barvu. Příklad použitelných materiálů: ABS, ABSi, PC, PC-ABS a PC-ISO, PPS
- Omezená přesnost – Přesnost metody je omezena minimální výškou nanášené vrstvy, která se pohybuje v rozmezí 0,13 - 0,33 mm. To je dáno povahou použitého materiálu.
- Pomalý výrobní proces – Během výroby se musí materiálem vyplnit celý průřez aktuální vrstvy. Rychlost plnění je dána rychlostí vytlačovací hlavy a viskozitou materiálu, která je v případě použití plastu relativně vysoká.
- Nepředpověditelné staženiny v modelu – Prudké ochlazení vytlačovaného materiálu zanáší do součástí napětí, která jsou očekávatelná ovšem obvykle těžko předpověditelná. Tomuto se dá zamezit úpravou parametrů procesu.

2.2.3. Multi-Jet Modeling (MJM)

MJM je další metodou RP vyvinutou společností 3D Systems, Inc. roku 1996. [1] Využívá se tzv. ThermoJet® nebo modernějších ProJet® 3D tiskáren. Metoda byla navržena pro rychlou a méně komplikovanou výrobu modelů z vytvrditelných termoplastů.[2,4] Metoda má široké možnosti uplatnění. Přesné a levné a snadno ovladatelné tiskárny jsou vhodné pro „kancelářské“ prostředí, kde jsou „na dosah“ konstruktérům. Slouží například k výrobě ukázkových modelů a také k výrobě voskových modelů pro využití ve slévárenství.[1,4]

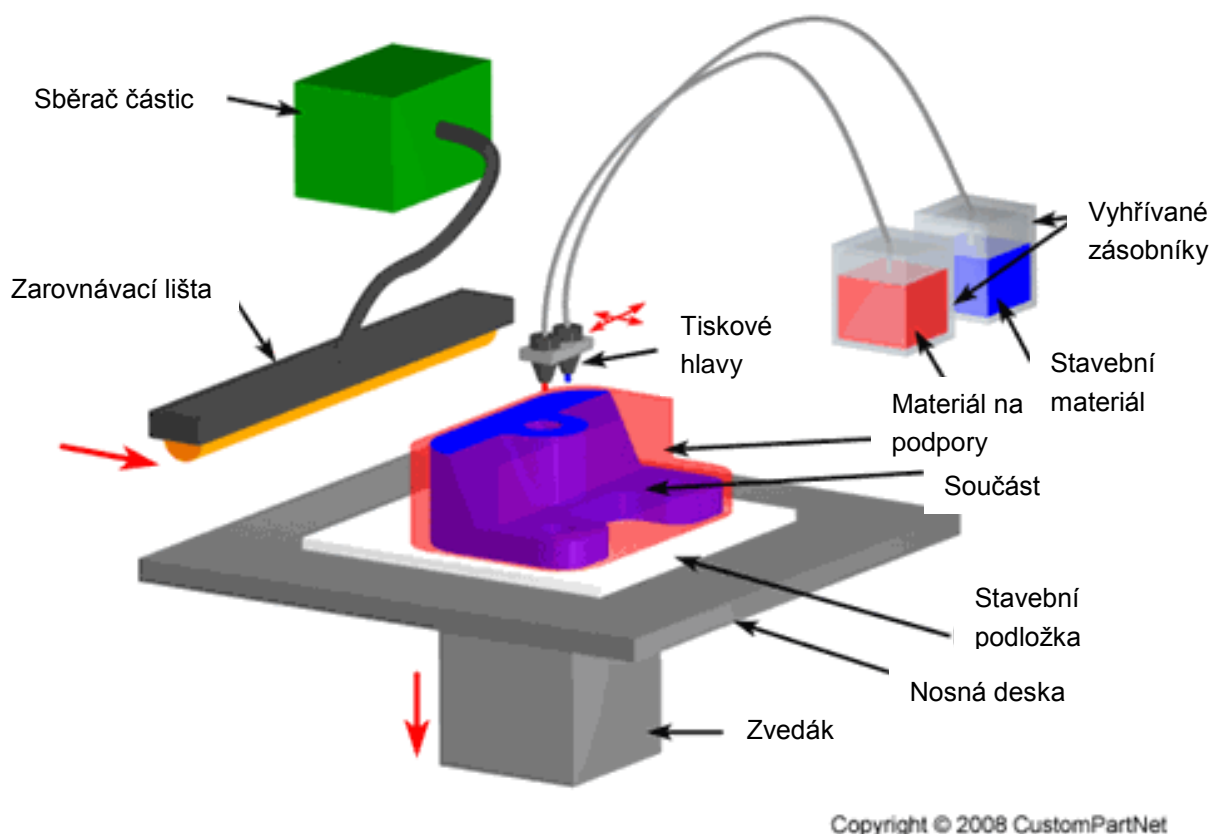
MJM je technologie využívající piezoelektrických tiskových hlav, které vypouští na pracovní plochu vrstvu po vrstvě buď fotopolymer nebo slévárenský vosk.[4] Tyto hlavy jsou naskládány v řadě vedle sebe⁴ (v ose Y), takže na jednu vrstvu stačí jedno projetí sestavy (osa X). Pokud je součást širší než tisková hlava tak se hlava přesune po ose Y tak, aby byla vytvořena celá součást. Současně s výrobkem se vytváří všechny podpůrné struktury jehličkovitého tvaru z vlastního, lehce oddělitelného materiálu. Součástí tiskárny je také UV lampa, která se v nastavených intervalech rozsvěcuje a tím zajišťuje plně vytvrzenou součást. Po dokončení jedné vrstvy se podložka od tiskárny oddálí o danou vzdálenost (v ose Z) a vytváří se další vrstvy, dokud není hotová celá součást (podobně jako u SLA).[1,2,4]

Výhody a nevýhody [1]

- + Efektivní, rychlé a snadno použitelné – Každá vrstva se rozdělí na jednotlivé tiskové body, kterých je konstantní počet a software pouze rozhodne, kde bude vypuštěn materiál.

⁴ 352 trysek pro ThermoJet@[1], 304 pro jednobarevný a až 1520 pro 5 barevný ProJet@ tisk [http://www.3dsystems.com/files/projet-x60-series-us_0.pdf]

- + Nízké náklady – Levný materiál, tiskárny pracují na běžné napájení domácí nebo kancelářské elektrické sítě.
- + Dobrá přesnost v ose Z – Až 16 mikronů.
- Výroba pouze menších modelů – Liší se od typu tiskárny, ovšem v porovnání s většinou moderních vyspělých metod jsou max. rozměry menší. Typicky kolem 380 x 380 x 250 mm.[4]
- Omezený výběr materiálů – Nelze přímo vytvářet funkční modely, jejichž funkčnost souvisí s materiálem součásti.



Obr. 7: Schéma technologie MJM [8]

2.3. Metody RP založené na práškovém základě (Powder-Based)

Do důsledku vzato, prášek je obecně materiál v pevném stavu. Nicméně pro větší přehlednost a pochopení je toto téma vyčleněno zvlášť. Metody spadající do této kategorie mají některé společné rysy s metodami již zmíněnými a to jak metodami na bázi tekutin tak i výchozím materiálu v pevném stavu. Mnohé metody například využívají laseru k „vykreslení“ tvaru vrstvu po vrstvě, jiné ke spojování aplikují tmel nebo lepidlo. Avšak hlavní odlišovací znak a současně největší spojovací prvek této skupiny je využívání materiálu pro výrobu prototypové součásti v sypaném stavu – prášku. [1]

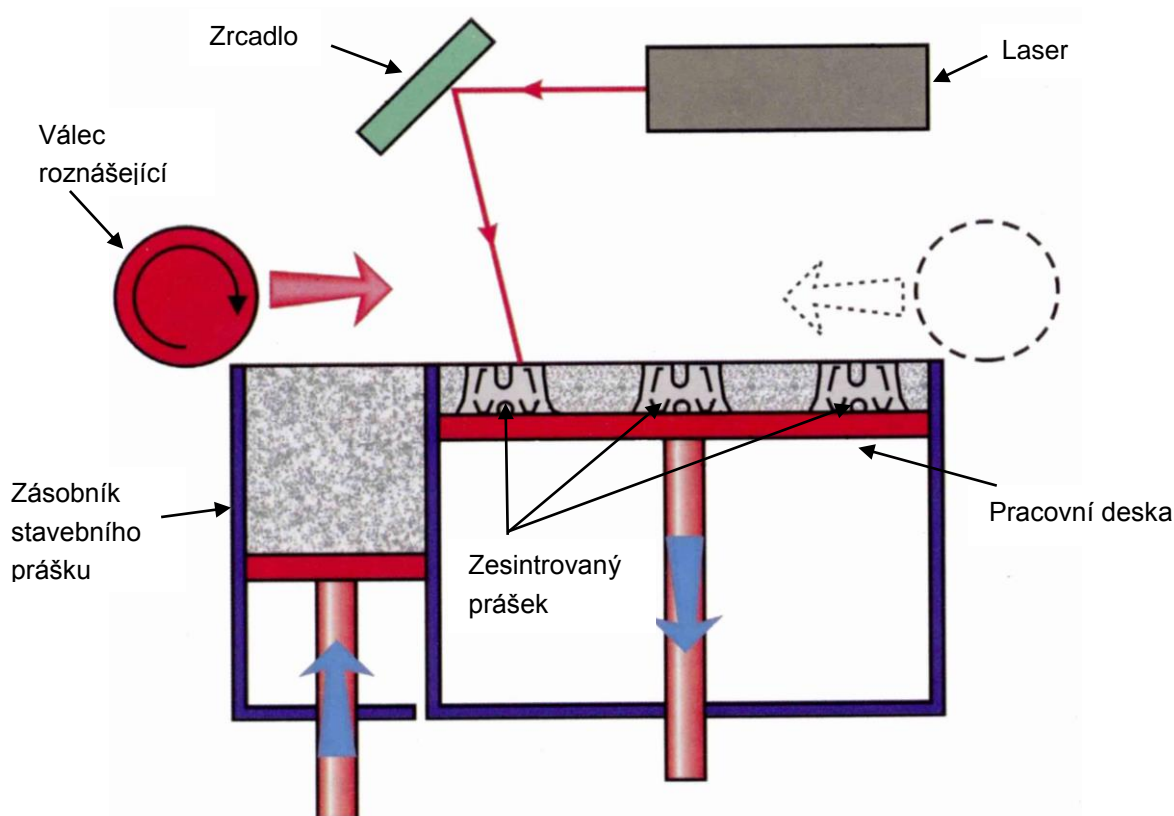
Mezi tyto technologie řadíme například následující metody:

- Selective Laser Sintering (SLS)
- EOSINT Systems
- Three-Dimensional Printing (3DP)
- Multiphase Jet Solidification (MJS)
- Electron Beam Melting (EBM)
- Lasform Technology
- Direct Metal Deposition (DMD™)
- Generis' RP Systems (GS)

2.3.1. Selective Laser Sintering (SLS)

Do češtiny volně přeloženo jako selektivní spékání laserem či v praxi používanější termín „sintrování“. Tato technologie byla vyvinuta v polovině 80. let v Texasu společností DTM Corp. dnes pod vlastnictvím společnosti 3D Systems.[1,18] Metoda je velmi podobná již zmíněné metodě stereolitografie, ovšem základním rozdílem je použitý základní stavební materiál – prášek. Mezi hlavní materiály pro výrobu prášku se řadí polyamidy využívané k výrobě plastových funkčních výrobků, elastomery pro různá těsnění, polykarbonáty, které se využívá k výrobě modelů pro lití do písku a lití na vytavitelný model, nylon, který nabízí velkou chemickou a tepelnou odolnost a výrobky z něj dokážou vydržet i velmi náročné provozní podmínky. Dále lze využívat i práškových kovů a keramiky, které jsou vhodné k výrobě jader pro odlévání a jako modely pro vstřikování plastů. Metoda má v průmyslu využití pro koncepční a testovací modely, funkční prototypy, master modely pro lití do písku a výrobu funkčních nástrojů a forem pro malé série.[1]

Výroba součásti probíhá spékáním prachových částic materiálu za pomoci CO₂ laseru. Celý systém je kvůli zajištění dokonalé výroby součásti hermeticky uzavřen před okolními nežádoucími vlivy. Výroba každé vrstvy začíná nanesením vrstvy prášku na podložku nanášecím válcem. Poté se laser pohybuje po softwarově vytyčených trajektoriích. Dochází k interakci laseru a prášku. V místě dopadu paprsku dochází k intenzivnímu zahřívání a tím dochází k rozpuštění a spojení prachových částic. Intenzita laseru je jen taková, aby působila na právě opracovávané vrstvě. Zbylý prášek obklopující ošetřenou geometrii zůstává na místě jako podpurná struktura pro další vrstvu. Když je celá vrstva takto opracována, píst sjede dolů o tloušťku jedné vrstvy, váleček nanese další vrstvu prášku. Každá vrstva se sloučí s předchozí vrstvou a proces je opakován, dokud není vytvořena celá součást. Po vychladnutí prášku se součást vyjme a zbylý prášek je jednoduše očištěn a znovu použit. [1,4]



Obr. 8: Schéma metody SLS [17]

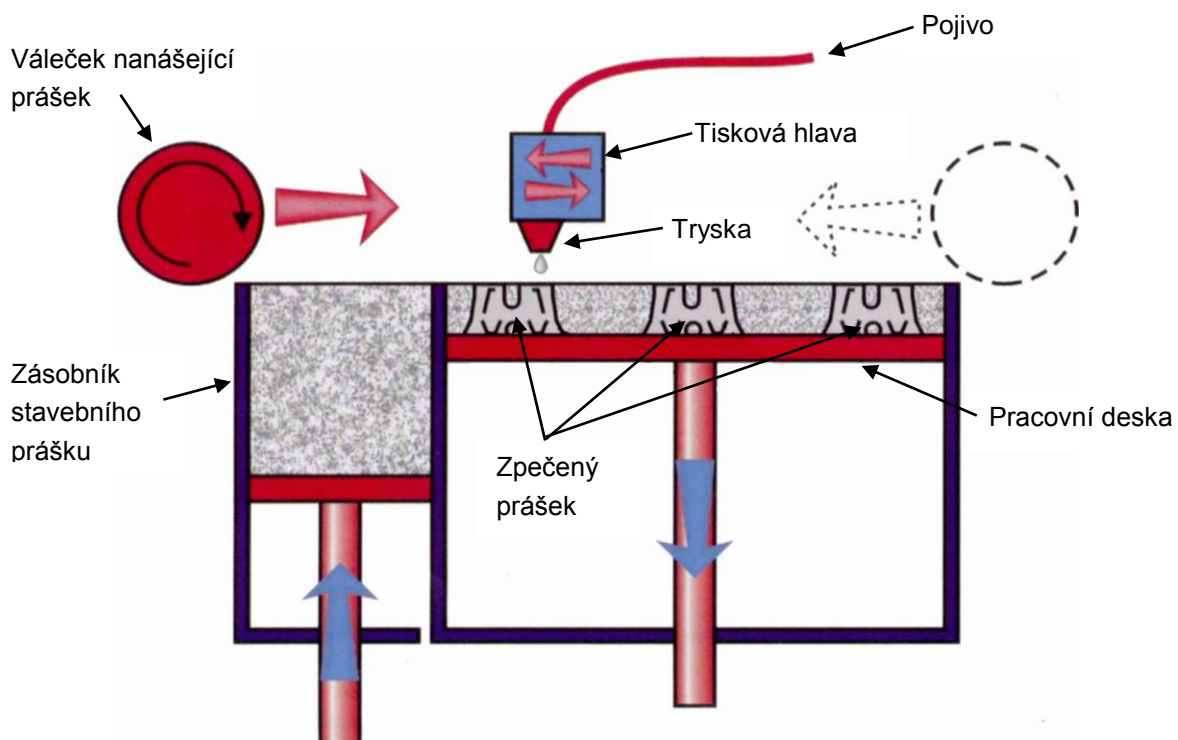
Výhody a nevýhody [1,2]

- + Výroba pevných součástí – Kombinací použitého materiálu a kvalitního výrobního prostředí lze vytvářet přímo funkční součásti.
- + Široká škála materiálů – Nylon, polykarbonáty, kov, keramika, elastomery, sklo...
- + Není potřeba vytvářet žádné podpurné struktury
- + Žádné dodatečné vytvrzování a minimální dodatečné opracování
- Velikost zařízení – Kromě samotného zařízení je ještě nutné umístit nádrže inertního plynu.
- Velká spotřeba energie – Potřeba napájet vysokovýkonný laser.
- Horší drsnost povrchu – Ovlivněno velikostí prachových částic.

2.3.2. Three-Dimensional Printing (3DP)

Tato metoda byla vynalezena a patentována v Massachusetts Institute of Technology (MIT) a následně licencována a vylepšována firmou Z Corporation, která roku 1997 uvedla na trh první 3DP tiskárnu – ZTM402.[1] Jde o spojování práškového materiálu za pomoci vstříkované tekutiny. Metoda využívá podobnou technologii jako SLS technologie, avšak namísto laseru se využívá tiskové hlavy. Využití této metody je hlavně pro výrobu koncepčních modelů, omezené funkční testování a master modelů pro výrobu forem.[2,8]

Proces začíná tím, že je za pomoci pístu vyzvednuta podložka do požadované výšky. Na tuto podložku se nivelačním válcem nanese tenká vrstva prášku. Tisková hlava⁵ nanese na požadovaná místa práškového lože tekuté pojivo. Tím dojde v těchto místech k propojení práškových zrn. Zbylý prášek zůstává na místě a slouží jako dočasná podpora pro následující vrstvy. Po dokončení jedné vrstvy píst spustí plošinu dolů, nanese se nová vrstva prášku, zkontroluje se vodorovnost a proces tisku se opakuje, dokud není součást hotová. Po dokončení tisku je součást vyndána a očištěna od přebývajících prášku (např. vysavač, kartáč). Tyto součástky jsou obvykle ponořeny do tmelu pro zlepšení pevnosti a kvality povrchu. [1,8]



Obr. 9: Schéma metody 3DP [17]

Výhody a nevýhody [1,2]

- + Rychlost – Nejrychlejší metoda 3D tisku, až 10x rychlejší než ostatní metody⁶.
- + Univerzálnost – Využití v široké oblasti průmyslu, možnost tmelení nebo barvení.
- + Snadná obsluha – Nevyžaduje dohled zvláštního pracovníka.
- + Minimální odpad – Nezpevněný prášek lze recyklovat
- Pouze omezené funkční testování – Oproti SLS méně pevné a křehčí součásti.
- Limitovaný výběr materiálů
- Horší drsnost povrchu – Často je nutná dodatečná úprava povrchu.

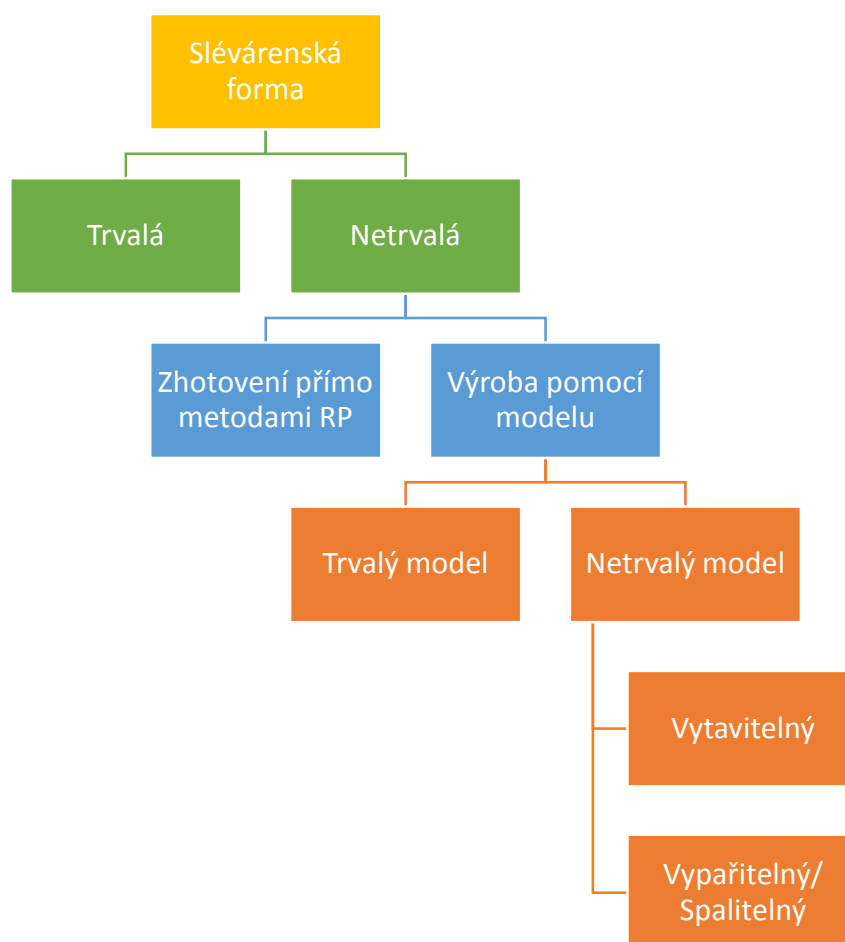
⁵ Tisková hlava může vstříkovat všemi tryskami buď jednu barvu pojiva nebo každou z trysek jinou barvu pro vícebarevné součásti.

⁶ Za 1 minutu je možno vytvořit až 4 vrstvy [8]

3. UPLATNĚNÍ RP VE SLÉVÁRENSTVÍ

Některé technologie RP umožňují vytvořit kovovou prototypovou součást přímo. Tento postup ovšem není vhodný k určování vlastností výsledného produktu, protože k sériové výrobě se využívá jiných postupů, například odlévání. Ve slévárenských aplikacích je cílem získat co nejrychleji první prototypový odlitek a proto je zde využívání metod RP soustředěno zejména na tvorbu modelů a jader, která jsou pak využita klasickým způsobem pro různé technologie lití. Pomocí některých metod lze také vytvářet přímo celou kompletní formu, přímo využitelnou pro lití.

Oblast výroby odlitku se skládá ze dvou oblastí, tj. výroba slévárenské formy a výroba modelu. Modely i formy mohou být trvalé nebo netrvalé a vyrábějí se několika způsoby. Přehlednější dělení viz obr. 10.



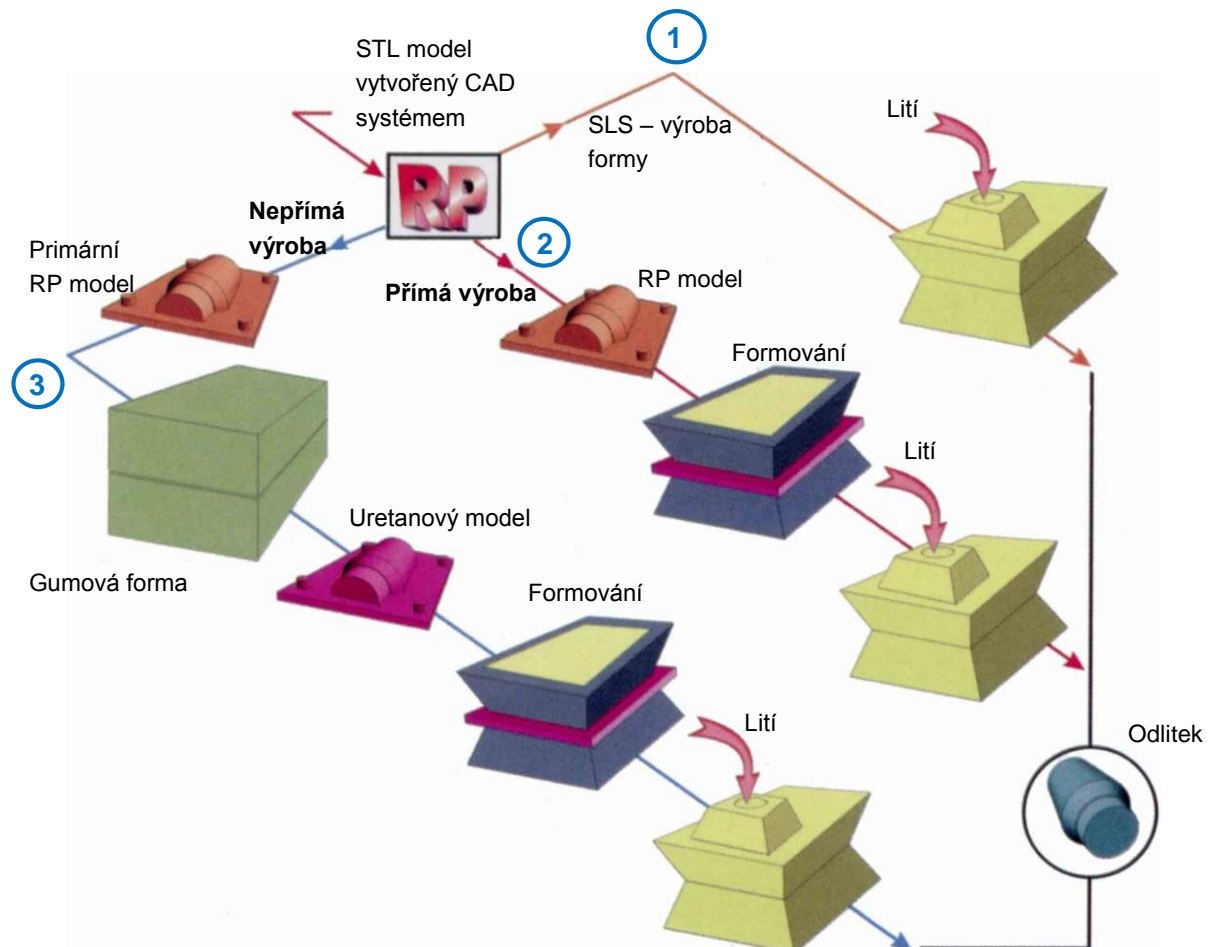
Obr. 10: Možnosti výroby slévárenské formy

Metody RP lze použít při zhotovení prototypových součástí:

- když místo odlitku se použije metoda RP – 3D tisk součásti z kovového prášku.
- použijeme metody RP ke zhotovení trvalé formy.
- zhotovíme trvalý model jednou z metod RP.

- zhotovíme vytavitelný model jednou z cest 2,3,4 na obr. 12.
- zhotovíme vypařitelný model jednou z metod RP.
- zhotovíme netrvalou formu jednou z metod RP.

Technologický rozvoj v oblasti metod Rapid Prototyping dopomáhá jeho stále vzrůstajícímu uplatnění v širokém pásmu průmyslu, zejména pak slévárenství. V tomto odvětví se prakticky využívá ve dvou oblastech a těmi jsou oblast „klasického“ lití do písku a oblast přesného lití. Možnosti využití těchto technologií viz Obr. 11 a 12.



Obr. 11: Možnosti výroby formy pro lití do písku [17]

Z Obr. 10 je vidět, že existují 3 základní postupy výroby pískové formy:

1. Přímá výroba formy

Pomocí některé RP metody se přímo vyrobí forma, trvalá (kovová) nebo častěji netrvalá⁷ (písková, keramická), do které lze přímo odlévat kov.

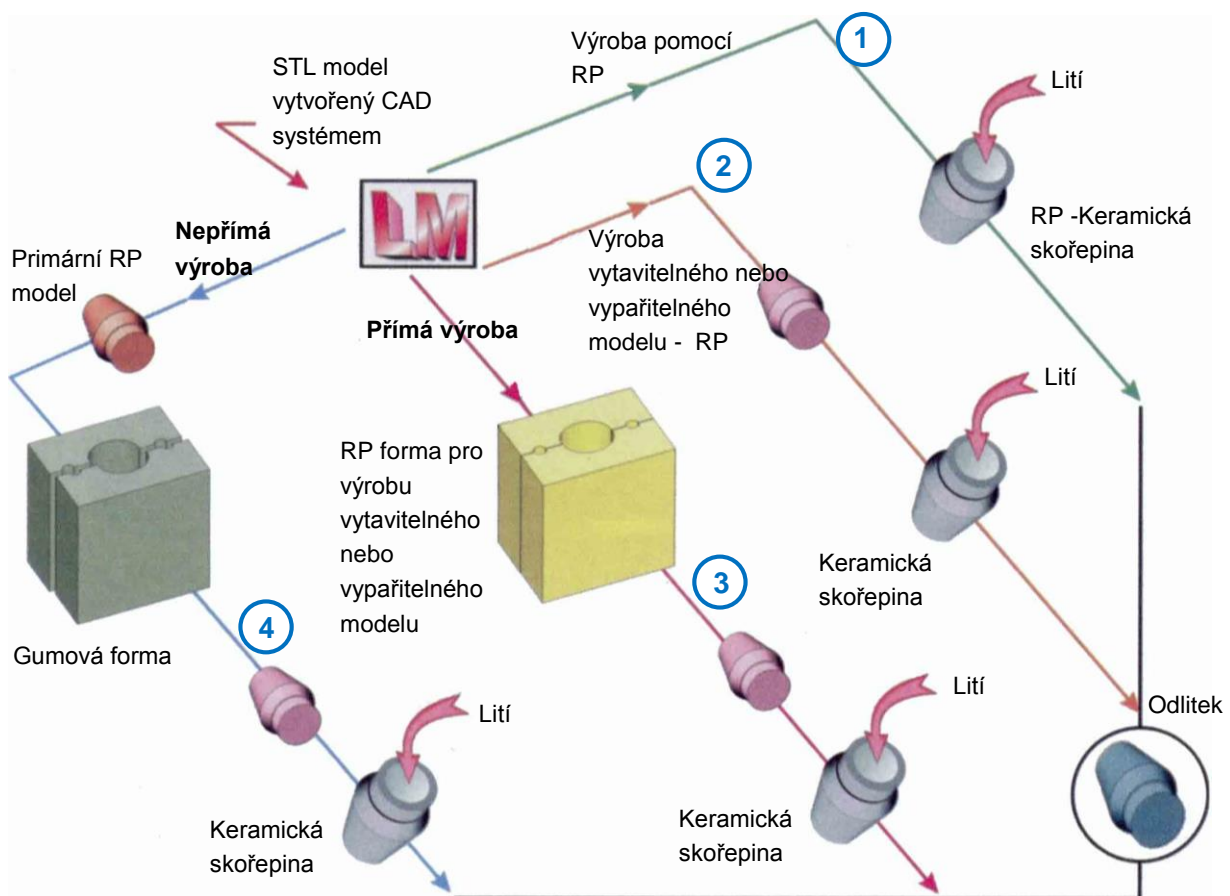
⁷ Výroba trvalých forem pro několik kusů prototypu se nevyplácí.

2. Přímá výroba formy pomocí tzv. „master modelu“

RP metodou je vyroben model žádaného odlitku (tzv. master model), který je následně použit pro klasickou výrobu formy pro odlévání.

3. Nepřímá výroba formy

Jedná se o víceetapové vytvoření formy, kdy je v první fázi vyroben primární model odlitku. Z tohoto modelu je využitím gumové formy vyroben model uretanový nebo silikonový, který je ve finální fázi využit pro tvorbu formy pro odlévání. U silikonových forem se velmi dobře uplatňuje metoda vakuového lití. Výhoda tohoto postupu je značné urychlení výroby forem pro sériovou výrobu odlitků.



Obr. 12: Možnosti výroby forem pro přesné lití na vytavitelný model [17]

Přesné lití lze charakterizovat jako technologii, která umožňuje vyrábět tvarově složité součásti, u nichž se část funkčních ploch vyrábí již při lití s takovou rozměrovou tolerancí a s takovou drsností povrchu, že dokončování obráběním není nutné. U ostatních ploch, které je potřeba obrábět, jsou přídatky na obrábění relativně malé a spotřeba času na jejich odstranění a s tím spojené náklady, jsou zřetelně nižší než u jiných způsobů lití. [19]

1. Přímá výroba skořepiny

Podobně jako v předchozím případě je i zde pomocí RP metod přímo vytvořena forma, nejčastěji keramická skořepina pro okamžité odlévání kovu.

2. Přímá výroba spalitelného nebo vytavitelného modelu

Model vytvořený některou RP metodou je přímo vyroben z materiálu vhodného pro vytavení nebo spálení (vosk, ABS plast). Tento model je rovnou využit k výrobě keramické skořepiny. Nevýhodou tohoto postupu je, že model je během procesu zničen.

3. Výroba voskového modelu pomocí formy zhotovené RP technologií

V tomto případě se RP metodami vytvoří forma. Do této formy se poté odleje roztavený vosk nebo jiný materiál. Tyto voskové modely se poté uplatní v dalším procesu technologií přesného lití.

4. Výroba voskového modelu za pomoci silikonové formy a modelu zhotoveného RP technologií

V první fázi je vyroben RP postupy primární model odlitku, který slouží k výrobě gumové formy pro výrobu modelů využitých při přesném lití. Výhoda tohoto procesu je opět při sériové výrobě. Z jednoho modelu je vytvořeno hned několik forem. Tyto formy poté značně urychlí výrobu stejných modelů pro přesné lití.

3.1. Trvalá forma

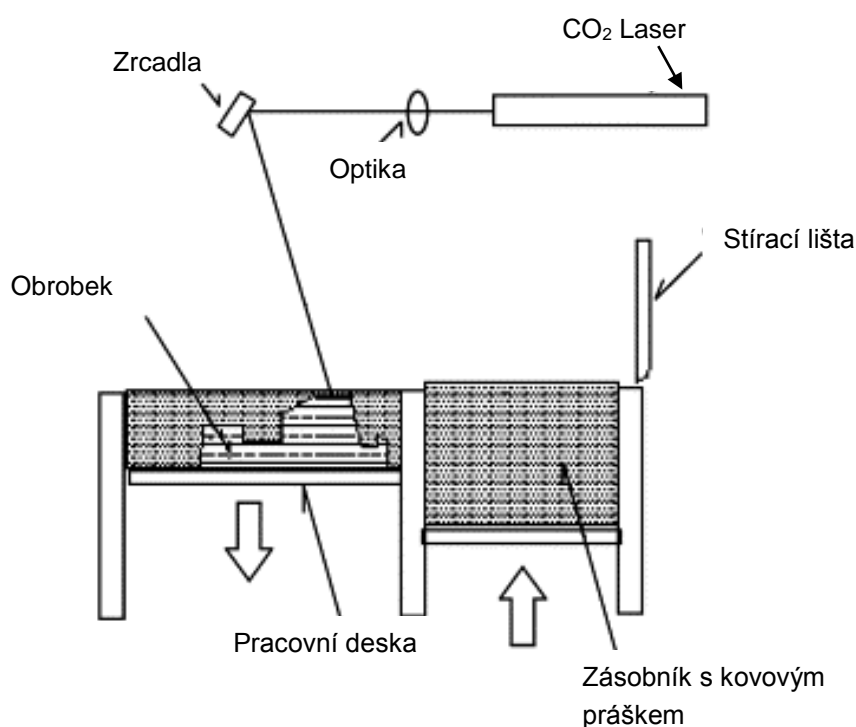
Kromě možnosti klasického obrábění kovové formy lze využít některých aditivních postupů metod Rapid Prototyping. Tyto metody umožňují vytvářet komplexnější geometrie, které konvenčními metodami nejsou dosažitelné. Využívá se zde kovových prášku, které jsou soustředěným tepelným tokem roztavovány, tím dochází ke spojování částic a vytváří se tak celá součást, v tomto případě trvalá forma pro odlévání.

Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Populární RP proces, který umožňuje výrobu přímou výrobu kovových součástí přímo z CAD dat. Metoda umožňuje využívat velkou škálu kovových prášků dle potřeby. Metodu vyvinula německá firma EOS GmbH, která dala vzniknout EOSINT⁸ tiskárnám. Díky této technologii dochází ke zkrácení výrobního času součástí ze dnů, někdy až týdnů na hodiny nebo dní. Toto šetří čas i náklady. Proces je po spuštění již plně automatický.[20]

⁸ První EOSINT tiskárna byla roku 1995 EOSINT M 250

Technologie DMLS je založena na postupném tavení jemných vrstviček prášku pomocí laserového paprsku⁹. Na pracovní desku se ukotví (příšroubuje) podpurná deska s částečným modelem součásti, jejíž pozice je následně naskenována a zkontrolována. Proto se tato technologie také řadí mezi tzv. hybridní. Pracovní prostor je poté zahrnut do požadované výšky kovovým práškem a začíná výrobní proces. Soustředěním laserového paprsku na požadovaná místa se vrstvu po vrstvě vytváří celá součást. Po dokončení výroby je součást vyjmuta, přebytečný prášek odstraněn. Tento prášek může být znovu použit. Nakonec je potřeba součásti odmontovat od podstavné desky a nechat dodatečně upravit, např. vytvrzením.[20,21]



Obr. 13: Schéma EOS M 250 tiskárny [20]

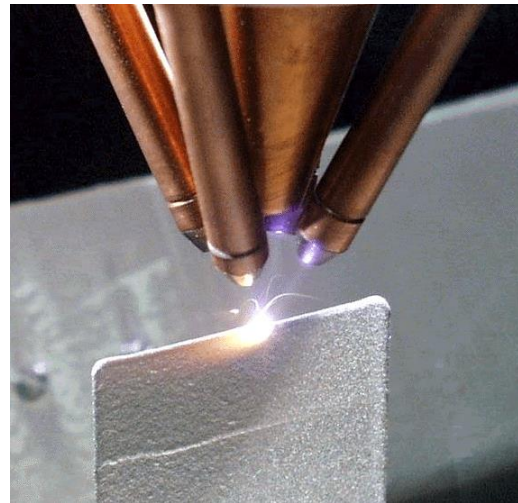
⁹ Starší CO₂ lasery nyní nahrazují lasery Ytterbiové

Laser Engineered Net Shaping (LENS™)

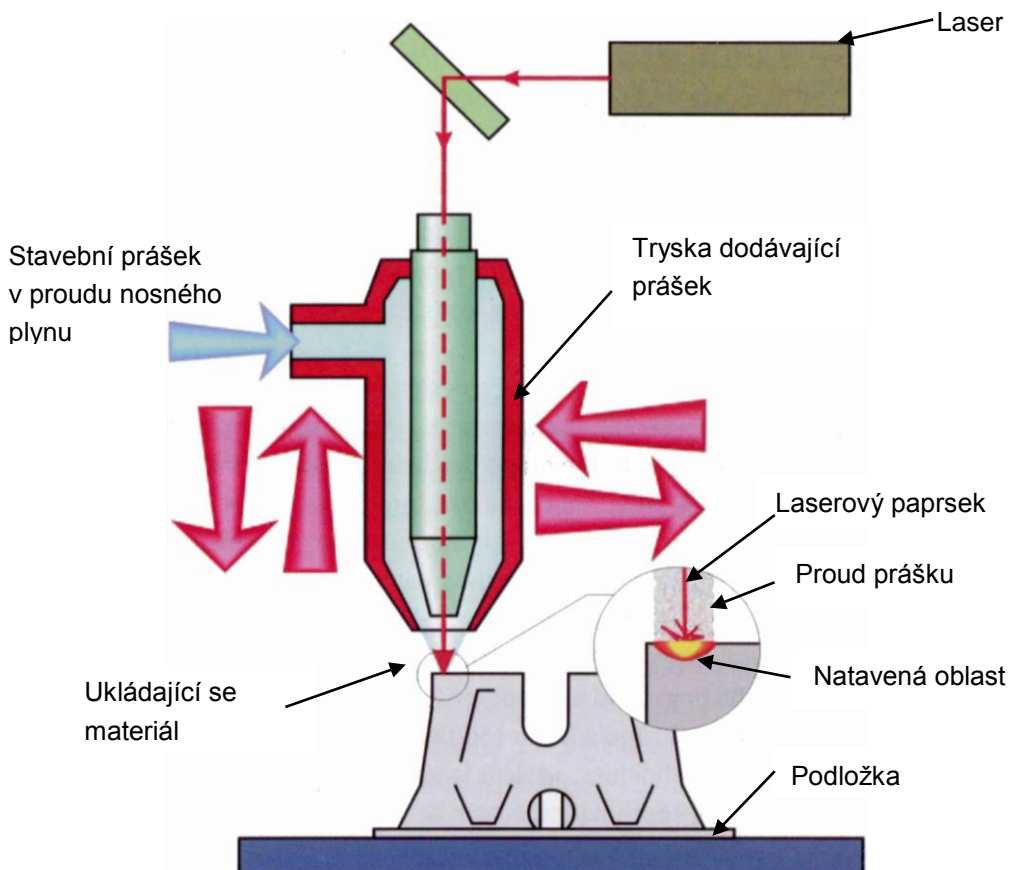
Metoda LENS je další technologií pro výrobu 3D kovových součástí přímo z CAD modelu. Využívá se k tomu práškového kovu. Touto metodou lze vytvářet funkční součásti, nástroje a v neposlední řadě také trvalé formy pro slévárenské využití. Tyto formy se poté uplatňují v sériové výrobě.[1]

Kovový prášek je pomocí několika trysek vypouštěn ven, kde se setkává se silným laserovým paprskem, který jej taví. Tím dochází ke spojování atomů a po zchlazení vznikne hotová vrstva. Poté se hlava posune o úroveň výš. Laser postupně natavuje povrchovou vrstvu součásti, na kterou současně dopadá roztavený kov. Tímto způsobem vzniká celá součást.[1,2]

Použité materiály mohou být: nerezová ocel, nástrojová ocel, titan, wolfram, měď nebo hliník.[1]



Obr. 14: Metoda LENS v praxi [22]



Obr. 15: Schéma metody LENS [17]

3.2. Netrvalá forma

3.2.1. Přímá výroba formy metodami RP

Direct Shell Production Casting (DSPC®)

Metoda DSPC, vyvinutá firmou Soligen Technologies Inc., je určena pro přímou výrobu keramické skořepinové formy. DSPC umožňuje během krátké doby získat skořepinovou formu, vhodnou pro odlévání, bez zbytečných mezikroků, výdajů a času.[19]

Princip technologie je založen na již zmíněné RP metodě – 3DP. Poté, co je softwarově „nakrájen“ digitální model a jsou navrženy jednotlivé vrstvy, se na pracovní desku stroje nanese tenká vrstva keramického prášku, který je zde spojen tekutým pojivem vstříkovaným tiskovou hlavou. Poté následuje slinování vrstvy laserem. Následně se pracovní plošina sníží o hloubku jedné vrstvy a proces se opakuje, dokud není celá forma hotova. Forma se pak očistí od přebytečného prášku a dá se do pece vypálit, aby se odstranila přebytečná vlhkost a aby skořepina vydržela teplotu roztaveného kovu. Takováto forma je poté připravena k odlévání.[1,24]

Kromě klasického keramického materiálu lze, podle potřeby, k výrobě skořepin využít i prášky na bázi karbidů křemíku, oxidů hliníku, křemene apod. Touto metodou lze také vytvářet složitější tvary, jemné detaily při vysoké kvalitě povrchu.[1,24]

Quick Sand Casting

Quick Sand Casting, dále jen QSC, je další z možných technologií pro výrobu pískových forem a jader.

Ze zásobníku ostřiva je písek přiveden do míchače, kde je přidán aktivátor a celá směs se důkladně propojí. Takto připravená směs je dopravena do nanášecích hlav, které na pracovní podložku nanesou první vrstvu. Na tuto vrstvu je do požadovaných míst průřezu vrstvy nanášeno jinou hlavou pojivo. Poté je vrstva opět zasypána vrstvou směsi, nanese se pojivo a celý proces se opakuje, dokud není forma popř. jádro hotovo. Při jednom tisku lze zároveň vytvářet model i jádro.

Touto metodou lze vytvářet komplexní tvary a jádra s dutinami nebo zářezy. Pracovní plocha velikosti 1800x1000x700 mm (délka x šířka x výška) umožňuje vytvářet velmi velké součásti, případně více menších součástí najednou.[25]

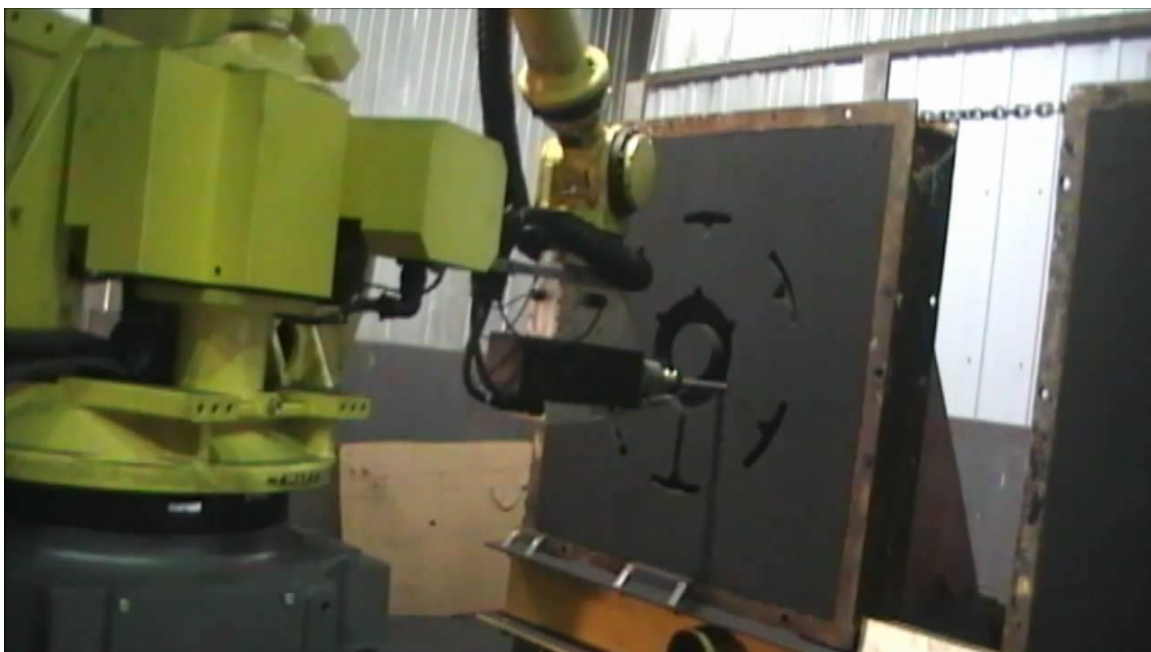


Obr. 16: Forma hlavy motoru vyrobená metodou DSPC [23]

Nopatech®

Další možností přímé výroby pískové formy je technologie od společnosti Nopatech Inc. Metoda zahrnuje všechny kroky výroby formy včetně počítačové simulace odlévání kovu do vytvořené formy. Na rozdíl od většiny RP metod se jedná o metodu subtraktivní, tedy, že materiál je postupně odebírán.

Proces začíná upěchováním a vytvrdnutím formovací směsi v rámu. Tento rám se poté otočí a zavěsí ve svislé poloze. Následuje fáze, kdy robotické, 5 osé rameno postupně, za pomoci speciálních nástrojů vyfrézuje do směsi všechny potřebné geometrie včetně vtokové soustavy. Metoda je dobře použitelná i pro výrobu komplexnějších jader. Nevýhodou tohoto postupu může být horší kvalita povrchu, jehož drsnost je závislá na použitém ostřivu a také velké opotřebení nástrojů.[26]



Obr. 17: Metoda Nopatech [26]

Voxeljet

Zařízení od firmy Voxeljet jsou další možností přímé výroby forem a jader sintrováním speciálně upraveného slévárenského písku. Princip metody je nanášení vrstev písku na podložku a do míst, kde má být vytvořena forma popř. jádro je nanášeno pojivo.

Významnou výhodou této metody je velká pracovní plocha (4x2x1m), možnost výroby komplikovanějších jader, dobrá přesnost (300 μ m) a rychlost.[27]

3.2.2. Výroba formy pomocí modelu

V zásadě se jedná o vytvoření matečného modelu, který je zaformován a buď vytažen a znovu použit pro tvorbu dalších forem (Trvalý model) nebo je během procesu odlévání zničen.

Výroba forem pomocí modelu je komplexní téma a proto bude podrobněji rozebrána v podkapitolách 3.3. a 3.4..

3.3. Trvalý model

Soft tooling

Pomocí této technologie lze vytvořit z jednoho přesného modelu, zhotoveného například některou z RP metod, několik uretanových forem. Forma vznikne tak, že se za pokojové teploty naleje kolem master modelu roztavený materiál. Nejčastějším používaným materiálem je silikon, následovaný polyuretanem a epoxidy. Do těchto forem poté lze odlévat uretany, pryskyřice a také vosk pro výrobu modelů využitelným při lití na vytavitelný model. Model se při této výrobě nezničí a využívá se pro další tvorbu forem, dokud přesnost a kvalita formy odpovídají specifikaci. [28,29]

Jedná se o metodu, která nalezne své uplatnění hlavně v malosériové výrobě. Obvykle lze vytvořit asi 50 součástí, než se forma poškodí.[30]



Obr. 18: Formy vyrobené metodou Soft Tooling [31]

3.4. Netrvalý model

3.4.1. Vytavitelný model

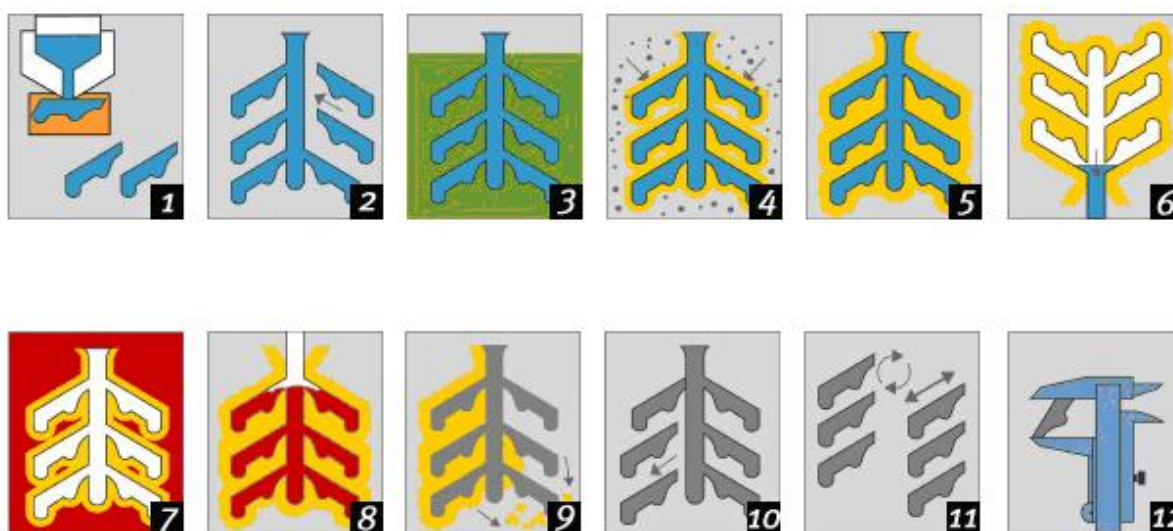
Lost Wax - Vytavitelný model

Metoda vytavitelného modelu neboli „lost wax“ či „investment casting“, je jednou ze základních a nejpoužívanějších technologií používaných ve slévárenství v technologii přesného lití.

Přesné lití metodou vytavitelného modelu je metoda, jenž umožňuje vyrábět odlitky tvarově velmi složité, s malými rozměrovými tolerancemi a s velmi dobrou jakostí povrchu. Používá se zejména tam, kde se zřetelem na složitý tvar a obtížně obrobitelný materiál je výroba součástí jinou technologií mimořádně nákladná, nebo dokonce zcela nemožná.[19]

Princip metody

Výrobní proces je rozdělen do několika fází, viz obr. 18



Obr. 19: Postup výroby odlítka metodou lost wax [32]

Stručný popis jednotlivých fází:[19,32]

1. Výroba voskového modelu – vstřikování vosku do matečné formy
2. Sestavení modelů do stromečku
3. Výroba skořepin – namáčení voskových modelů do keramické břechky
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 – vizuální prohlídka, měření, rentgen

Rapid prototyping a lití na vytavitelný model

Rapid prototyping metody se při technologii lití na vytavitelný model v největší míře uplatňují při výrobě master modelů. Tyto master modely slouží k výrobě forem, které dále umožňují vytvářet voskové modely. Některé RP metody ovšem mohou vyrábět přímo voskové modely. Voskové modely lze v některých RP postupech nahradit i modely z jiných materiálů, např. ABS plast. Dále lze metod RP využít k přímé výrobě formy pro zhotovení voskových modelů.[2]

Výroba těchto modelů, resp. forem je vzhledem k důležitosti přesného vyhotovení složitá a časově náročná, protože je mnohdy nutné formy dodatečně upravovat např. broušením nebo leštěním.[19]

Konkrétní metody RP, které se zde uplatňují:

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

Castform™

Technologie vyvinutá firmou 3D Systems, využívající metody SLS. Touto metodou se vytváří model ze speciálního materiálu Castform, který je naimpregnován slévárenským voskem. Takto vznikne model budoucího odlitku. Hlavními výhodami této metody jsou její univerzálnost, snadná modifikace modelů a nízké procento vznikajícího popílku a tím je vhodná i pro odlévání reaktivních kovů jako je například titan. [4]

Repliwax®

Metoda Repliwax je speciální RP Technologie, velmi podobná metodě lost wax. Metoda je zaměřená na odlévání větších odlitků, které není možné obvyklou metodou vytavitelného modelu vytvářet, do velmi tenkých keramických skořepin. Tím se získává větší kapacita skořepiny, snižuje se potřeba materiálu na výrobu formy, snižuje se riziko prasknutí formy. Protože výroba formy probíhá



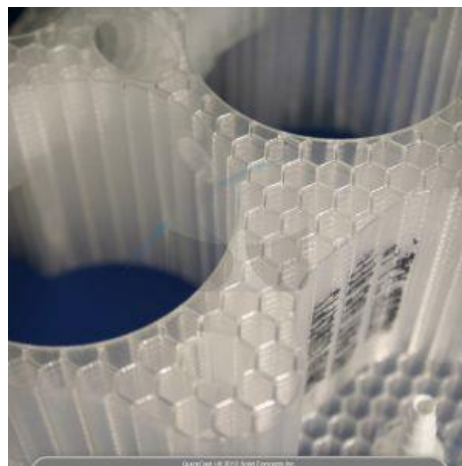
Obr. 20: Produkt metody Repliwax [33]

za pokojových teplot a forma se nepředehtívá, nehrozí riziko popálení. Postup výroby formy je téměř totožný s lost wax. Pracuje s ovšem s menšími tloušťkami skořepin, proto musí být stromeček podepřen pískem.[33]

Quickcast®

Technologie Quickcast®, vyvinutá firmou 3D Systems, přináší na pole rychlé výroby formy nový přístup. Protože stávající stereolitografické modely nebyly vyráběny speciálně pro potřeby odlévání a současně nebyly zrovna levné, vznikla právě tato metoda, která by měla tuto situaci vyřešit. Objevila se snaha vytvořit fotopolymer, který bude absorbovat velmi málo vody, bude mít velkou pevnost a nízkou viskozitu. Tato snaha se setkala s úspěchem po roce výzkumů, kdy byl vyvinut polymer SC 1000, speciálně upravený právě pro potřeby rychlé výroby odlitku.[34]

Metoda je velmi blízká metodě lití na vytavitelný model. Místo vosku se zde zaformuje model vyrobený z již zmíněného SC 1000 polymeru. Toto umožňuje vytvářet i velmi komplikované součástky v krátké době. Protože se jedná o modely vytvořené stereolitografií, metoda je zároveň velmi přesná (desítky mikrometrů).[34]



Obr. 21: Detail na model vytvořený metodou Quickcast [34]

3.4.2. Vypařitelný model

Lost Foam – Vypařitelný model

Další z moderních metod slévárenské technologie. Prakticky se uplatňuje při sériové výrobě tvarově složitých tenkostěnných odlitků z litiny a slitin hliníku.

Při této metodě se odlévá do formy, v níž je v místě budoucího odlitku umístěn polystyrenový¹⁰ spalitelný model. Pro složitější geometrie lze využívat některých RP metod, např. SLS (Castform™). Uplatňuje se zde i německá firma EOSINT, známá technologií DMLS, viz kap. 3.1.1., se svojí přístrojovou řadou EOSINT P s využitím speciálního polystyrenu, upraveného pro tuto funkci.



Obr. 22: Polystyrenový model a hotový výrobek [31]

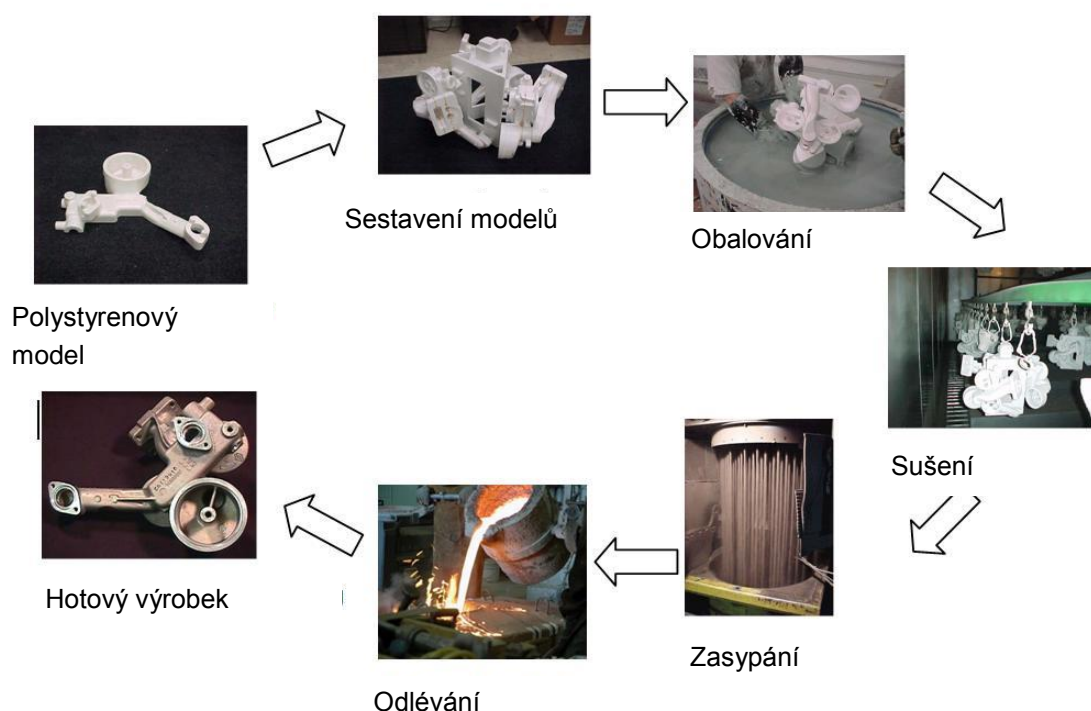
¹⁰ Zrnitost kuliček 0,2 až 0,4 mm, směs také obsahuje vázaný pentan, který působí jako nadouvadlo.

[21,36] Zejména u této metody se však uplatňují technologie pro výrobu trvalých kovových forem (LENS, DMLS apod.).

Během lití se polystyrén před postupujícím kovem vypařuje a tak vytváří dutinu budoucího odlitku. Z polystyrenu je vytvořen nejen vlastní model, ale i části vtokové soustavy a nálitky. Tento komplet je poté opatřen žáruvzdorným nátěrem a v kontejneru zasypán suchým pískem bez pojiva pěchuje se. Pro výrobu modelů se používá kovových forem. Formy jsou zhotoveny obráběním z kovových slitin a jsou velmi drahé. Dutina formy se pomocí injektorů vyplní kuličkami předzpeněného polystyrenu. Do dutiny formy se přivádí pára s teplotou 120-130°C. Dochází k měknutí a vlivem uvolňování zbývajících pentanu k expanzi kuliček polystyrenu, které se v uzavřené dutině formy pevně svaří. Forma se poté rozebere a hotový model se vyjme. Modely se dále suší. Při odlévání dochází k vypařování zpeněného polystyrenu před čelem proudu, proto se využívá spodního vtoku. Zpeněný polystyren prostupuje vrstvou nátěru a zásypovým materiálem a při styku se vzduchem nad formou shoří. Po ztuhnutí se odlitek i se zásypem z kontejneru vyklopí a písek se oddělí od surového odlitku.[37]

Mezi hlavní výhody této metody patří možnost odlévat velmi komplexní tvary bez použití jader, je rozměrově velmi přesná. Použitý zásyp je ihned znovu použitelný. Nižší náklady než vytavitelný model.[35]

Hlavní nevýhody této metody jsou vysoké náklady pro malé série a kusovou výrobu a křehkost modelů, takže je reálná možnost jeho poškození. Metoda také není vhodná pro výrobu ocelových odlitků, protože polystyren je tvořen 92% hmotností uhlíkem, který by mohl s železem reagovat a nepříznivě ovlivnit vlastnosti odlitku.[35]



Obr. 23: Postup metody Lost Foam [31]

Full Mold – Vypařitelný model

Technologie Full mould je jiná varianta odlévání na vypařitelný model. Využívá se polystyrenové pěny ke zhotovení modelu. Model může být vytvořen buď ručně nebo se využije metod RP obdobně jako u metody Lost Foam.

Vytvořený polystyrenový model je opatřen žáruvzdorným nátěrem, uložen do pracovního prostoru a opatrně obsypán slévárenským pískem. Tekutý kov se poté naleje do formy, kde dochází k odpařování polystyrenu skrz nátěr a písek ven dokud se nezaplní celá forma kovem. Polystyrenové výpary mohou být nebezpečné, proto je nutné důkladné větrání pracovního prostoru. Po vychladnutí je odlitek vyndán a očištěn. Písek se nemusí nijak upravovat, je hned připraven ke znovupoužití.[36,38]

Technologie umožňuje lití tvarově velmi složitých odlitků, a protože není potřeba model z formy vytahovat, odpadá potřeba technologických úkosů, jader a formování s více dělicími rovinami. Metoda je také v porovnání s vytavitelným modelem ekonomičtější a to kvůli používanému materiálu a celkově se jedná o jednodušší proces. K nevýhodám této metody patří vysoké náklady pro malé série, modely se snadno poškodí a velké počáteční náklady.[38]

Typické materiály, které se takto odlévají: hliník, ocel, železo, niklové slitiny, slitiny mědi

3.4.3. Spalitelný model

Replicast® – Spalitelný model

Metoda spalitelného modelu technologií Replicast využívá k přesnému lití součástí, podobně jako u metody lost wax, keramickou skořepinovou formu. Tato forma je ovšem vytvořena sestavením polystyrenového modelu. Model má velmi dobrou rozměrovou přesnost a vynikající povrch, který se zachová během celého procesu a přenesení se na hotovou součást. Není třeba žádných dělicích rovin, jader ani technologických úkosů. Modely jsou sestavovány lepením menších polystyrenových dílů k vytvoření komplexních tvarů nebo využitím některé RP technologie, např. SLS – Plastic (Castform™). Metoda najde své využití hlavně u výroby větších odlitků, kde předčí kvalitou metodu vytavitelného modelu.[4,35]

Během procesu výroby keramické formy, ve fázi žíhání, je vlastní polystyrenový model spálen. Do takto vytvořené skořepiny lze poté odlévat širokou škálu slitin, od nízkouhlíkových nerezových ocelí po slitiny na bázi niklu.

4. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo shrnutí moderních postupů rychlého prototypování při výrobě prototypových odlitků. Technologie Rapid Prototyping se neustále vyvíjí a rozšiřují do mnoha odvětví průmyslu, např. slévárenství, lékařský a automobilový průmysl. Hlavním záměrem RP je zkrácení doby mezi poptávkou a dodáním prvního prototypového kusu. Důraz se klade na rychlost výroby, kvalitu povrchu, rozměrovou přesnost a pokud se jedná o funkční prototyp tak i na co nejvčetnější mechanické vlastnosti.

V této práci bylo vysvětleno co Rapid Prototyping znamená a které fáze výroby zahrnuje. Souhrnně lze říci, že RP zahrnuje všechny kroky výroby od úvodního nákresu, přes výrobu až po finální dokončení výrobku. Dále byly zmíněny a vysvětleny nejvýznamnější využívané RP metody (SLA, SLS,...). Tyto metody byly rozděleny podle výchozího stavu stavebního materiálu do několika skupin na metody pracující s tekutým, pevným nebo práškovým základem.

Další část této práce je věnována konkrétnímu uplatnění RP ve slévárenství, kde pomáhají urychlit výrobu prvního kusu odlitku a tím zlepšují konkurenceschopnost slévárenského průmyslu. Metod RP zde lze využívat několika způsoby. Jedním z nich je přímá výroba forem a modelů. Formy lze vyrábět trvalé (metoda LENS) nebo netrvalé (skořepinová - DSPC, písková - Nopatech). Modely lze přímo vyrábět z vytavitelných nebo spalitelných materiálů. Nevýhodou je, že model je v procesu odlévání zničen. Jiným způsobem využití těchto technologií je nepřímá výroba forem, kdy jsou pomocí metod RP (SLA, SLS, FDM, LOM) vyrobeny modely, které slouží jako tzv. master modely, tedy modely ze kterých se následně vytvářejí formy pro odlévání kovů. Většina RP technologií nachází také uplatnění i v metodách přesného lití, jako jsou např. lití na vytavitelný nebo spalitelný model. Novější metody jsou často variacemi metod stávajících, vylepšující hlavně možnosti zpracování vhodnějších materiálů.

Možnost rychlého získání prototypových součástí je důležitým faktorem při výrobě a vývoji nových i stávajících zařízení. Zavádění technologií RP je finančně náročné, avšak z dlouhodobějšího hlediska poskytují nezanedbatelné výhody nejen pro slévárny ale průmysl obecně. Některé metody se již nyní velmi dobře využívají např. ve zdravotnictví nebo školství a stávají se stále podstatnější součástí našeho života.

5. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CHUA, C. *Rapid prototyping: principles and applications*. 2nd ed. Hackensack: World Scientific, 2005, 420 s. ISBN 98-123-8120-1.
- [2] GEBHARDT, Andreas. *Rapid prototyping*. 1st ed. Munich: Hanser Publishers, 2003, xv, 379 s. ISBN 34-462-1259-0.
- [3] FORM 1 delivers high-end 3D printing for an affordable price, meets Kickstarter goal in 1 day. *Engadget* [online]. 2012 [cit. 2015-05-8]. Dostupné z: <http://www.engadget.com/2012/09/26/form-1-delivers-high-end-3d-printing-for-an-affordable-price>
- [4] Learning Center. 2015. *3D Systems* [online]. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.3dsystems.com/resources/learning-center>
- [5] Stereolitografie. [2013]. *Materialise* [online]. [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: <http://www.materialise.cz/stereolitografie-prototypu>
- [6] Rapid Prototyping. NAVRÁTIL, Robert. *Rapid Prototyping* [online]. 2000 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/index.html>
- [7] Metody Rapid Prototyping. [2010]. *CAD.CZ* [online]. [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/component/content/article/2316.html>
- [8] 3D Printing. [2009]. *Custompart.net* [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>
- [9] Efunda: Processes Home. *Rapid Prototyping: SGC* [online]. 2008 [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/sgc.cfm
- [10] Solid Ground Curing. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2015 [cit. 2015-05-8]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Solid_Ground_Curing
- [11] Rapid Freeze Prototyping (RFP). [2012]. *Laser Reproductions* [online]. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.laserrepro.com/rapid-freeze-prototyping-rfp/>
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] What is Laminated Object Manufacturing? 2013. PALERMO, Elizabeth. *Livescience* [online]. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>
- [16] HEYNICK, Mitch a Ivo STOTZ. 2009. *3D CAD, CAM and Rapid Prototyping* [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://enac-oc.epfl.ch/files/content/sites/enacco/files/3D%20CAD%20CAM%20and%20Rapid%20PrototypingV1.1.pdf>
- [17] Major RP Technologies. *University of Northern Iowa* [online]. 2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.uni.edu/~rao/rt/major_tech.htm
- [18] Selective Laser Sintering. 2014. *3D-tisk: Adaptivní výroba & Rapid Prototyping* [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
- [19] HERMAN, Aleš. 2010. *Lití na vytavitelný model* [online]. Praha [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>.
- [20] Rapid Prototyping. *Eos - e-Manufacturing Solutions* [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: http://www.eos.info/industries_markets/rapid_prototyping
- [21] KHAING, M.W, J.Y.H FUH a L LU. 2001. Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts. *Journal of Materials Processing Technology*. **113**(1-3): 269-272. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00584-2. ISSN 09240136. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve>
- [22] Investigating Solidification with the Laser-Engineered Net Shaping (LENS) Process. *JOM: a publication of the Minerals, Metals, .* Warrendale: The Minerals, Metals and Materials Society, 1999, **51**(7). ISSN 1047-4838. Dostupné také z: <http://tms.org/pubs/journals/jom/9907/hofmeister/hofmeister-9907.html>

- [23] Rapid Parts Move into the Mainstream. *Desktop Engineering* [online]. 2004 [cit. 2015-05-8]. Dostupné z: <http://www.deskeng.com/de/rapid-parts-move-into-the-mainstream/>
- [24] What is DSPC. [1998]. *Soligen Technologies, Inc.* [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: www.soligen.com/articles/whatsdspc.shtml
- [25] Quick Sand Casting. [2008]. *Prototypes* [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.prototypes.it/index.php/en/quick-sand-casting-eng>
- [26] *Nopatech* [online]. [2010]. [cit. 2015-05-1]. Dostupné z: <http://nopatech.com/en/>
- [27] Rapid and efficient sand casting of molds. [2014]. *Voxeljet* [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.voxeljet.de/en/services/sand/>
- [28] Rapid Tooling. [2005]. *Central Mechanical Engineering Research Institute* [online]. [cit. 2015-05-1]. Dostupné z: <http://www.cmeri.res.in/svs/rt.html>
- [29] Soft Tooling. [2009]. *Phoenix Analysis & Design technologies* [online]. [cit. 2015-05-1]. Dostupné z: <http://www.padtinc.com/services/manufacturing/soft-tooling-urethane-casting.html>
- [30] Soft Tooling. [2006]. *Advanced Prototyping Inc.* [online]. [cit. 2015-05-1]. Dostupné z: <http://www.rpquote.com/soft-tooling-silicone-rapid-prototypes-rapid-tooling.php>
- [31] Lost foam Casting. *Rapid Product Development Resource Centr* [online]. 2009 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://rpdrc.ic.polyu.edu.hk/facilities/RC/IC/lostfoam.html>
- [32] *Dongying Dyne Casting* [online]. 2003. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.dyne-casting.com/>
- [33] The Repliwax® Process. [2013]. *Castings Technology International* [online]. [cit. 2015-04-1]. Dostupné z: <http://www.castingstechnology.com/public/services/specialprocesses/SCPrepliwaxMain.asp>
- [34] QuickCast®. *Solid Concepts: A Stratasys Company* [online]. [cit. 2015-05-1]. Dostupné z: <https://www.solidconcepts.com/technologies/quickcast/>
- [35] Replicast®.[2013]. *Castings Technology International* [online]. [cit. 2015-04-11]. <http://www.castingstechnology.com/public/services/specialprocesses/scpreplicastmain.asp>

- [36] Development of Full Mould Casting Using Polystyrene Cutting Machine. 2014. *Paripex: Indian Journal of Research*. **3**(10).
Dostupné také z:
http://theglobaljournals.com/paripex/file.php?val=October_2014_1413376525__16.pdf
- [37] Lost foam - výroba odlitků metodou spalitelného modelu. *Streamtech.tv* [online]. [cit. 2015-05-1].
Dostupné z: <http://www.streamtech.tv/video-108-lost-foam-vyroba-odlitku-metodou-spalitelneho-modelu.htm>
- [38] KALPAKJIAN, Serope. 2006. *Manufacturing engineering and technology*. 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 1295 p. ISBN 01-314-8965-8.

6. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Fáze 3D tisku [3].....	10
Obr. 2: Schéma metody SLA [8].....	13
Obr. 3: Schéma metody SGC [10].....	14
Obr. 4: Schéma metody RFP [1].....	16
Obr. 5: Schéma metody LOM [8].....	18
Obr. 6: Schéma metody FDM [17].....	19
Obr. 7: Schéma technologie MJM [8].....	21
Obr. 8: Schéma metody SLS [17].....	23
Obr. 9: Schéma metody 3DP [17].....	24
Obr. 10: Možnosti výroby slévárenské formy.....	25
Obr. 11: Možnosti výroby formy pro lití do písku [17].....	26
Obr. 12: Možnosti výroby forem pro přesné lití na vytavitelný model [17].....	27
Obr. 13: Schéma EOS M 250 tiskárny [20].....	29
Obr. 14: Metoda LENS v praxi [22].....	30
Obr. 15: Schéma metody LENS [17].....	30
Obr. 16: Forma hlavy motoru vyrobená metodou DSPC [23].....	31
Obr. 17: Metoda Nopatech [26].....	32
Obr. 18: Formy vyrobené metodou Soft Tooling [31].....	33
Obr. 19: Postup výroby odlitku metodou lost wax [32].....	34
Obr. 20: Produkt metody Repliwax [33].....	35
Obr. 21: Detail na model vytvořený metodou Quickcast [34].....	36
Obr. 22: Polystyrenový model a hotový výrobek [31].....	36
Obr. 23: Postup metody Lost Foam [31].....	37