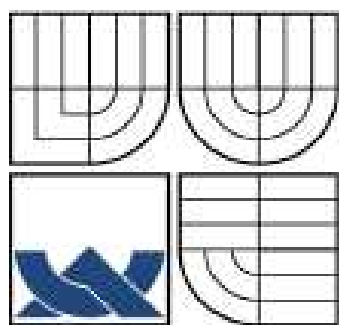
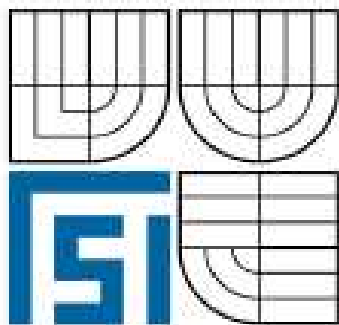




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PŘEHLED MODERNÍCH METOD PŘI VÝROBĚ PROTOTYPOVÝCH ODLITKŮ

POSSIBILITIES OF USING MODERN METHODS IN MANUFACTURING OF PROTOTYPE
CASTINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ NĚMEC

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Němec

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

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

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

Přehled moderních metod při výrobě prototypových odlitků

v anglickém jazyce:

Possibilities of using modern methods in manufacturing of prototype castings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro urychlení komunikace mezi výrobcem součástí (odlitků) a odběratelem je v dnešní době nezbytné zkrácení doby mezi poptávkou a předložením prototypové součásti. Úkolem bakalářské práce je vypracovat literární rešerši zaměřenou na současné metody rychlého prototypování (RP) používané ve světě ve spojitosti s výrobou prototypových odlitků.

Cíle bakalářské práce:

Přehled metod RP používaných v současnosti pro zhotovení prototypových odlitků.

Seznam odborné literatury:

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

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

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

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Pro urychlení komunikace mezi výrobcem součástí (odliteků) a odběratelem je v dnešní době nezbytné zkrácení doby mezi poptávkou a předložením prototypové součásti. Úkolem bakalářské práce je vypracovat literární rešerši zaměřenou na současné metody rychlého prototypování (RP) používané ve světě ve spojitosti s výrobou prototypových odliteků.

Klíčová slova

rychlé prototypování, přesné lití, simultánní inženýrství

ABSTRACT

An overview of the most suitable RP technologies for making rapid casting prototypes is the target of this thesis.

Key words

rapid prototyping, investment casting, simultaneous engineering

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NĚMEC, Jiří. *Přehled moderních metod při výrobě prototypových odliteků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 52 s. Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Prohlášení

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

Datum 28.5.2010

.....
Jiří Němec

Poděkování

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

Obsah

Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
Úvod	8
1. Technologie Rapid Prototyping	9
1.1 Princip technologie Rapid Prototyping	10
1.2 Preprocessing	11
1.3 Processing	12
1.4 Postprocessing	13
1.5 Přehled technologií Rapid Prototyping	14
1.5.1 SLS – Selective laser sintering	14
1.5.2 SLA – Stereolithography	17
1.5.3 FDM – Fused deposition modeling	20
1.5.4 LOM – Laminated object manufacturing	22
1.5.5 SGC – Solid ground curing	25
1.5.6 3DP – 3D printing	27
1.5.7 MJM - Multi-Jet Modeling	29
2. Technologie Rapid Prototyping ve slévárenství	31
2.1 Technologie RP a pískové formy.....	32
2.1.1 Lití do písku	32
2.1.2 Přímá výroba pískových forem	33
2.2 Technologie RP a metoda vytavitelného modelu	35
2.2.1 DSPC – Direct shell production casting	36
2.2.2 Nepřímé metody výroby formy	37
2.2.3 Porovnání časové náročnosti výrobních postupů	39
2.3 Technologie RP a metoda vypařitelného modelu	41
2.4 Technologie RP pro zhotovení trvalých forem	43
2.4.1 LENS – Laser engineered net shaping	43
2.4.2 DMLS – Direct metal laser sintering	44
2.4.3 Metal spray tooling	47
3. Závěr	48
Seznam použitých zdrojů	49

Úvod

Cílem bakalářské práce je zhotovit přehled moderních metod při výrobě prototypových odlitků, které zkracují dobu od zadání požadavku zákazníka na určitý výrobek až po vyrobení prvního prototypového kusu. V co možná nejkratším čase, nejlepší kvalitě a ekonomicky nejvýhodněji. Touto problematikou se zabývá technologie Rapid Prototyping (RP), nebo-li rychlé prototypování, která v zásadě slouží k co nejrychlejší tvorbě prototypů a modelů (nástroje, prototypové formy, atd.).

Tak jako další technologie i technologie RP má své klady a zápory. Mezi kladné vlastnosti bychme zahrnuli časovou úsporu a s tím i úsporu ekonomickou. Dále širokou nabídku typů technologií RP, které mohou být použity pro dané účely. Mezi záporné vlastnosti se u některých technologií řadí například struktura výsledného výrobku. Všechny klady i zápory si musí výrobce zvážit, než si některou technologii RP pořídí.

RP technologie svým širokým záběrem použití také nabízí své uplatnění ve slévarenství. V dnešní době, kdy je vyvíjen tlak na výrobce od zákazníku na zkracování dodacích lhůt a ekonomickou stránku se tato uplatňuje ve slévarnách. RP je možné použít jak pro výrobu matečného modelu nebo pro výrobu forem.

1. Technologie Rapid Prototyping (RP)

Rapid Prototyping (RP) v zásadě slouží k co nejrychlejší tvorbě prototypů a modelů (nástroje, prototypové formy, atd.). Vyvíjí se již od osmdesátých let, kdy vznikla metoda stereolitografie. Nyní se tvorba modelů a prototypů (prezentačních i funkčních) směřuje především do oblasti výroby forem a nástrojů. Na významu nabývá také oblast koncepčního konstruování, kdy se ověřují definované vlastnosti budoucího výrobku. Ve specifických případech se modely vybudované pomocí RP využívají k simulacím nebo různým typům zkoušek (obtékání, namáhání, atd.). [1]

Velké úsilí je věnováno zdokonalení softwarových i hardwarových technologií, které by umožnili provádět celý vývojový proces výrobku na digitálním modelu přímo v CAD systému (vizualizace, rendrování, virtuální realita, MKP, dynamické analýzy, ...). Ukazuje se ovšem, že potřebou současných designérů a konstruktérů je pracovat spíše s modelem fyzickým, u kterého se dá snadněji měnit design, odstraňovat případné chyby, kontrolovat smontovatelnost, opravitelnost, ergonomie nebo provádět funkční zkoušky. Všechny tyto výhody fyzického modelu mají ve finále za následek zrychlení celého procesu vývoje výrobku. Výroba modelů a prototypů klasickými technologiemi je ale velmi náročná a zdoluhavá. Jako nejvhodnější cesta splňující většinu požadavků konstruktéra se jeví RP, což je technologie rychlá a umožňuje přímou vazbu na vývojové prostředí, tedy na CAD/CAM systém. [1]

Přednosti metod RP se využijí nejen v automobilovém, leteckém a elektrotechnickém průmyslu ale i ve výrobě spotřebního zboží. Ve všech oblastech se docílilo zkrácení vývojových časů, snížení nákladů a zvýšení kvality výrobku. Nejlepší výsledky v ušetřeném čase dosahují metody RP při aplikaci ve vývoji celých montážních skupin. [1]

V kombinaci s metodami přesného lití kovů poskytují metody RP možnost rychlejší a levnější výroby kovových funkčních modelů a prototypů. [1]



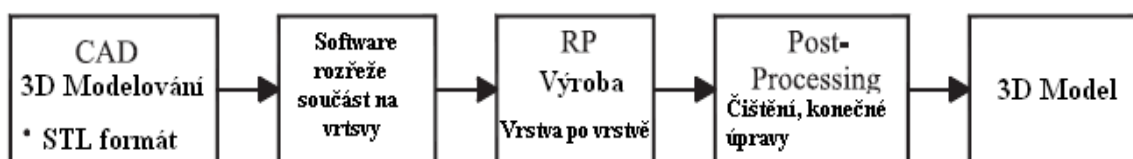
Obr.1 Přehled výrobků pomocí RP [6]

1.1 Princip technologie Rapid Prototyping

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

Postup při RP bývá často dělen do třech základních etap zpracování, označovaných jako preprocessing, processing a postprocessing. Tento způsob členění je velmi blízký například postupu při výpočtových analýzách metodou konečných prvků nebo při postupech zpracování dat pro NC stroje. Stejně jako při uvedených technologiích jde tedy o přípravu dat, vlastní zpracování a zhodnocení výsledků. [2]

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



Obr. 2 Postup tvorby modelu RP [3]



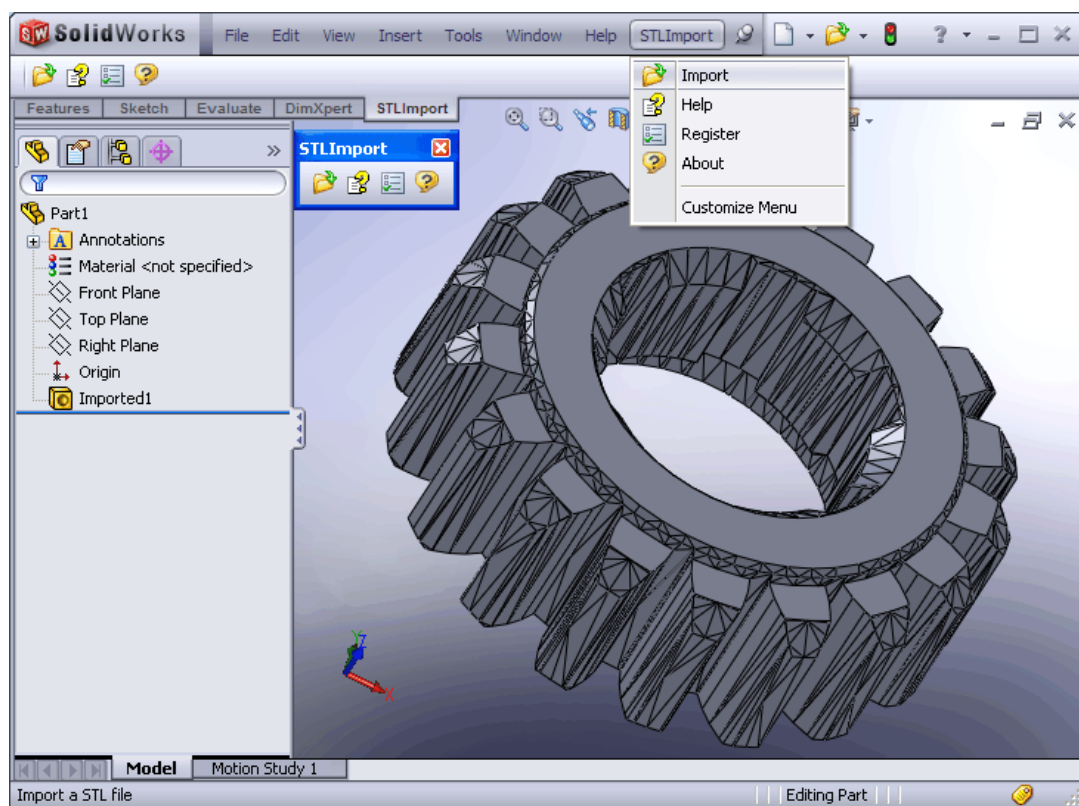
Obr. 3 Průběh procesu RP [4]

1.2 Preprocessing

Do etapy preprocessing řadíme všechny kroky, které souvisí s přípravou dat pro systémy RP. Patří sem například transformace dat ze systémů CAD do formátu STL, při které dochází i k náhradě geometrického tvaru souborem rovinných plošek. V závislosti na tvaru je CAD geometrie nahrazena se zadanou přesností nezbytným počtem rovinných trojúhelníkových plošek. Pro systémy RP je nezbytné, aby tato síť rovinných plošek dokonale uzavírala objem součásti. [2]

Jak již bylo uvedeno, tvar součásti je tvořen postupně po tenkých vrstvách (0,2- 0.05mm). Proto je nezbytné zabezpečit tzv. podpůrnou konstrukci vrstev pro geometrické tvary, kde vrstvy nejsou samonosné a mohlo byt dojít k jejich zborcení nebo deformaci. Tvorba podpůrné konstrukce však není nutná pro všechny metody RP. [2]

Dalším krokem v procesu RP je generace tenkých řezů, které jsou základem pro tvorbu modelu metodami RP. STL data modelu a případných podpor jsou podrobena horizontálním rovinným řezům, které definují 2D obrysovou geometrii a jsou základním geometrickým vstupem pro systémy RP. Na vhodnou tvorbu řezu má vliv i orientace součásti. Vhodnou orientací součásti je možno někdy nejen potlačit schodečkovou strukturu součásti, ale i minimalizovat objem nezbytný pro tvorbu podpůrné konstrukce, což má samozřejmě i vliv na celkový čas stavby modelu. [2]



Obr. 4 Importování součásti do formátu STL [5]

1.3 Processing

Po generaci 2D řezů, popisujících libovolnou 3D geometrii, nastává vlastní processing – tzn. stavba modelu po jednotlivých vrstvách. Stavba těchto vrstev je velmi úzce spojena s konkrétním fyzikálním principem jednotlivých metod RP. [2]



Obr.5 3D tiskárna Dimension SST [4]

1.4 Postprocessing

Po vytvoření modelu v systémech RP následuje skupina kroků, které jsme označili jako postprocessing. [2]

Prvním úkolem je součást ze zařízení vyjmout. U některých metod je nutno vyčkat i delší čas, než je možno prostor vyráběné součásti zpřístupnit obsluze zařízení. Pokud je prostor součásti obklopen okolním materiálem je nutno materiál odstranit. V závislosti na druhu metody se materiál nejčastěji odsává (práškový materiál) nebo se odstraní oplachem (např. fotopolymer). U některých metod je zhotovený díl křehký a vyžaduje další následné zpracování jako např. vytvrzení dílu uv zářením nebo napuštění dílů další látkou, která zvýší jeho pevnost. [2]

Dalším krokem je odstranění podpor, který však není u některých metod potřebný. Odstranění podpor se děje mechanicky nebo probíhá například rozpuštěním podpor v tekuté lázni nebo jejich vytavením. [2]

A konečně posledním krokem je povrchová úprava RP modelu. Schodečková struktura součásti a oblasti podpor mohou být mechanicky upraveny speciálními postupy - tmelením, finišováním. Některé materiály mohou být následně standardně obrobena, barvena, lakována nebo galvanicky pokoveny. [2]

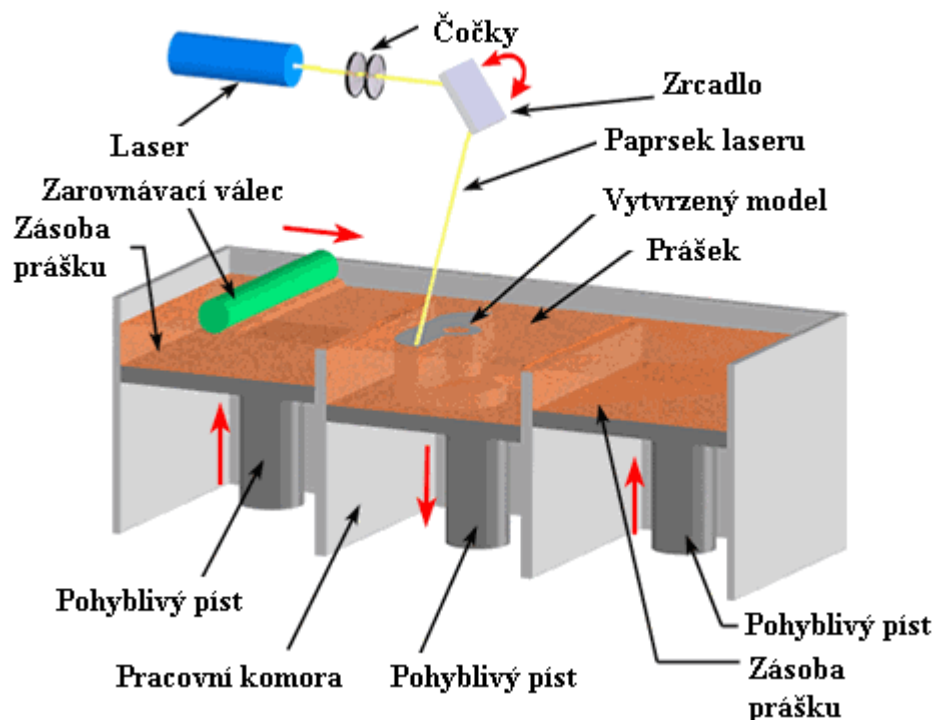
1.5 Přehled technologií Rapid Prototyping

Technologií RP je na trhu velký výběr. Některé technologie jsou založeny na stejném principu a postupu a liší se jen v několika maličkostech. Jiné technologie jsou oproti ostatním úplně odlišné a jedinečné, ať už svým postupem či určením použití. V této práci si představíme několik nejvýznamnějších technologií RP, které jsou známé a používány pro slévárství.

1.5.1 SLS – Selective laser sintering

Metoda SLS byla vyvinuta na Texaské univerzitě v Autinu Carlem Deckardem. Technologie byla patentována v roce 1989 a původně prodávána společností DTM. V roce 2001 byla společnost DTM koupena společností 3D Systems. [7]

Na rozdíl od stereolitografie jsou modely vyrobené novější metodou SLS velmi pevné. SLS je technologie, při které je laserovým paprskem spékán do určitého tvaru slévárský písek, plastový nebo kovový prášek. Přídavný materiál je nanášený na nosnou desku v inertní atmosféře po vrstvách. Podle vypočtených souřadnic bodů rovin řezů je řízená XY skenovací hlava, která vede laserový paprsek nad povrchem prášku, který je nasypán v prostoru pracovní komory. V místě působení laseru se přídavný materiál buď zapeče nebo roztaví. Okolní neosvětlený materiál slouží jako nosná konstrukce. Výroba součástí probíhá po vrstvách, po vytvoření jedné vrstvy se nosná deska sníží o hodnotu odpovídající hloubce vrstvy.[8]



Obr.6 Popis metody Sintrace laserem (SLS) [7]

Na rozdíl od jiných metod můžeme využívat široké spektrum materiálů. Principiálně je možné použít jakýkoliv prášek, který se působením tepla taví nebo měkne. V současnosti se v komerčních oblastech používají např. termoplastické materiály jako jsou polyamid, polyamid plněný skelnými vlákny, polycarbonát, polystyrén dále speciální nízkotavitelné slitiny z niklových bronzů nebo polymerem povlakovaný ocelový prášek. Většinou však ale není možno přecházet na stejném zařízení od jednoho materiálu k druhému, neboť jejich vytvrzení si vyžaduje výrazně odlišné podmínky. Podle druhu použitého modelovacího materiálu je možno v rámci této technologie rozlišovat metody: [8]

- Selective laser sintering - Plast
- Selective laser sintering - Kov
- Selective laser sintering – Slévárenský písek
- Selective laser sintering - Keramika

Selective laser sintering - Plast

U Selective laser sintering - Plastu je, stejně jako například u metody FDM, možno volit z několika druhů plastických materiálů, které svými vlastnostmi určují i způsob využití hotového modelu. Při použití polystyrenu je možné použít výsledný model ve standardní metodě lití do ztraceného vosku, přičemž je možno snadno modelovat i velmi komplikované části výrobku. Při použití nylonu dosahují výsledné modely vynikající mechanické vlastnosti jako tvrdost, houževnatost, teplotní odolnost atd. Tyto modely jsou proto vhodné pro funkční zkoušky nebo testy lícování. Standardním využitím všech modelů je prostorová vizualizace navrhovaného výrobku. [8]

Selective laser sintering - Kov

Modely vzniklé metodou Selective laser sintering - Kovu dosahují dostatečné pevnosti a mechanické odolnosti, takže je možno je využít především jako formy pro výrobu plastových součástek vstřikováním nebo lisováním.[8]

Selective laser sintering – slévárenský písek

Jednou z nejnovějších technologií rapid prototypingu je Selective laser sintering – slévárenského písku. Tato metoda používá upravený slévárenský písek, jehož vytvrzováním je možno bez jakýchkoli mezikroků vytvořit na prototypovacím zařízení klasickou pískovou formu pro lití.[8]

Selective laser sintering - Keramika

Výchozím materiálem je v tomto případě prášek slepovaný pomocí tekutého pojiva. Nanášení pojiva je zajištěno pomocí Ink-Jet tryskové hlavy, která je vedena v rovině XY podle předem vypočítaných řídicích údajů. Pomocí této metody se dají vyrábět různé součástky z keramického prášku nebo formy a jádra pro technologii přesného lití.[8]

Výhody metody SLS: [10]

- je možnost použít širokou nabídku materiálů: polykarbonát, PVC, nylon, písek pro stavbu jader, vosk pro přesné lití a mnoho dalších materiálů
- vyrobené součásti nepotřebují následný postprocessing (čištění, ...), kromě keramického materiálu
- výroba z prášku po finální součást je běžně otázka jednoho dne
- není zde nutnost tvorby podpor

Nevýhody metody SLS: [10]

- při tuhnutí prášku se na okrajích může trocha přebytečného prášku přitavit, což má za následek drsnější povrch součástí
- důležitost zajištění pracovní komory stálé přítomnosti dusíku pro zabezpečení dobré sintrace materiálu (kromě zařízení společnosti EOS)
- tvorba toxických plynů během procesu (obzvláště při práci s materiálem PVC)
- typické SLS součásti mají drsný a porézní povrch [11]
- detaily nejsou tak ostré a dokonalé jako u metody SLA [11]

Materiály:

Ceramics 5.2

Tento materiál je fenolovou pryskyřicí - silikátového písku potaženého hliníkem (syntetický mullit). Materiál je vhodný pro výrobu složitých pískových jader a pískových forem pro všechny licí aplikace. Vzhledem k vysoké tepelné kapacitě a nízké teplotě roztavnosti je tento keramický písek vhodný k používání především pro vysoké teploty lití.[12]

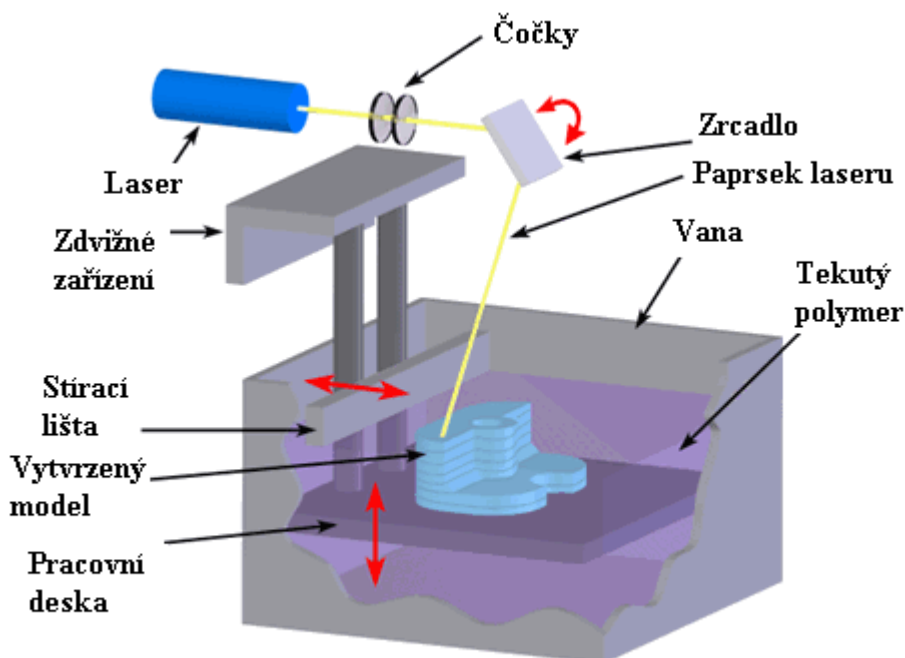
Quartz 4,2 / 5,7 Quartz

Tyto materiály jsou fenolické pryskyřice potažené křemenného písku. Materiál je vhodný pro výrobu složitých pískových jader a pískových forem pro všechny licí aplikace. [12]

1.5.2 SLA – Stereolithography

Stereolitografie je považována za průkopníka mezi technologiemi rychlého prototypování. První komerční systém metody stereolitografie byl uveden na trh v roce 1988 společností 3D Systems.[14] Stereolitografie je nejpřesnější a nejvšestranější technologie rychlého prototypování. Její velkou předností je také kromě přesnosti, schopnost tvorby velmi jemných detailů.[15] Metoda stereolitografie je založena na vytvrzování tekutého fotonopolymerního, který je osvětlován ultrafialovým laserem. Tato metoda je vhodná pro koncepční návrhy, tvarové a funkční zkoušky, tvorbu modelů pro slévárnictví a další.[16]

Jednou z hlavních částí zařízení pro Stereolitografii je vana, která je naplněna citlivým fotonopolymerním. Na počátku celého procesu je těsně pod hladinou (o tloušťce jedné vrstvy) ponořena plošina, která postupně po zhotovení jednotlivých vrstev vertikálně klesá. Laserový paprsek, který je usměrňován přes soustavu zrcátek, řízených servo pohony, dopadá na hladinu polymeru, kde se účinkem UV záření materiál polymeru vytvrzuje. Laser nejprve objede geometrii 2D kontury (převzaté např. z 3D CAD modelu) a potom postupně šrafuje krok za krokem vnitřní prostor 2D kontury, zvoleným šrafovacím vzorem. Další senzor hlídá hladinu polymeru, kterou je možno v případě potřeby kompenzovat (důsledek objemového smrštění). Po takto vytvrzené vrstvě plošina klesne a proces se opakuje. Část postprocessingu je u SLA metody doprovázen několika kroky. Nejprve je nutno uvolnit tekutý polymer z vnitřních částí modelů zpět do vany a model vyjmout. Následuje proces čištění, mytí a následného vytvrzení v přidavném zařízení. Po těchto krocích je možno přistoupit k oddělení podpory a dodatečné povrchové úpravě.[2]



Obr. 7 Popis metody Stereolitografie [17]

Aplikace metody Stereolitografie:

Oproti jiným technologiím je možno stereolitografií vytvářet modely s milimetrovými otvory a miniaturními prvky. Stejně jako u většiny ostatních technologií je možno modely vyrobené stereolitografií použít pro vizuální kontrolu návrhu výrobku, v některých případech i k funkčním zkouškám a díky široké paletě materiálů i jako forem pro vstřikování a lití. [18]

Výhody metody Stereolitografie: [19]

- produktivita – součást může být vyrobena v krátké době (hodiny/dny)
- bezobslužný proces – není nutná přítomnost pracovníka
- přesnost
- spolehlivost – tyto zařízení jsou velmi spolehlivé
- flexibilita – možnost tvorby více součástí najednou (závisí na velikosti základní desky)
- tvorba malého množství odpadu
- konečný povrch a vzhled jsou velmi kvalitní
- pevnost součástí – vhodnost pro funkční testování a analýzy

Nevýhody metody Stereolitografie: [19]

- praskání – pokud je navrtána součást
- změna rozměrů v důsledku pohlcování vlhkosti
- nutnost tvorby podpod a jejich následného odstranění
- čištění součástí (post-processing)
- nutnost vytvrzení součástí
- dlouhý čas tvorby součástí – záleží na složitosti a velikosti

Materiály:**RenShape SL 7560 [16]**

SL 7560 je odolný SLA materiál, který napodobuje ABS a poskytuje skvělou kombinaci provides good combination of životnosti a stability. Skvělé pro RTV vzory a funkční součásti. Výborný povrch bočních stěn, jemné detaily a dobrá teplotní stálost.

RenShape SL 5510 [16]

SL 5510 je víceúčelový materiál určený převážně pro aplikace, kde je vyžadována velmi dobrá přesnost. Schopnost odolnosti vůči pohlcování vlhkosti je během transportu a skladování zaručena. Vhodný pro funkční a pevnostní testování. Vhodné pro modely pro odlitky a pro postup QuickCast pro přesné lití.

DSM Somos WaterShed® 11122 [21]

Tento fotopolymer s nízkou viskozitou poskytuje pevnost, tuhost, odolnost vůči vodě, stejně jako ABS části. Části vytvořené pomocí WaterShed XC 11122 jsou skoro bezbarvé a vypadají velmi věrohodně. WaterShed XC 11122 nabízí mnoho vlastností, které napodobují tradiční techniky plastů, včetně ABS a PBT. Tento materiál je ideální pro mnoho aplikací v oblasti automobilového průmyslu, zdravotnické a spotřebitelské aplikací zahrnují čočky, balení, průtok vody analýza, RTV modely, trvanlivé koncepční modely, testování v aerodynamickém tunelu a v neposlední řadě pro rychlé lití modelů ve slévarenství.

Accura® SL Materials

Společnost 3D Systems nabízí širokou nabídku materiálu pro technologii Stereolitografie. V níž je nabízeno mnoho materiálů s různými vlastnostmi, požadovaným pro určité účely.

Metoda Stereolitografie poskytuje souhrn optimálních požadovaných vlastností, jako jsou rychlost, přesnost a jakost povrchu. [20]

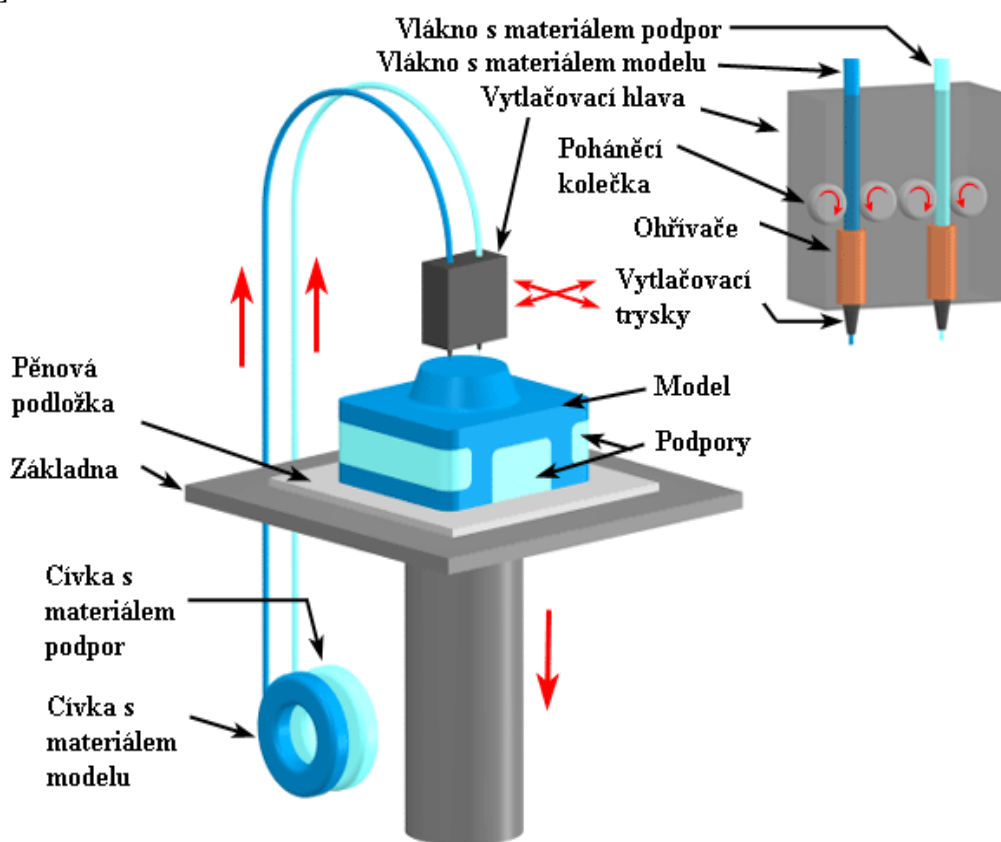
1.5.3 FDM – Fused deposition modeling

Fused deposition modeling je pravděpodobně nejpoužívanější technologií rychlého prototypování po Stereolitografii. Tato technologie byla poprvé vyvinuta v roce 1988, patentována v roce 1992 a také v tomto roce komerčně nabízena jako FDM™ společností Stratasys, Inc.[23]

FDM je metoda, která vytlačuje skrze trysku tenké roztavené vlákno a tento natavený materiál spojuje vrstvu po vrstvě do požadované podoby 3D modelu.[24]

Materiál na tvorbu modelu je obvykle dodáván v nekonečně dlouhém vlákně namotaném na cívce, ovšem některé zařízení umožňují dodávat materiál formou granulí přímo ze zásobníku násypkou do trysky namísto vlákna na cívce. V trysce jsou ohřívače pro roztavení dodávaného materiálu, které materiál udržují při trochu vyšší teplotě, než je jejich teplota tavení tak, aby materiál lehce vytékal z trysky. Vytékající materiál se po natavení na vrstvu okamžitě tuhne. Jakmile je jedna vrstva hotová, tak se základní deska posune o tloušťku vrstvy dolů a tryska může vytvářet další vrstvu. Tloušťka vrstev a rozměrová přesnost je dána průměrem otvoru trysky, která se pohybuje v rozmezí od 0,013 do 0,005 palců.[25]

Společnost Stratasys, Inc. doplnila dosavadní jednu trysku pro stavěcí materiál o druhou trysku, která je určena pro tvorbu podpurných částí v modelu, z jinšího typu materiálu. Tento podpurný materiál po dokončení modelu, lze snadno odstranit. Toto vylepšení umožňuje tvorbu mnohem složitějších modelů vyrobených touto technologií.[26]



Obr. 8 Popis technologie FDM [25]

Aplikace metody FDM:

- Modely pro koncepce a prezentace. Modely mohou být popsány, natřeny a upraveny téměř jako konečný výrobek.[27]
- Prototypy pro design, analýzy a testování funkcí. Tato technologie je schopna vytvořit z ABS plně funkční prototyp.[27]
- Modely pro odlitky. Model může být použit pro modely přesného lití, lití do pískových forem. [27]

Výhody metody FDM:

- rychlá a levná výroba modelu [26]
- nehrozí nebezpečí od chemikálií a laseru [26]
- materiál lze rychle vyměnit [26]
- bez tvorby odpadu, snazší údržba [26]
- modely se vyznačují tuhostí, odolností vůči teplotě, chemikáliím a vodě [28]
- rozměrová stabilita modelu [28]
- ekonomicky nejefektivnější řešení pro malé až středně velké modely vyrobené v co nejkratším čase [28]

Nevýhody metody FDM:

- přesnost závisí na průměru trysky [26]
- nevhodná metoda pro velké modely (časově náročný proces) [28]
- nutnost stálosti teploty v ohřivači u trysky [28]

Materiály:

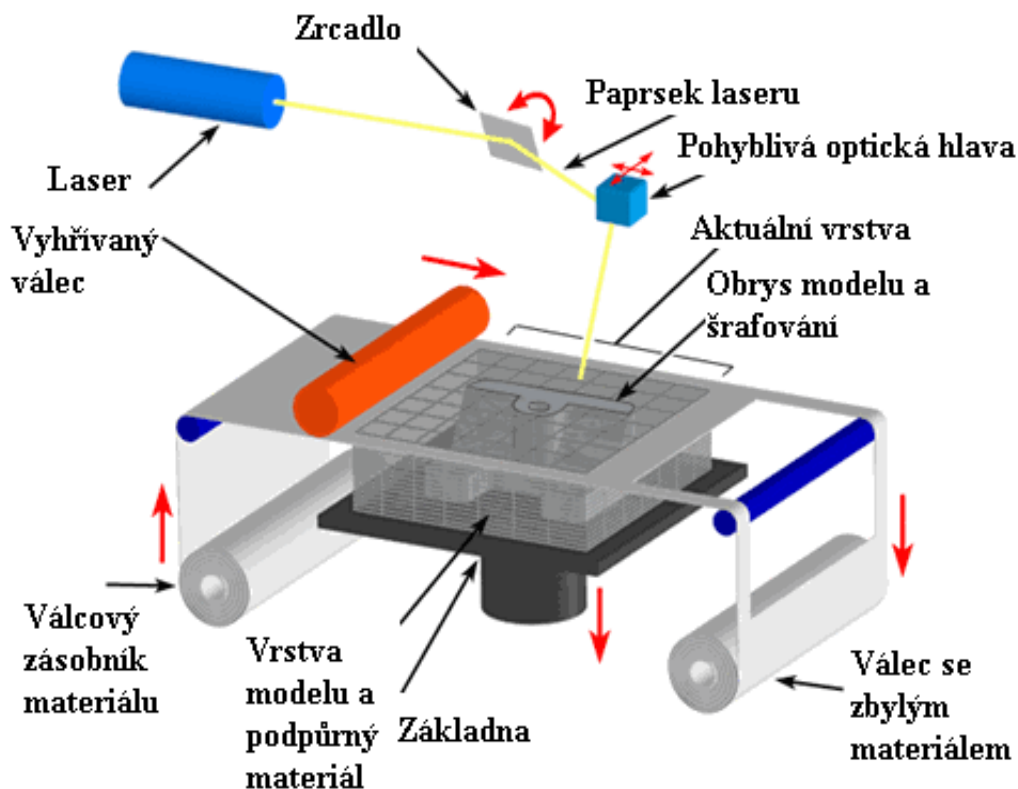
Několik materiálů je k dispozici avšak s kompromisy mezi pevností a teplotními vlastnostmi. Používá se hlavně polymer ABS dále lze použít polykarbonáty, polyfenylsulfan a vosky. Tyto materiály jsou dodávány v mnoha barevných variantách. "Vodou rozpustný" materiál může být použit pro zhotovení provizorních podpor, při výrobě modelu. Tento materiál je uváděn na trh pod názvem WaterWorks od společnosti Stratasys, Inc, jedná se o rozpustný podpůrný materiál, který se rychle rozpustí ve specializovaném mechanickém míchacím zařízení využívající vyhřívaný roztok hydroxidu sodného. [29]

1.5.4 LOM – Laminated object manufacturing

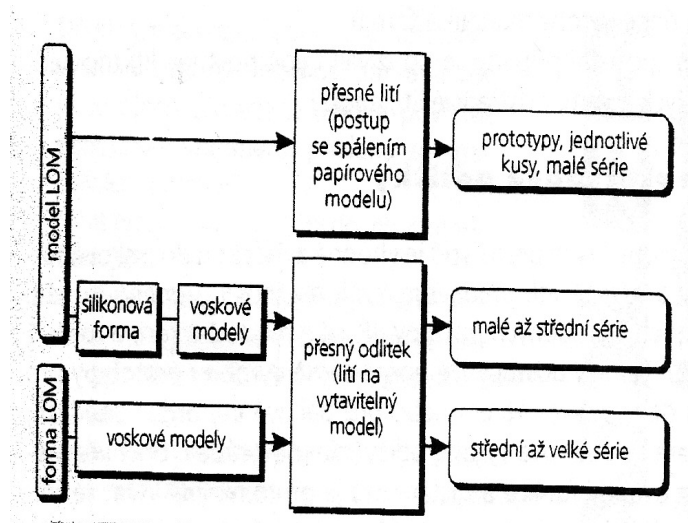
Metoda Laminated object manufacturing byla vynalezena společností Helisys. První komerční využití této metody bylo v roce 1991. [30]

Oproti jiným metodám RP, které pracují relativně pomalu, je pro rychlé zhotovení prototypu vhodná technologie LOM.[31]

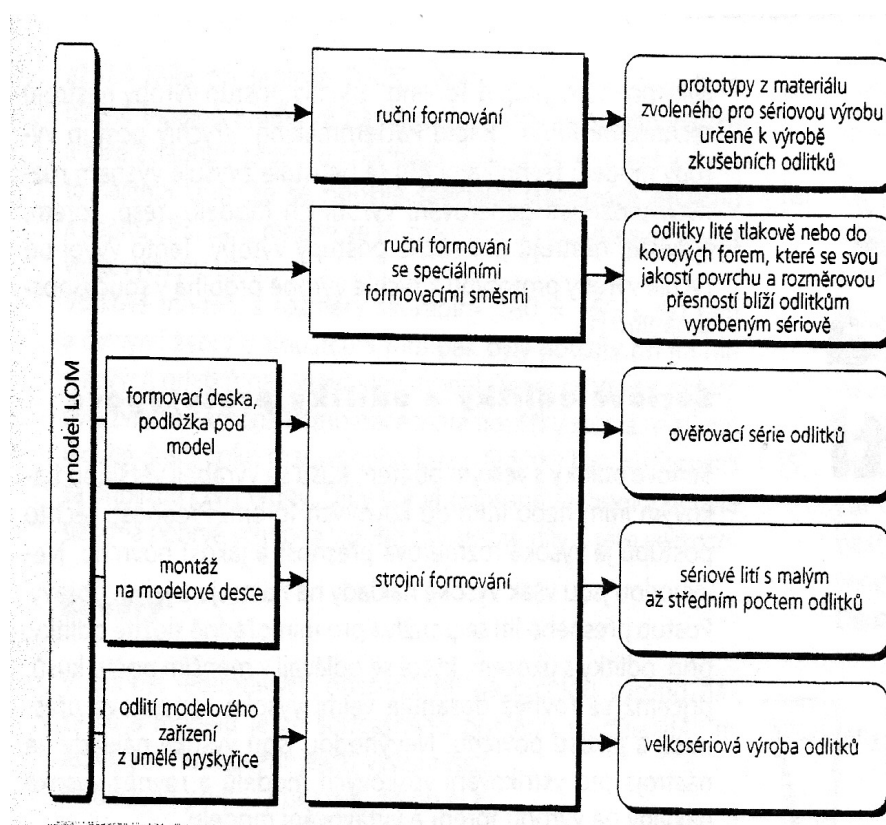
Součást je vytvářena ze speciálních plastových fólií nebo z mnoha vrstev papíru napuštěných zpevňující hmotou. Jednotlivé vrstvy jsou oříznuty do správného tvaru CO₂ laserem. Součástka je vytvářena na svisle se pohybující nosné desce. Celý proces probíhá tak, že se na nanesenou a vyřezanou vrstvu natáhne papírová fólie opatřená vrstvou polyetylenu. Ta se poté přitlačí soustavou vyhřívaných válců, čímž dojde ke slepení obou vrstev. Paprskem laseru je vyřezán požadovaný obrys vytvářené vrstvy. Přebytečná odřezaná fólie je laserem rozdělena na čtverce a odstraněna. Po vytvoření vrstvy se podložka sníží o tloušťku fólie a postup se opakuje až do vytvoření celé součásti. [32]



Obr. 9 Princip metody LOM [30]



Obr. 10 Možnosti použití postupu LOM pro přesné lití v závislosti na požadovaném počtu odlitků [34]



Obr. 11 Možnosti použití postupu LOM při odlévání do pískové formy v závislosti na počtu a účelu použití požadovaných odlitků [34]

Výhody metody LOM [33],[34]:

- metoda je velmi jednoduchá
- vhodné pro objemově velké součásti
- není potřeba podpor
- velmi dobrá obrobitelnost
- žádné smrštění
- velká stabilita dílů
- materiál podobný dřevu, které je typické pro výrobu modelů

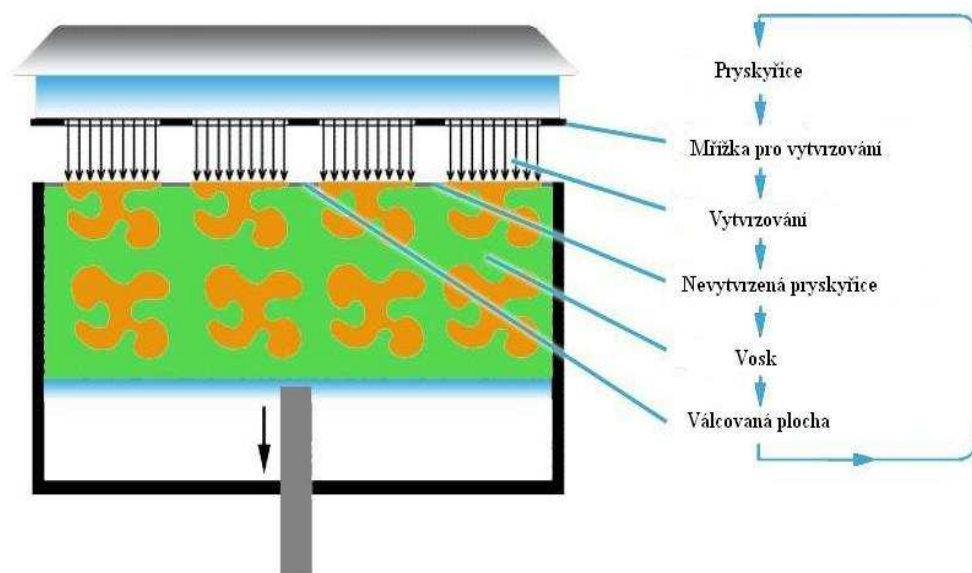
Nevýhody metody LOM [33],[34]:

- papírové části pohlcují vlhkost
- software není příliš kompatibilní s operačním prostředím Windows
- relativně vysoká potřeba dokončovacích prací (vytloukání, broušení, nátěry a tmelení)
- nebezpečí bobtnání ve směru laminace (lepení)
- nehomogenita vlastností materiálu v závislosti na směru laminování

1.5.5 SGC – Solid ground curing

SGC metoda byla vyvinuta izraelskou společností Cubital v roce 1991. [35] Je to metoda vytvářející z jednotlivých vrstev modelu “masky”, přes které se ultrafialovým světlem vytvrzuje fotocitlivý polymer. [36]

Maska je nejčastěji tvořena skleněnou destičkou, na které je vyznačený tvar vytvářené vrstvy. Celá vrstva se v tomto případě vytváří naráz. Vytváření tělesa tedy probíhá ve dvou oddělených současně probíhajících cyklech. Nejprve je vytvořena negativní maska a potom dojde k osvětlení fotopolymeru. Osvícený fotopolymer ztvdne, neosvětlený tekutý fotopolymer je odsáván a vzniklý mezoprostor se vyplní voskem. V dalším kroku je povrch vytvořené vrstvy opracovaný na požadovanou výšku vrstvy a tím je připravený na nanesení další tenké vrstvy tekutého fotopolymeru. Vosková výplň zůstane ve vytvářeném tělese až do konce procesu vytváření, potom je chemickou cestou (pomocí kyseliny citrónové) odstraněna. [36]



Obr. 12 Princip metody SGC [36]

Aplikace metody SGC se dají rozdělit do čtyř oblastí [35]:

- obecné aplikace – funkční analýzy, marketinkové prezentace, koncepční designové prezentace
- slévárenské aplikace – přesné lití (investment casting), lití do písku (sand casting)
- formy a nástroje – silicon rubber tooling, epoxy tooling, spray metal tooling, plaster mold casting
- lékařství – chirurgie, protetika, atd.

Výhody metody SGC:

- vysoce výkonné zařízení
- vysoká konstrukční pevnost a stabilita, přesnost, minimalní smršťování
- není potřeba podpod
- je možné vyrábět více částí najednou

Nevýhody metody SGC:

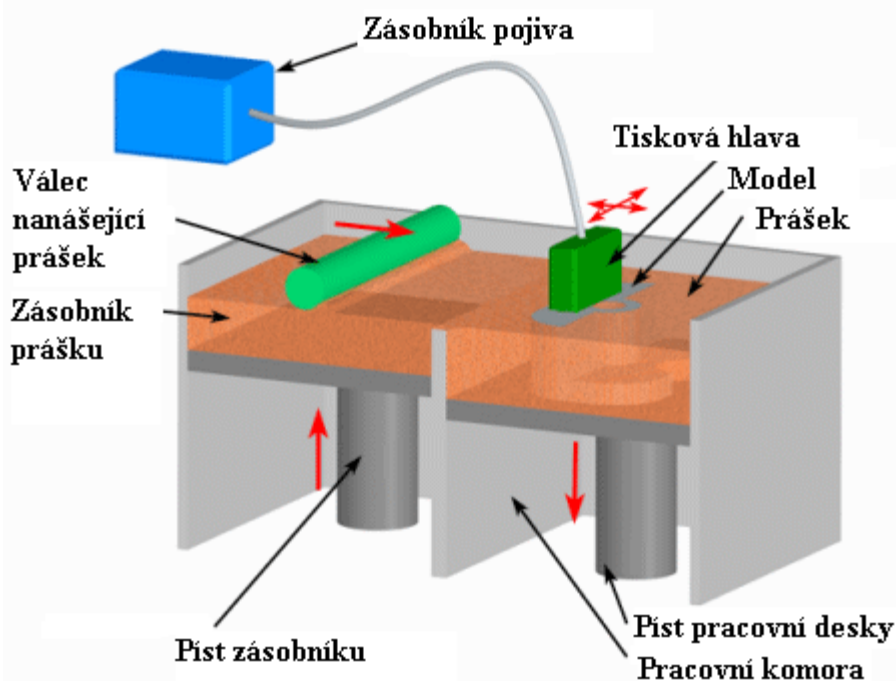
- vosk se těžko dostává z rohů a štěrbin u složitějších výrobků
- v porovnání s jinými systémy zabírá nejvíce místa
- velké množství odpadu pryskyřice a vosku
- hlučnost zařízení

1.5.6 3DP – 3D printing

Trojrozměrný tisk je proces, který byl vynalezen na Massachusetts Institute of Technology (MIT) pro rychlou a flexibilní výrobu prototypových dílů, konečné použití dílů a nástrojů přímo z modelu CAD. Trojrozměrný tisk má bezprecedentní flexibilitu. Díky této metodě můžeme vytvořit části každé geometrie, a z jakéhokoliv materiálu, včetně keramiky, kovů, polymerů a kompozitů.[38]

Tato metoda velmi připomíná proces SLS, ale na rozdíl od ní se laserová hlava nahradí inkjetovou hlavou. Popišme si stručně, jak tato metoda pracuje. Proces probíhá v komoře válcovitého tvaru s pohyblivým pístem. V tenké vrstvě je ze zásobníku na základnu rovnoměrně nanášen práškový materiál. Rotující válec nanáší tenkou vrstvu práškového materiálu a pohybuje se v prostoru mezi dvěma kazetami. Inkjetová hlava, která se pohybuje rastrovým způsobem v rovině xy, vystřikuje pojivo na vybranou oblast jedné vrstvy práškového materiálu. Toto pojivo pak spojuje částice práškového materiálu a vytváří tuhou hmotu jedné vrstvy. Když je vrstva dokončena, posune se válec o tloušťku jedné vrstvy. Po zhotovení modelu se válec vysune a okolní zbylý materiál se odstraní od modelu zelené barvy. Model je následně napuštěn tvrdidlem pro zvýšení jeho pevnosti před dalším užitím.[2]

MIT poskytl (postoupil) licenci na 3DP proces několika firmám, které ji užívají v různých aplikačních oblastech.[2]



Obr.13 Popis metody 3D tisku [39]

Metoda 3D tisku vedla v oblasti Rychlého prototypování v vytváření funkčních dílů a nástrojů přímo z CAD modelu. Byla to první metoda umožňující výrobu keramických dílů, která propagovala přímou výrobu keramických forem pro lití. Metoda 3D tisku byla vedoucím hráčem při přímé tvorbě kovových dílů a jejich využívání při lití. Tato metoda 3D tisku demonstrovala stoupající možnosti použití různých materiálů v technologii RP. [38]

Výhody metody 3D tisku: [40]

- ekonomicky efektivní řešení pro malé a středně velké části dodávané v co nejkratší lhůtě
- ideální pro všeobecné použití součástí vystavených vlivům vody, teploty a mnoha chemických látek
- vysoký stupeň povrchové úpravy lze dosáhnout pískováním a dalšími metodami postprocessingu
- možnost tvorby barevných součástí

Nevýhody metody 3D tisku: [40]

- nevhodné pro testování funkčnosti součástí
- povrch je po vytvoření žebrovaný a drsný
- pomalý proces pro tvorbu objemných součástí



Obr. 14 Součást vyrobená metodou 3D tisku [41]

Materiály:

zp[®]131

zp 131 je víceúčelový materiál, vyznačuje se tuhostí součástí a jejich skvělým rozlišením a přesností barev. Je vhodný pro funkční a tvarové testování. [42]

zp 14

Modely vyrobené z tohoto materiálu mohou být napuštěny voskem a použity při vytavitelném lití. Je složen z celulózy, speciálních vláken a dalších přísad v kombinaci zajišťující přesnost součástí zatímco maximálně vstřebá vosk s minimálními zbytky při vytavení modelu. [42]

Elastomery

Elastomery jsou optimální pro tvorbu pružných modelů. Materiál je složen ze směsi celulózy, speciálních vláken a ostatních přísad schopných absorbovat elastomer a dávající součásti pružné vlastnosti. [42]

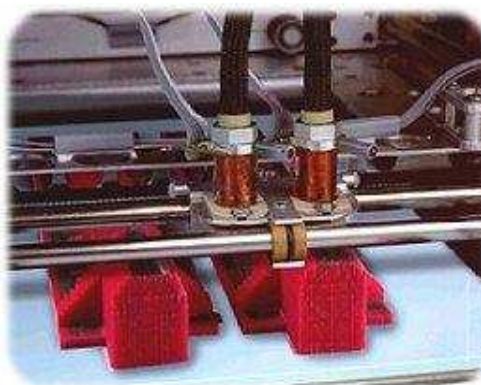
1.5.7 MJM - Multi-Jet Modeling

Několik prvních let v průmyslu převažovaly postupy RP na bázi laseru (stereolitografie a selective laser sintering), avšak později se objevila nová generace strojů na bázi „tisku“. Trojrozměrné systémy zavedly postup modelování Multijet (MJM), kterým se vyrábějí voskové modely „tiskem“ roztavených kapek. Poslední verze stroje Thermojet má 350 „tiskových“ trysek a může rychle vyrábět součásti až do rozměrů 250x190x200 mm (X, Y, Z). Jedním ze základních problémů u běžného postupu MJM je odstraňování výztužného materiálu. Po vyztužení spodních ploch součástí se „tisknou“ štetinovité trsy materiálu (obr.15), které se špatně odstraňují (lámou se a ulpívají na povrchu součástí) a navíc zanechávají drsný kráterovitý povrch. Bez ohledu na tyto nevýhody je postup MJM jedním z mála postupů RP, na který tradiční slévárny přesného lití přecházejí z důvodu nízkých investičních nákladů a poměrně vysoké rychlosti výroby.[43]



Obr. 15 Výztužný materiál na výrobcích vyráběných na MJM strojích [43]

Jedno z možných řešení problému vyztužení „tištěných“ voskových modelů vynalezla americká společnost Solidscape (dříve Sanders Inc.). Firma Solidscape „tiskne“ dva materiály, vodorozpustný výztužný vosk a běžný vosk (obr. 16).



Obr. 16: Výrobek firmy Solidscape (zelený) v červeném výztužném vosku [43]

Vyrobená součást se umístí do čistícího zařízení, kde výztužný vosk vyteče z hotového modelu. Součásti lze vyrobít s použitím velmi tenkých vrstev (15 mikronů), které ve skutečnosti nezanechávají žádné stopy po původních vrstvách (stupňovitost) na výrobcích. Dřívější stroje byly bohužel málo spolehlivé a vzhledem k tomu, že se používaly pouze dvě „tiskové“ trysky (jedna pro konstrukční materiál a druhá pro

materiál výztužný), byly mimořádně pomalé. Ačkoliv jsou nyní k dispozici novější velké stroje, jejich výrobní rychlost je stále ještě zlomkem té, kterou vykazují stroje MJM. Přesto firma Solidscape vyrábí jediný stroj RP, který skutečně zavedl primární trh v oblasti přesného lití, i když pro výrobu velmi malých složených modelů, především pro klenotnický průmysl. Je velká škoda, že firmy Solidscape a 3D Systems nespojily svůj potenciál k výrobě dokonalého stroje na výrobu voskových modelů s kombinací výhod vodorozpustného výztužného materiálu a rychlosti postupu MJM. [43]

2. Technologie Rapid Prototyping ve slévárenství

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

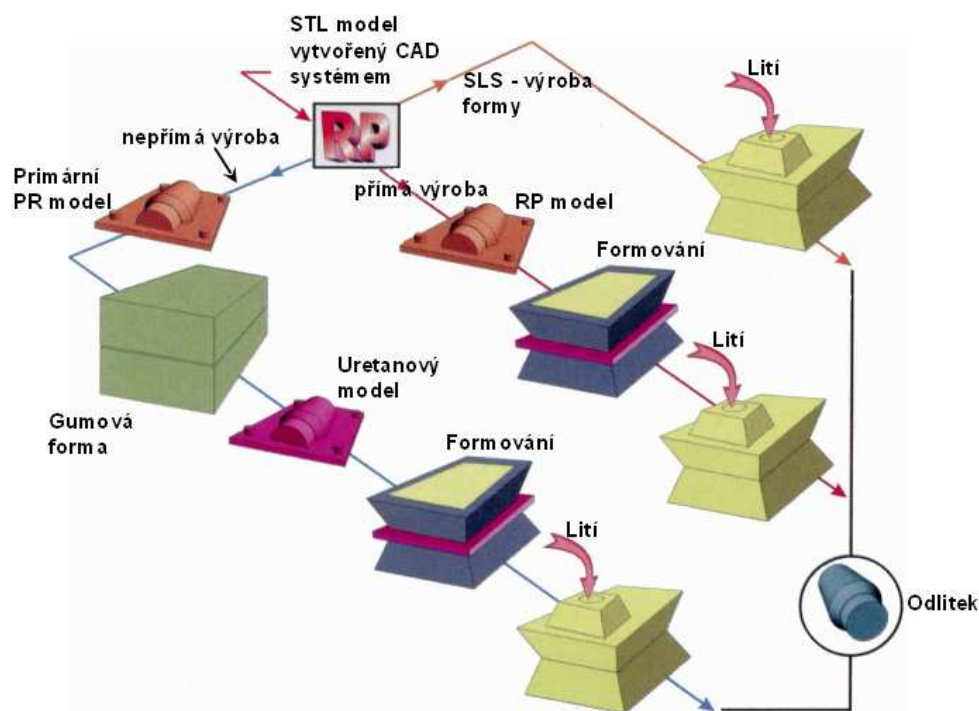
Technologie RP, které byly představeny v předešlé kapitole jsou využívány především pro tvorbu modelů, ovšem používají se i jako mezikrok pro tvorbu forem na odlitky. Metody RP používané pro tvorbu forem se dají rozdělit na dva výrobní směry, kterými jsou buď přímá výroba forem na odlitky a nebo směr druhý nepřímá výroba forem na odlitky.

A) Přímá metoda výroby forem

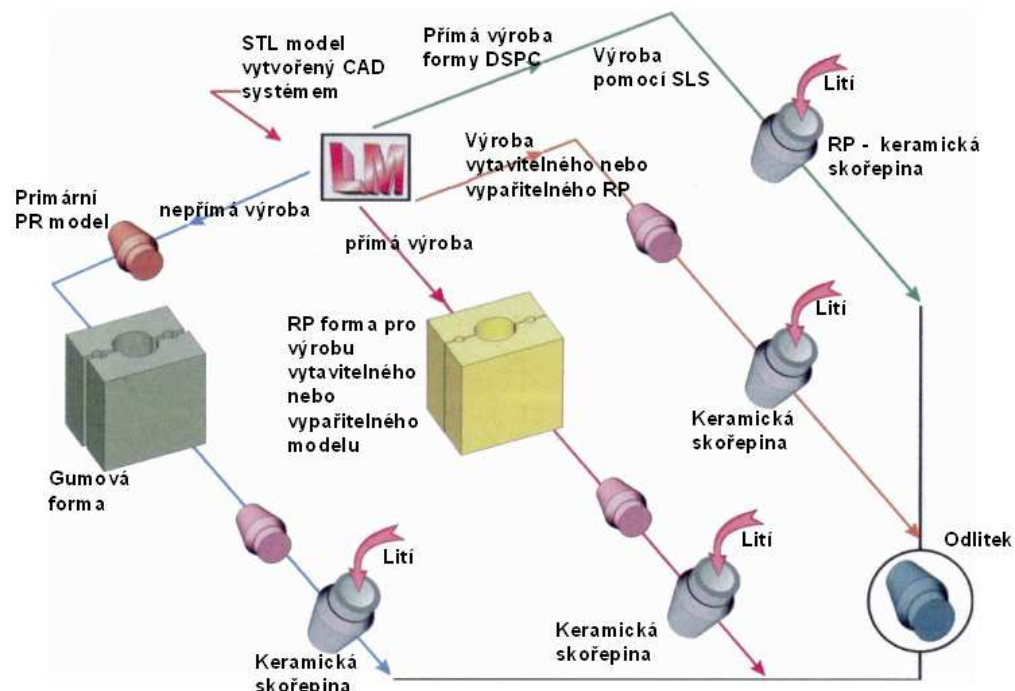
Formy jsou vyráběny přímo pomocí některé z metod RP. Nabízí se velmi rozsáhlá škála metod RP pro tuto formu výroby. Vyrobené formy jsou schopny ve většině případů být k dispozici pro odlévání.

B) Nepřímá metoda výroby formy

Při tomto druhu výroby forem je prvním krokem tvorba modelu pomocí některé z metod RP v předešlé kapitole. Následně se již může vyrábět forma.



Obr. 17 Schéma výroby formy pro lití do písku [52]



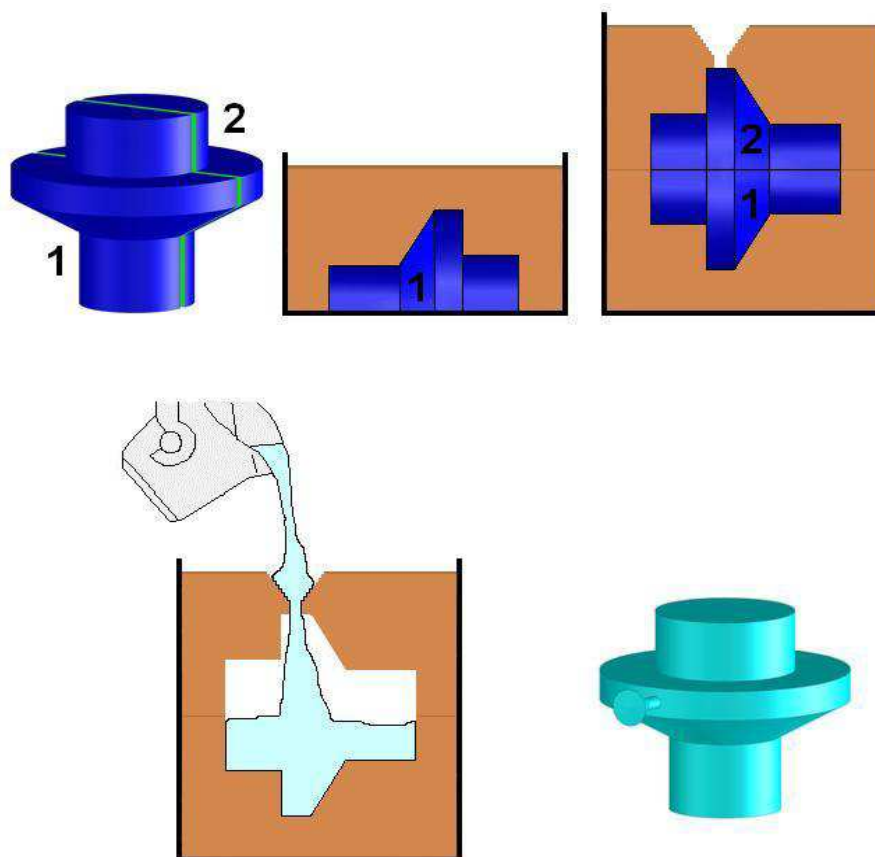
Obr. 18 Schéma výroby forem pro přesné lití [52]

2.1 Pískové formy

Pískové formy lze zhotovit také přímým nebo nepřímým postupem. Nejprve si představíme postup nepřímý, a to lití do písku. Dále se seznámíme s přímou výrobou pískové formy.

2.1.1 Lití do písku

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



Obr.19 Schéma technologie lití do písku [2]

2.1.2 Přímá výroba pískových forem

Dalším novým přístupem je použití metod RP k přímému zhotovení pískových jader a forem. Tyto metody znamenají opravdu revoluční převrat ve výrobě forem pro pískové lití. Jedním z představitelů této technologie je německá firma EOS. Jejich největší RP systém EOSINT S 750, pracující na základě sinteringu, umožňuje tvorbu kompletních pískových forem až do velikosti 720x380x380 mm. Nejsou vyžadovány žádné modely a jádra, neboť i extrémně složité formy jsou založeny na výrobě po vrstvách. To znamená, že konstrukce formy se velmi zjednoduší především v jejím konečném procesu montáže. EOSINT používá několik licích písků, které mají podobné vlastnosti jako řada písků standardně používaných. Tyto písky jsou vhodné pro pozdější zpracování např. hliníku a oceli. Jak již bylo řečeno, EOSINT pracuje na bázi spékání písku, a to postupně jednu vrstvu po druhé. Tímto způsobem je samozřejmě možné vytvářet podřezané a vnitřně zakřivené tvary, které bychom pomocí konvenčních metod nikdy nevytvořili. Zařízení pro zhotovení pískových forem rovněž nabízí firma ProMetal RCT (Německo), která distribuuje zařízení S-15 umožňující zhotovit pískové formy až do velikosti 1500x750x700 mm. [2]

ProMetal

Technologie ProMetal 3D Printing je založena na selektivním vrstveném inkoustovém tisku třírozměrných předmětů z ultrajemných kovových, keramických, cermetových a kompozitních prášků o d_{50} pod $10\text{ }\mu\text{m}$ či submikronových prášků se speciálními pojivy pomocí počítače s využitím modelování podle CAD metod z výkresů a digitalizovaných artefaktů. Technologie používá principu ink-jet počítačových tiskáren a tiskových hlav s vysokým rozlišením podle komplexity dílu. Přenos digitální informace z počítače se uskutečňuje ve formátu ".stl" pomocí všech dostupných médií. Integrální součástí technologie je slinování výrobku a jeho infiltrace kovem pro dosažení vysoké pevnosti a téměř 100% hustoty. Při tepelném zpracování dochází k vyhoření pojiva a slnutí kovových prášků na porézní strukturu, která se zpevňuje infiltrací kovu. [49]

Ve vlastním provozu Rapid Prototyping a Rapid Manufacturing (Rapid Metal Production) užívá ProMetal prášky ze dvou typů korozivzdorných ocelí, austenitické oceli AISI 316 (05Cr17Ni12Mo3) a martenzitické oceli AISI 420 (20Cr13) k infiltraci bronzu. Rozměrová přesnost výrobků je $\pm 0,13\text{ mm}$ s možností výroby průchozích otvorů průměru do $0,2\text{ mm}$. [49]

Spolu s MIT (Massachusetts Institute of Technology) a divizí General Motors Powertrain připravil ProMetal program Advanced Technology Program na výrobu forem na vypěňované polystyrenové modely pro lití tvarově složitých automobilových hliníkových odlitků na "ztracenou pěnu" (lost foam). Technologie zkracuje výrobu forem a náklady na jejich výrobu o 50 %. Při výrobě forem na stroji R10 se docílí rychlosti nanášení až $4100\text{ cm}^3\cdot\text{h}^{-1}$. [49]

ProMetal se rovněž podílí na programu PROFAST (Procurement Readiness Optimization Forging Advanced Systems), řízeném Advanced Technology Institute (ATI), jehož cílem je rychlá a levnější výroba zápuštěk pro malé série objemového tváření "near net shape" hliníkových slitin řady 2XXX (Al-Cu a Al-Cu-Mg) izotermálním kováním pro letecké aplikace. Zápuštěky jsou vyráběny z oceli 420 infiltrované 40 % bronzem. [49]

Nejvyráběnějšími díly jsou proto formy pro vstřikování plastů s chladicími kanály, formy pro modely lost-foam, malosériové formy pro tlakové lití hliníku a zápuštěky pro kování hliníkových slitin. [49]

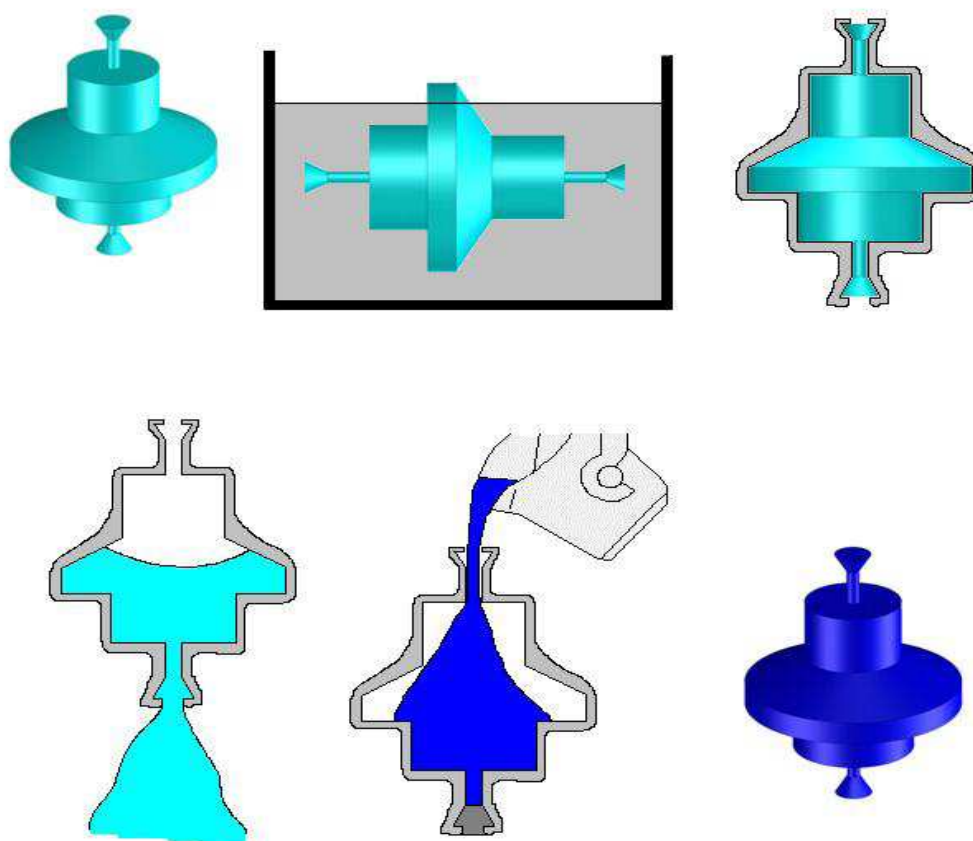
Nejmenším zařízením dodávaným pro technologii 3D Printing je zařízení ProMetal R2 vyrábějící díly do velikosti (d x š x v) $190 \times 190 \times 150\text{ mm}$; R4 vyrábí díly rozměrů $400 \times 400 \times 250\text{ mm}$ a R10 díly velké až $1000 \times 500 \times 250\text{ mm}$ o hmotnosti až 50 kg. Podle velikosti lze pracovní prostor zařízení využít k současné výrobě až tisíců i neidentických dílů v jednom nanášecím cyklu 48 h. Cena zařízení se pohybuje od 200 000 USD u R2 do 625 000 USD u R10. Pro výrobu se dodávají potřebné směsi prášků z kovových materiálů až po žárupevné slitiny, keramických materiálů a cermetů různého složení s patentovanými systémy pojiv. [49]

Předností procesu je jeho téměř neomezená flexibilita, rychlost a schopnost přímé výroby funkčních dílů z CAD podkladů, výroba dílů s komplikovanou vnější a vnitřní geometrií obtížně vyrobitelných obráběcími procesy při vysoké přesnosti a reprodukovatelnosti výroby. [49]

2.2 Metoda vytavitelného modelu

Metoda vytavitelného modelu neboli také „lost wax“ nebo „investment casting“ dnes zastává klíčovou pozici na poli moderních technologií lití kovů. Lze ji začlenit mezi technologie near-net-shape (produkty blízké hotovým výrobkům), kdy se přeměna materiálu realizuje na tvary a rozměry blízké hotovým výrobkům. Termín near-net-shape nelze chápat jako prostředek k zajišťování přímé, účinné a ekonomické cesty k výrobě hotové součásti, ale rovněž jako úsporu drahých materiálů a energií.[53]

Metoda vytavitelného lití patří mezi nejznámější technologie lití. Tato technologie je založena na existenci voskového modelu, který je základním modelem pro vytvoření keramické směsi. Tato směs po tepelném zpracování vytvoří skořepinový obal pro konečný kovový materiál. Výroba voskových modelů je zdoluhavá a vyžaduje často použití další technologie (například obrábění), neboť tvary mohou být velmi komplikované a přesné. Pomocí některých metod RP, např. zařízení firmy Solidscape (USA), dnes můžeme přímo vyrobiť voskové modely za použití stejných nebo blízkých voskových materiálů. Použitím RP pro výrobu voskových modelů dosáhneme velkých finančních a časových úspor. Materiálů, kterými je možné nahradit voskové modely, se v oblasti RP nabízí více. Jednou z nejznámějších a používaných postupů je metoda firmy 3D Systems - QuickCast. [2]



Obr.20 Schéma metody vytavitelného modelu [2]

2.2.1 DSPC - Direct shell production casting

DSPC (Přímá výroba skořepiny pro lití) vytváří skutečné keramické formy na kovové odlitky přímo z 3-D CAD návrhů. Nejsou požadovány žádné modely. DSPC používá 3D tiskovou technologii na výrobu keramických licích forem za použití procesu vrstvu po vrstvě. [44]

Keramické formy jsou vytvořeny ve vrstvách. Výrobní proces zahrnuje tři kroky na vrstvu. Za prvé, je keramický model skořepiny rozřezán na příčné průřezy keramické formy. Za druhé, je vrstva jemného prášku rozprostřena za pomoci mechanismu. Za třetí, multi-Jet tisková hlava se pohybuje nad rozprostřeným práškem a vypouští pojivo do požadovaných míst, který odpovídá průřezu skořepinové formy.[44]

Pojiva proniká do pórů mezi částicemi prášku a spojuje je spolu a vytváří pevnou strukturu. Jakmile je daný vrstva dokončena, je řez modelu keramické skořepiny snížen o jednu vrstvu a proces se opakuje, dokud se všechny vrstvy formy nejsou dokončeny. Forma DSPC je pak vyčištěna od nadbytečného prášku a může se do ní lít roztavený kov.[44]

Forma DSPC může obsahovat vnitřní keramické jádro, vyrábějící duté kovové části. Prakticky jakýkoliv roztavený kov může být lit do forem DSPC. Automobilové díly již byly vyrobeny z hliníku, hořčíku, tvárné litiny a nerezové oceli. [44]

S DSPC, výroba nástrojů (forem, modelů a jader) jsou odlévány jako čisté tvary nástrojů z vyzkoušených částí v souboru CAD. Toto nářadí je nyní vytvořeno pouze jednou, zaručující hladký a nákladově efektivní přechod od prvního článku část produkce. [44]



Obr.21 Výrobek metody DSPC [45]

2.2.2 Nepřímé metody výroby formy

QUICKCAST™

Tato technologie je velmi blízká metodě vytavitelného modelu při výrobě kovových dílů. Rozdíl oproti klasické technologii spočívá v zaformování stereolitografického modelu namísto voskového. Výhodou oproti klasickému postupu je možnost vyrábět velmi složité, tvarově komplikované součástky ve velmi krátké době. Výhoda této metody je výraznější při požadavku několika kusů. V opačném případě je dostupná jiná alternativa Rapid Tooling metod, která umožňuje výrobu několika tisíců kusů. QuickCast je vhodný pro výrobu jednoduchých i složitých kovových dílů rozličných tvarů. Přesnost modelu, který je vyroben na stereolitografu se pohybuje v setinách milimetru. [9]

Díky těmto výhodám QuickCast našel uplatnění nejenom v mnoha průmyslových a spotřebních odvětvích, ale i v náročnějších oblastech. Důkazem tomu je i použití této technologie v oblasti náročné na přesnost, a to v medicíně. QuickCast se zde používá se při výrobě koleních a kyčelních náhrad. Podstata metody spočívá ve vyrobení matečného modelu přímo z 3D dat. Tato data potřebná pro výrobu stereolitografického modelu jsou získávána z CT lékařského tomografu, který do paměti ukládá matematický popis řezů pevné a měkké tkáně. Celý proces výroby náhrady je realizován ve velmi krátké době (maximálně 2-3 týdny). Metoda QuickCast je velmi výhodná pro kusovou až nízkosériovou produkci. Nevýhodou je poměrně vysoká cena modelu určená cenou pryskyřice a cenou vlastního softwaru. [9]

Pro vytavitelné lití je možno také využít ABS tenkostěnné modely zhotovené metodou FDM. Dalším možným způsobem je vytvoření silikonové formy na základě RP modelu pro opakované zhotovení voskových modelů použitelných pro vytavitelné lití. [2]

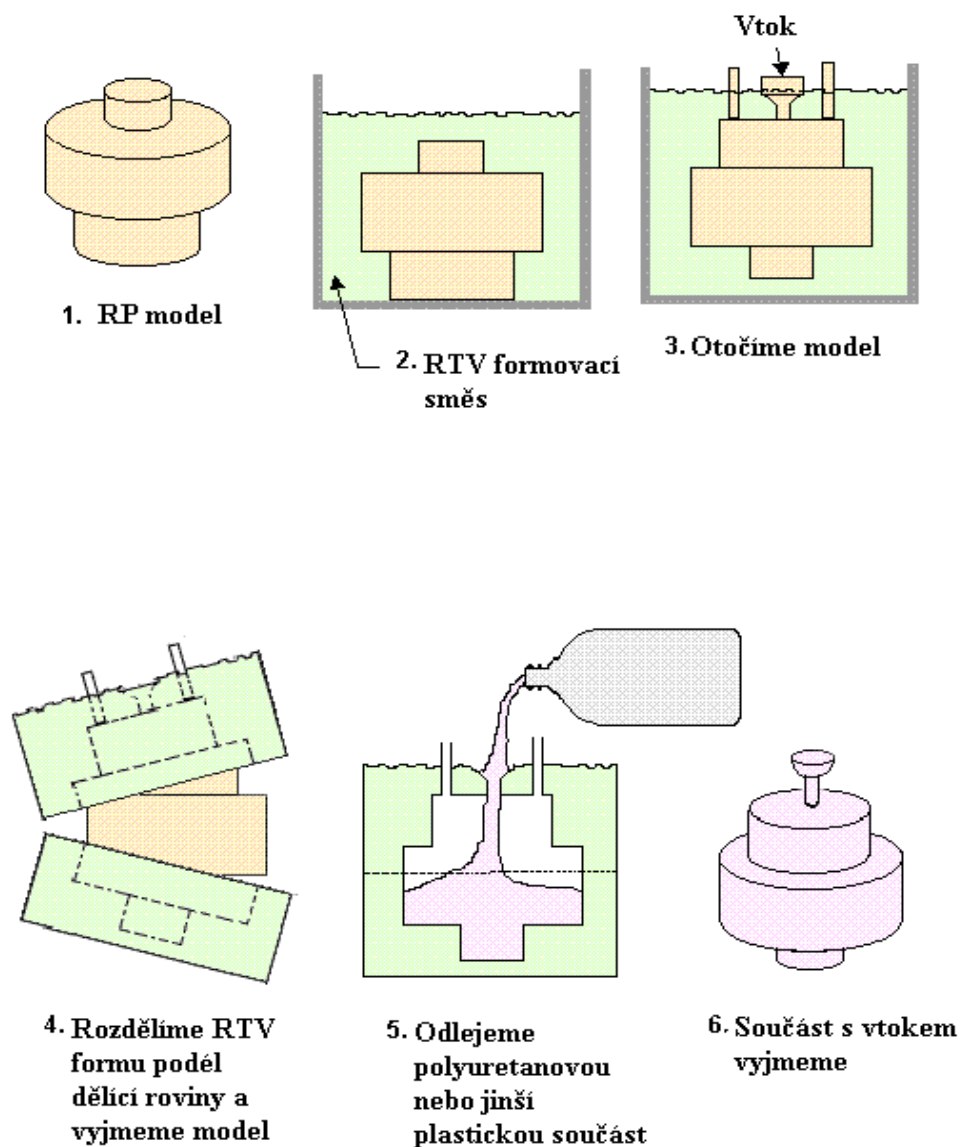
Silicon Rubber Tooling

Toto je standardní metoda výroby malého množství polymerních dílů. Žádná model vyrobený pomocí rychlého prototypování nemůže být použit jako model pro tuto metodu. Tyto nástroje vyrobené touto metodou mohou být použity k tvorbě malých a středních množství dílů v široké škále materiálu jako polyuretan, epoxid nebo jiných polymerů. Některé z těchto polymerů mají vlastnosti, které napodobují částečně technické termoplasty, a to je možnost dosáhnout jimi požadované pevnosti. Tato metoda nevyrábí části, která jsou shodná se vstřikovanými částmi, protože podmínky pro výrobu nejsou stejné. Vstřikované části mohou mít funkčně důležité anizotropní mechanické vlastnosti, které jsou závislé na tom, jak materiál proudí ve formě a ochlazuje se. Nicméně, silikonové pryže nástroje (silicon rubber tooling) jsou levné, nabízejí dobrou přesnost a provedení, a vyrobených dílů jsou často dostatečné pro prototypy nebo malé série. Materiály jsou často používány v přirozeném stavu, ale natření a dalšími sekundárními operacemi můžeme v konečném výsledku docílit velmi a traktivní vzhled součástí.[50]

Silikonové nástroje mohou být obvykle použity jako formy pro několik součástí, než bude nezbytné, aby se nahradily. Počet závisí na přesnosti a dokončovacích požadavcích a zvláštní geometrie produkované součásti. Je možné vyrobit mnoho

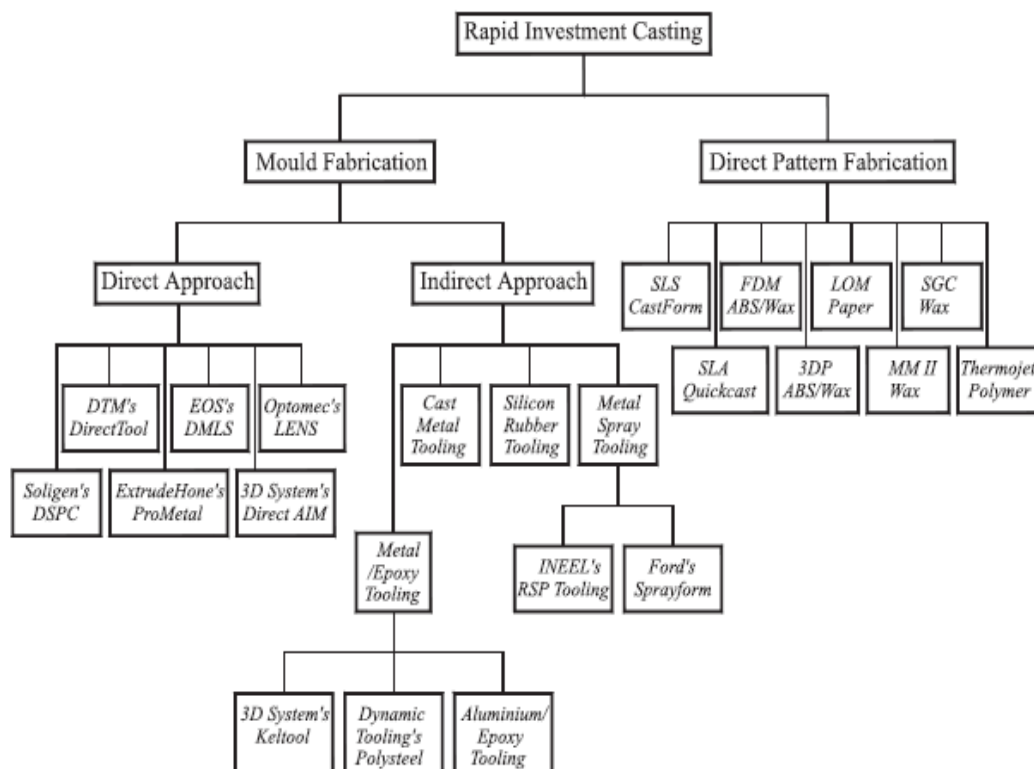
desítek jednoduchých součástí z jediné formy ze silikonového kaučuku, ale deset až dvacet kusů, v případě, že součásti jsou složitější. Opatření formy dochází v důsledku exotermické a reaktivní povaze polymerů, a vzhledem k mechanické deformaci během vyjímání součástí z formy. To může být často nezbytné nahradit model vytvořený metodou rychlého prototypování také, v závislosti na počtu forem, které mají být provedeny s podobnou přesností a geometrií.[50]

Tento proces se uskuteční tak, že se vytvořený model metodou rychlého prototypování umístí do rámu, většinou vyrobeného ze dřeva. Vzor se obvykle musí nechat projít sekundárními operacemi, aby se dosáhl požadovaný stav a přesnost provedení, než je použit. Silikonového kaučuku pokojové teplotě vulkanizační (Silicone rubber room temperature vulcanizing)(RTV) formovací směs je pak nalita kolem modelu. Může být nezbytné zajistit vakuum, aby se vytáhly všechny vzduchové bubliny z pryže a zajistila se přesnost modelu. Jakmile guma ztuhne, model je odstraněn a forma je připravena k použití. [50]



Obr. 22 Popis metody Silicon rubber tooling [50]

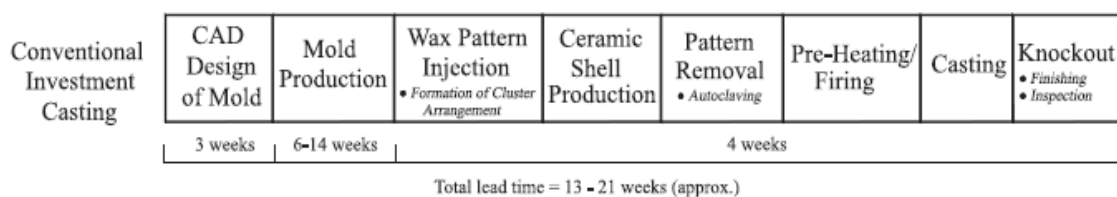
Silikonové pryžové nástroje se nejčastěji používají v ručních slévárenských procesech, ale v posledních letech se objevilo více automatizovaných technologií. Takzvané reakční vstřikovací (RIM) systémy jsou schopny produkovat několik dílů za hodinu z gumových forem. Formy také vydrží déle, protože se snížila doba vystavení chemickým procesům. Řada dalších variant postupu jsou také k dispozici od jednotlivých prodejců.[50]



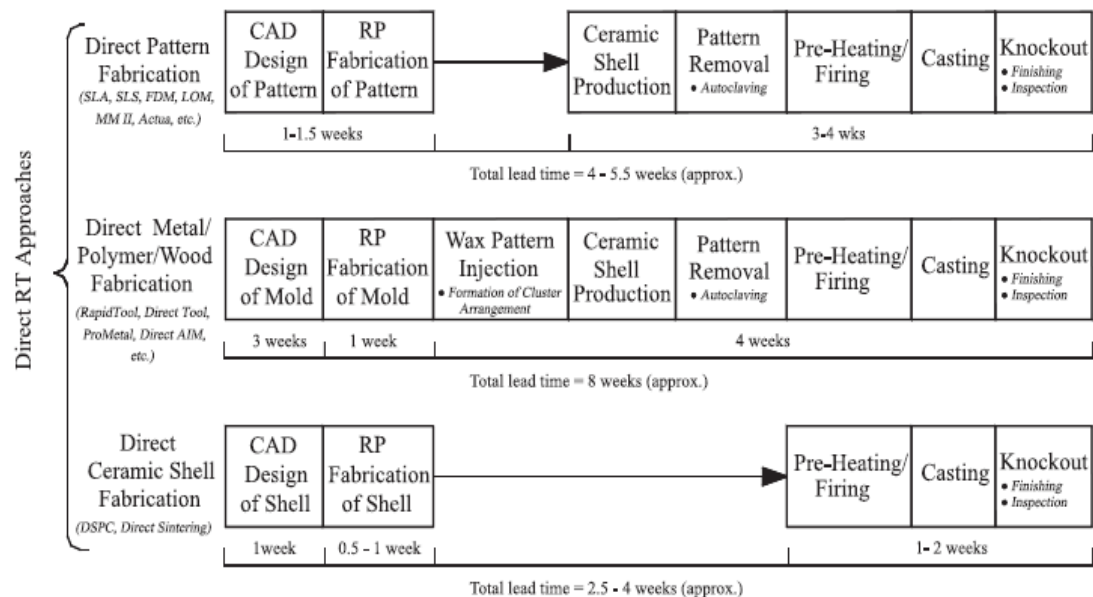
Obr. 23 Rozdělení metod RP pro přesné lití [3]

2.2.3 Porovnání časové náročnosti jednotlivých výrobních postupů

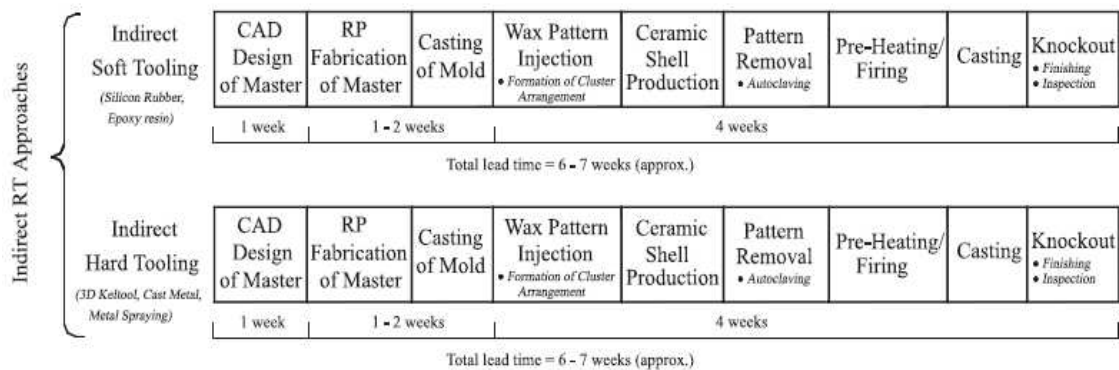
Metody RP jsou využívány ve slévárnách ke snížení časové náročnosti výrobního procesu. Porovnání výrobních časů vůči klasické technologii lití na vytavitelný model s přímou a nepřímou výrobou formy a výrobou modelu pro odlitek můžeme porovnat na následujících obrázcích.



Obr. 24 Časová náročnost lití na vytavitelný model [3]



Obr. 25 Časová náročnost přímých metod výroby formy a modelu [3]



Obr. 26 Časová náročnost nepřímých metod výroby formy [3]

Výrobní časy jednotlivých metod RP jsou o dost kratší než u tradičního postupu lití na vytavitelný model. Rozdíly výrobních časů mezi jednotlivými metodami RP, ať už jde o přímou či nepřímou výrobu, již nejsou, tak velké. Proto již záleží na slévárnách jaká technologie je pro ně vhodná a cenově zajímavá. Na výběr je mnoho druhů technologií, které mají velmi široký rozsah použití.

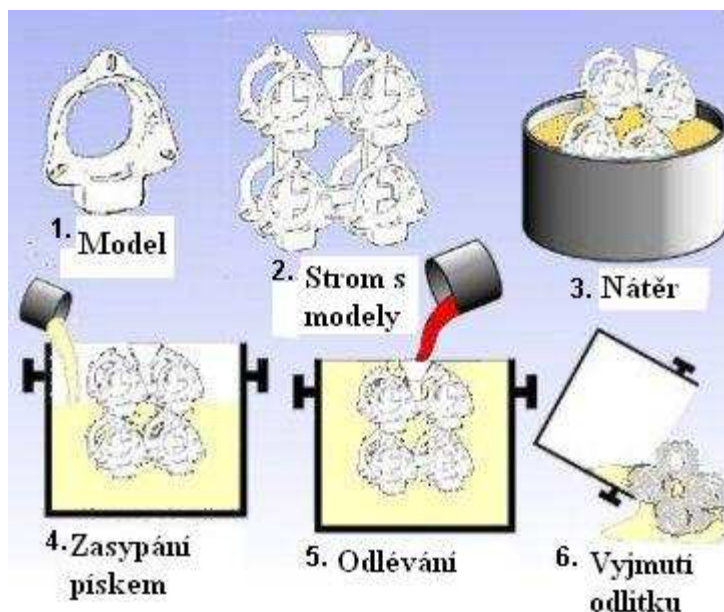
2.3 Metoda vypařitelného modelu

Lost Foam

Metoda odlévání na spalitelný model (Lost Foam) patří mezi moderní slévárenské technologie. Její vývoj začal kolem roku 1960 a praktické uplatnění si našla zvláště při sériové výrobě tvarově složitých tenkostěnných odlitků z litiny a hliníkových slitin.[54]

Při této metodě se odlévá do formy v níž je v místě budoucího odlitku umístěn polysterénový spalitelný model. Během lití se polystyrén před postupujícím kovem vypařuje a tak vytváří dutinu budoucího odlitku. Z polystyrénu je vytvořen nejen vlastní model, ale i části vtokové části a nálitky. Tento komplet je opatřen vrstvou žáruvzdorného nátěru a zasypán v kovovém kontejneru suchým pískem bez jakéhokoliv pojiva. Po ztuhnutí se odlitek i se zásypem z kontejneru vyklopí a písek se na roštovém dopravníku oddělí od surového odlitku.[54]

Výchozí surovinou pro zhotovení modelu je surový polystyrén se zrnitostí kuliček 0,2-0,4 mm. Tato surovina obsahuje vázaný pentan, který se teplem uvolňuje a působí jako nadouvadlo. První výrobní etapou je předzpěňování. Dochází k němu tak, že v předzpěňovacím zařízení se za stálého míchání surový polystyrén ohřívá přehřátou párou s teplotou 120-130°C. Při tom se uvolní asi polovina pentanu, který způsobí asi 30 násobnou expanzi polystyrenu. Po dosažení požadované expanze se kuličky polystyrenu chladí a suší foukáním studeného vzduchu. Získává se tak základní surovina pro výrobu spalitelných modelů. Předzpěněný polystyrén se pak pneumaticky dopravuje do textilních sil, v nichž dochází z jeho zrání a stabilizaci. Pro výrobu modelů se používá kovových forem. Formy jsou zhotoveny obráběním z kovových slitin a jsou velmi drahé. Forma je namontována v rámu vypěňovacího stroje. Pohyb jednotlivých dílů je řízen hydraulickými válci. Dutina formy se pomocí injektorů vyplní kuličkami předzpěněného polystyrenu. Systémem průduchů se do dutiny formy přivádí pára s teplotou 120-130°C. Dochází k měkknutí a vlivem uvolňování zbývajících nadouvadla k expanzi kuliček polystyrenu, které se v uzavřené dutině formy pevně svaří. Expanze se ukončí tak, že se uzavře přívod páry a forma se z rubové strany intenzivně chladí studenou vodou. Následuje vakuování dutiny formy, při kterém se odstraní zkondenzovaná voda. Forma se rozebere a hotový model se vyjme. Modely se dále suší proudem vzduchu při teplotách 40-50°C, takto zhotovené modely se mohou po určitou dobu skladovat. K modelu jsou dále připojeny žebra, výstupky a vtoková soustava. Zkompletované modely se opatřují žáruvzdornou ochranou vrstvou máčením v aluminium silikátu. Dále se modely suší proudem vzduchu o teplotě 60°C. Model se položí do formy a postupně se zasypává pískem a pěchuje se. Při odlévání dochází k vypařování zpěněného polystyrenu před čelem proudu, používá se proto spodní vtok. Zpěněný polystyren prostupuje vrstvou nátěru a zásypovým materiálem a při styku se vzduchem nad formou shoří. [54]



Obr.27 Postup metody Lost Foam [55]

Technologie Lost Foam je moderní slévárenskou technologií, kterou se vyrábí tvarově velmi složité tenkostěnné odlitky se žebry a vnitřními dutinami. Dosahuje se vysoké rozměrové přesnosti. Metoda se používá pro sériovou a hromadnou výrobu odlitků ze slitin železa a hliníku.[54]

Primecast 101 – polystyren

Materiál určený především pro výrobu metodu vypařitelného modelu. Všeobecně je Primecast 101 vhodný pro keramické skořepiny nicméně za určitých opatřeních. Další možná oblast je pro výrobu matečného modelu vakuovým odléváním. [56]

Vlastnosti:

- rozměrová přesnost
- vysoká kvalita povrchu
- pevnost

CastForm™ PS Plastic

Tento materiál od společnosti 3D Systems, je nabízen jako slévárenský vosk. Vyznačuje se velmi malým množstvím zbytkového popela (méně než 0,02 %), proces vyhoření je velmi krátký. Vytvoří model přímo bez nutnosti nepřímé metody. Komplexní tvorba modelu přesného lití jako jsou tyto materiály: titan, hliník, hořčík, zinek, železité a neželezité kovy. Jednoduché sestavení a oprava modelu. [13]

2.4 Technologie RP pro zhotovení trvalých forem

2.4.1 LENS - Laser engineered net shaping

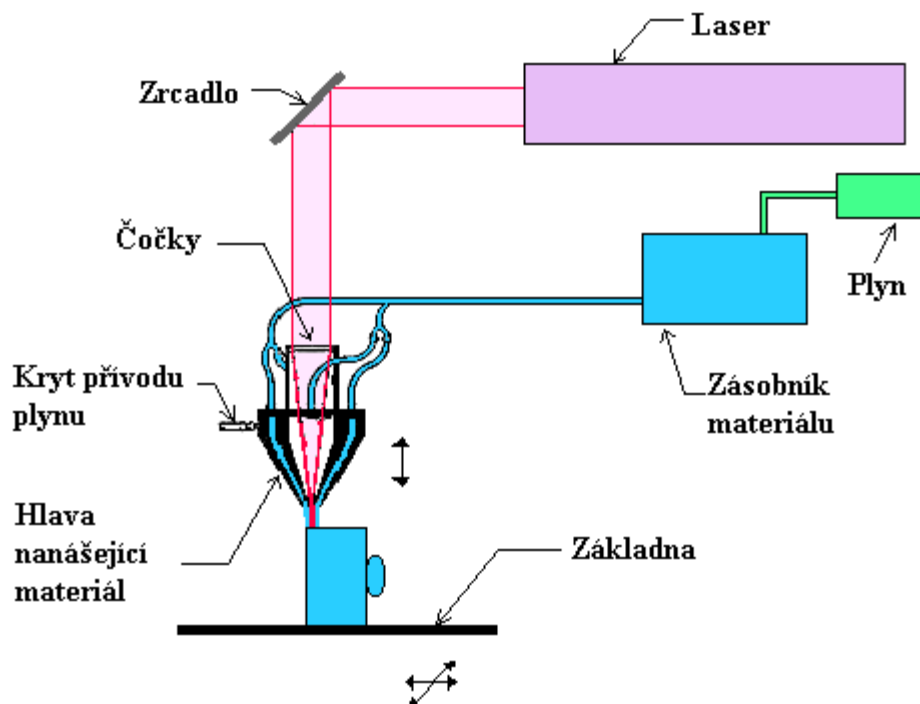
Sandia National Laboratories vyvinuli novou technologii pro výrobu třídimenzionálních kovových komponent přímo z CAD modelů. Tento proces, nazývaný Laser Engineered Net Shaping (LENS[®]), vykazuje obrovský potenciál revolučním způsobem změnit způsob, jakým jsou kovové části, jako jsou komplexní prototypy, nástroje a malosériově vyráběné předměty vyráběny.[46]

Proces zhotovuje kovové díly přímo z Computer Aided Design (CAD) modelů s použitím kovového prášku, který je roztaven a vstříknut na určené místo, kde za pomoci laserového paprsku se vytvrdí.[46]

Tento proces je podobný ostatním technologiím rychlého prototypování ve svém přístupu k vyrobení pevné součásti po vrstvách. Nicméně, LENS[®] technologie je unikátní v tom, plně kompaktní kovové součásti jsou vyrobeny přímo ze surovin, které obcházejí počáteční operace jako odlévání, kování a obrábění na hrubo. [46]

LENS[®] nabízí možnost výrazně snížit čas a náklady potřebné k realizaci funkčních kovových dílů. Jako materiál doplňkové procesu, budou další úspory nákladů realizovány prostřednictvím zvýšeného materiálového využití oproti procesům hromadného odstraňování. LENS[®] lze také použít ke změně nebo opravě stávajících zařízení. [46]

Části byly vyrobeny ze slitin nerezové oceli, slitin na bázi niklu, slitiny nástrojové oceli, titanových slitin a dalších speciálních materiálů.[46]



Obr. 28 Popis metody LENS [47]

2.4.2 DMLS - Direct metal laser sintering

Direct Metal Laser Sintering (DMLS) je revoluční technologie umožňující vyrobit plně funkční kovové díly přímo z 3D CAD dat, přičemž odpadá investice do výrobních nástrojů a technologií, což přináší značnou úsporu nákladů a času. Kovové díly vyrobené technologií DMLS jsou z hlediska mechanických vlastností plně srovnatelné s obráběnými či odlévanými díly. [48]

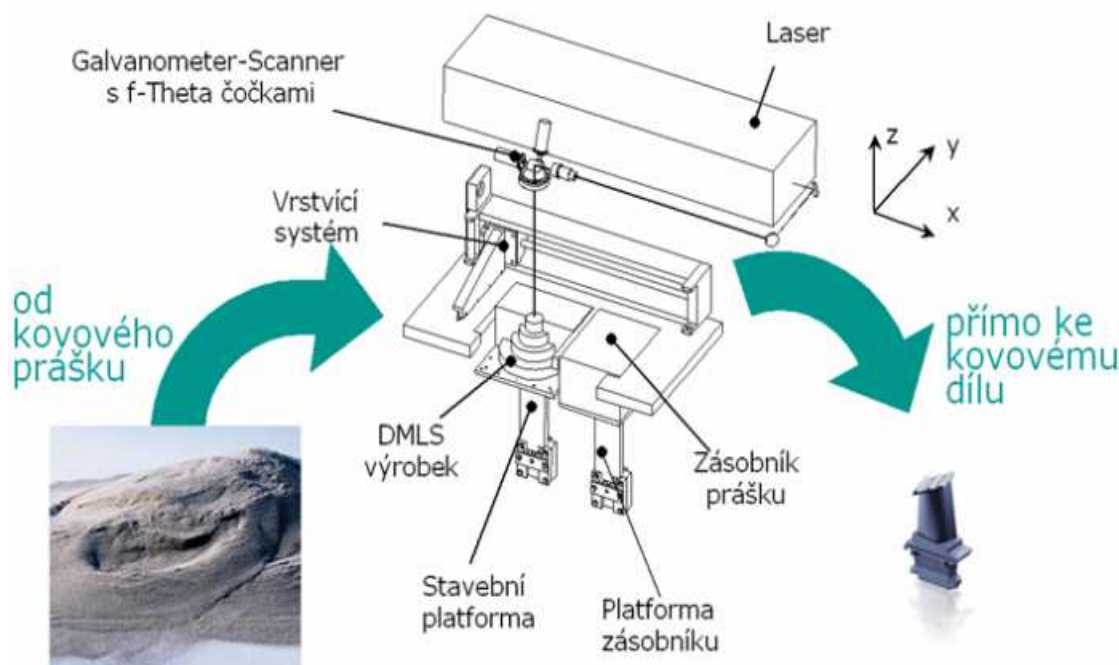
Spektrum aplikací DMLS technologie je velmi široké – od prototypů, přes malosériové díly až po finální, individualizované výrobky. Výhody procesu rostou s tvarovou komplexností dílů – čím je geometrie výrobku složitější co do tvaru a četnosti výskytu detailních prvků, tím je technologie DMLS ekonomicky efektivnější. [48]



Obr.1: zařízení EOSINT M 270 [44]

DMLS je technologie založená na postupném tavení velmi jemných vrstev kovového prášku pomocí laserového paprsku. 3D CAD model výrobku je nejprve „rozřezán“ na jednotlivé vrstvy, díl je pak stavěn vrstvu po vrstvě. Energie laserového paprsku lokálně taví kovový prášek pouze v konturách řezu, který je definován průnikem dané roviny (vrstvy) tělesem (3D CAD modelem) výrobku. V průběhu stavby dílu je nezbytná fixace správné polohy dílu pomocí podpůrné struktury, která je ukotvena k základní ocelové platformě. Podpůrné prvky jsou stavěny vrstvu po vrstvě zároveň s výrobkem. Minimální tloušťka vrstvy je 20 mikronů. Laser důkladně taví kov ve formě prášku a tím je zajištěno dokonalé spojení jednotlivých vrstev. Výkonný 200 Ytterbium (Yb)-fibre „dual spot“ laser zařízení EOSINT M 270 umožňuje dosažení jemného rozlišení detailu a díky vyšší hustotě energie je i rychlost stavby dílu vyšší v porovnání s předchozím typem zařízení EOSINT M 250, které bylo vybaveno CO2 laserem. Laserový paprsek je precizně řízen v x a y souřadnicích, osa z je řízena posunem platformy o 20 mikronů při změně vrstvy, což umožňuje dodržení tvarových tolerancí v rozmezí ± 0.1 mm. Pracovní prostor zařízení EOSINT M270 je 250x250x215 mm tento rozsah umožňuje výrobu dílů malé až střední velikosti v rozmezí několika

hodin či dnů oproti dnům až týdnům při využití tradičních technologií. Po spuštění procesu zařízení pracuje v plně automatickém režimu 24 hodin denně. Po zakončení výrobního procesu je platforma s výrobky vyjmuta z pracovního prostoru zařízení a díly jsou odděleny od platformy.[48]



Obr.1 Popis metody DMLS [48]

Dokončovací operace jsou nezbytnou součástí výrobního procesu. Nejprve je nutno odstranit podpurné struktury z povrchu výrobku, povrch lze dále tryskat, brousit, leštit či obrábět stejným způsobem, jako klasický kovový materiál. Principiální výhodou přímé výroby kovových dílů pomocí DMLS procesu je fakt, že odpadá potřeba výrobního nářadí (forem, lisovacích nástrojů...). Nespotřebovaný prášek je z 98% znova využíván pro výrobu, tzn. že proces je ekonomický a zároveň ekologický. DMLS umožňuje vytvářet vnější i vnitřní tvary součástí (jakkoli složité) zároveň, což v důsledku přináší možnost přímé výroby tvarově komplexních dílů, které by dříve bylo nezbytné z technologických důvodů vyrobit z několika součástí - je zde určitý potenciál úspory výrobních nákladů, zkrácení doby kompletace a zvýšení spolehlivosti. DMLS proces umožňuje aplikovat drobné konstrukční variace pro každý jednotlivý díl, tzn. výrobu produktů optimalizovaných dle individuálních požadavků zákazníka.[48]

Materiály

Výběr materiálů je široký - od lehkých slitin přes oceli až po super-slitiny a kompozity. Firma EOS vyvinula specifické slitiny pro DMLS proces a zároveň optimalizovala standardní průmyslové materiály jako např. nerezové oceli.[48]

Direct Metal 20 (DM 20):

-velmi jemný multi-komponentní prášek na bázi bronzu. Výsledné díly nabízejí dobré mechanické vlastnosti s výborným rozlišením detailu a kvalitou povrchu. Povrch výrobku lze snadno dokončit tryskáním nebo může být velmi snadno vyleštěn. Tento materiál je ideální pro výrobu funkčních kovových prototypů, zároveň je vhodný pro výrobu prototypových či malosériových vstřikovacích forem.[48]

Direct Steel 20 (DS 20):

- velmi jemný multi-komponentní prášek na bázi oceli, nabízí vysokou pevnost, tvrdost, otěruvzdornost a hustotu povrchu. Rychlost výroby v porovnání s DM 20 je nižší, vzhledem k nutnosti důkladného protavení povrchu dílu. Tento materiál nachází využití zejména při výrobě vstřikovacích forem a funkčních prototypů.[48]

Nerezová ocel (EOS SS 17-4):

- nerezová ocel ve formě jemného prášku. Složení odpovídá US klasifikaci 17-4, evropské normě 1.4542 a splňuje požadavky AMS 5643 pro Mn,Mo,Ni,Si,C,Cr a Cu. Tento typ oceli je charakteristický vysokou korozní odolností a mechanickými parametry. Výrobky mohou být dále opracovány tryskáním, obráběním, leštěním, mohou být svařovány či pokoveny. Tento materiál je ideální pro výrobu funkčních kovových prototypů, individualizovaných dílů či náhradních dílů.[48]

Martenzitická ocel 1.2709 (EOS MS 1):

- martenzitická ocel ve formě jemného prášku. Složení odpovídá US klasifikaci 18 Maraging 300, evropské 1.2709 a německé X3NiCoMoTi 18-9-5. Tento typ oceli je charakteristický velmi vysokou pevností a tvrdostí povrchu. Je snadno obrobitelná a následně vytvrditelná až na 54 HRC. Materiál se běžně používá pro výrobu forem a nástrojů či vysoce zatěžovaných průmyslových součástí.[48]

Kobalt Chrom (EOS CC MP1):

- EOS Cobalt Chrome MP1 je směs jemného prášku, ze kterého lze na zařízení EOSINT M270 získat díly z Cobalt Chrome Molybden superslitiny. Tato superslitina je charakteristická excelentními mechanickými parametry (pevnost, tvrdost ...), korozní a teplotní odolností. Slitina se běžně používá pro medicínské aplikace (implantáty, zubní náhrady) a také pro výrobu vysoce tepelně zatěžovaných součástí (letecké motory).[48]

Titan (EOS Ti 64 / Ti64ELI):

Ti6AlV4 slitina ve formě jemného prášku. Pro tuto lehkou slitinu jsou charakteristické excelentní mechanické vlastnosti a korozní odolnost v kombinaci s nízkou specifickou hmotností a biokompatibilitou. Materiál se používá zejména v letectví, při výrobě závodních automobilů a v medicínských aplikacích (implantáty).[48]

Aplikace

DMLS postupně získává pozici výrobní metody pro rychlou a zároveň přesnou výrobu plně funkčních prototypových dílů nebo finálních výrobků pro rozmanité aplikace. Proces vytváří vysoce odolné, ale přitom jemné komponenty, které nachází využití v mnoha odvětvích, včetně letectví, automobilového, elektronického či obalářského průmyslu a medicíny. Široké pole uplatnění získává v oblasti výroby forem a nástrojů pro výrobu plastových, keramických či kovových výrobků (prototypové formy, malosériové formy, tvarově složité vložky, jádra s chladicími kanály optimalizovanými dle tvaru a složitosti dutiny pro rychlejší odvod tepla). Zejména v plastikářství lze vhodnou aplikací DMLS dosáhnout redukci odformovacích časů, zvýšení produktivity procesu, zkrácení výrobní lhůty forem a lepší kvality dílů. Pole působnosti technologie DMLS je velice široké a neustále se rozrůstá, vzhledem k tomu, že technologie je relativně nová – zhruba 15 let – potenciál využití nebyl dosud dostatečně prozkoumán. S neustále rostoucí rychlostí zařízení a stále se rozšiřujícím počtem materiálů vzrůstá i rozsah aplikací této technologie.[48]

2.4.3 Metal Spray Tooling

Kovový postřík se používá pro výrobu lehkých nástrojů. Jedná se postřík tenkou skořápku o tloušťce 0,080 palce (2 mm) přes model a podporující touto epoxidovou pryskyřicí její tuhost. Několik kovových techniky postříku je k dispozici. U většiny metod rychlého prototypování, vyráběné modely mají nízkou teplotou skelného přechodu (tj. teplota, kdy se materiál začne měnit na měkkou amorfni strukturu). Proto je důležité, aby teplota modelu se držela co nejnižší při postříku. Pokud se teplota modelu zvýší o dost tak se začne povolovat a narušovat, což má za následek nepřesný nástroj.[51]

Nejoblíbenější techniky pro použití s modely rychlého prototypování jsou postříky s nízkým bodem tání slitin (založených na olovu a cínu) s pistolí podobné postříkovače na barvy a kovový povlak s elektrickým obloukem. Systém s elektrickým obloukem prochází dvěma dráty v pistoli a elektrický oblouk vzniká mezi nimi. To způsobí, že drát materiál nataví a pak stlačený plyn tento natavený materiál nastříká na model. Čím vyšší je bod tání drátu materiálu, tím obtížnější je udržet model v pořádku. Proto je častý postřík slitin zinku nebo hliníku přímo na modely rychlého prototypování. Rovněž je možný postřík materiálem o vyšší teplotě tání na modely rychlého prototypování, ale je třeba být ostražitý. Jednou z technik je použít kovovou vrstvou pomocí pokovování. Jakmile je kovový povlak na modelu, bude teplo přenášeno mnohem snáze přes jeho povrch.[51]

Jedním z problémů spojených s kovovým postříkem je, že produkuje skořepiny s vysokým vnitřním pnutím. Je možné zmenšit tyto nežádoucí účinky současným pěstováním střílejícími broky na postříkovanou skořepinu. Ostřelování skořepiny během postříku vyvolává tlakové napětí, které vyrovnává tahové napětí.[51]

Kovové postřík se obvykle používá u modelů, které mají velmi mírně zakřivené plochy a je opravdu nejvhodnější pro tento typ geometrie. Je velmi obtížné stříkat do úzkých štěrbin nebo malých průměrů otvorů. Pokud jsou tyto typy uvedených vlastností na modelu, je běžné, že se tvoří mosazné vložky, umístí se do modelu a stříká se kolem nich. Když je model vyjmut ze skořepiny, jsou vložky trvale uchyceny ke skořepině. Tyto vložky jsou také silnější než materiál skořepiny, který je slabý a snadno se láme, pokud vznikl jako vysoký a tenký.[51]

Postřík kovových nástrojů, které byly použity v mnoha aplikacích, včetně plošného tváření, vstřikování plastů, lisování a vyfukování. Různé plasty byly tvarované včetně polypropylenu, ABS, polystyrenu a obtížných procesů materiálů, jako jsou vyztužený nylon a polykarbonát.

Hlavní výhodou postříku kovem nástroje je, že můžete produkovat velké nástroje rychle. Hlavní nevýhodou je skutečnost, že může být obtížné nebo nemožné stříkat do úzké štěrbin nebo hluboké. Platí, že geometrie součásti musí být relativně jednoduchá. Formy nejsou zvlášť silné a proces vyžaduje speciální vybavení a speciální operační prostředí. [51]

3. Závěr

Technologie RP se velmi rychle vyvíjí a rozšiřují již tak velmi širokou oblast použití v průmyslových odvětvích. Na trhu je široká nabídka technologií RP, tato bakalářská práce se zabývá jen částí této nabídky. A to použitím těchto technologií při výrobě prototypových odlitků. Jsou zde uvedeny některé používané technologie vhodné pro tuto oblast použití.

S postupem času se nabídka technologií zvětšuje a nabízí nové druhy RP technologií. RP technologie se svými schopnostmi překrývají, ale i doplňují. Není RP technologie na jakýkoliv druh použití. Průmyslové podniky si musí z těchto technologií vybrat konkrétní technologii, která vyhovuje jejich požadavkům a zapadá do výrobního procesu. V poslední době se výrobci RP technologií snaží o zlepšení kvality povrchu a rozměrové přesnosti prototypů, také zlepšení mechanických vlastností a v neposlední řadě, také o snížení ceny RP zařízení. A také o zrychlení výroby prototypů. Rychlost je právě jedním z mnoha důvodů zavádění této technologie do firem, protože urychlí výrobní proces a konečným důsledkem sníží náklady na výrobu daných součástí.

Technologie RP ve slévárenství umožňuje přímou i nepřímou výrobu modelů a forem. Ať už se jedná o klasickou technologii lití do písku, kde jsou převážně využívány technologie na výrobu modelu (SLS, SLA, FDM, LOM). Nebo technologie výroby skořepin, kde jsou velmi využívány technologie 3D tisku. 3D tisk je velmi rozšířenou metodou RP pro své široké uplatnění a možnosti použití v kanceláři. Výroby forem a modelů pro přesné lití je jednou z oblastí slévárenství, která hojně využívá technologii RP. Pro přímou výrobu skořepin je používána metoda DSPC. Dále je pro metodu vypařitelného modelu používána metoda Quickcast. RP technologie poskytují také možnost výroby trvalých forem a to například technologií DMLS. Technologie RP pro výrobu trvalých forem se v budoucnu bude používat mnohem více, než doposud. Protože za velmi krátkou dobu vyrobí formu do které se bude dát hned odlévat součást.

V budoucnu budou technologie RP ve slévárnách velmi používány. V dnešní době je sice nákup těchto technologií velmi finančně náročný, ovšem poskytuje slévárně konkurenční výhodu ve snížení výrobních časů a nákladů. Což jsou aspekty, které jsou s budou rozhodovat v tomto odvětví o úspěchu a neúspěchu společnosti. RP technologie z tohoto důvodu mají budoucnost velmi perspektivní.

Seznam použitých zdrojů

- [1] NAVRÁTIL, R. *Co znamená Rapid Prototyping* [on-line]. Vydáno: leden 2000, [cit. 2010-4-3]. Dostupné z: <<http://robo.hyperlink.cz/rapid/main01.html>>
- [2] DRÁPELA, M. *Modul Rapid Prototyping* [on-line]. Vydáno: 16.4.2007, [cit. 2010-4-3]. Dostupné z: <<http://www.vu.vutbr.cz/digidesign/Moduly/Rapid%20Prototyping%20-%20Ing.%20Milosvav%20Dr%C3%A1pela.pdf>>
- [3] C.M. Cheah, C.K. Chua, C.W. Lee, C. Feng and K. Totong. Rapid prototyping and tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Springer London, 2003. Volume 25, č. 3-4, 308-320s. ISSN 0268-3768.
- [4] MCAE Systems, s.r.o. *3D Printers* [on-line]. Vydáno: 2010, [cit. 2010-4-3]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/rychla_vyroba_prototypu_CS.html>
- [5] Sycode. *Rapid Prototyping* [on-line]. Vydáno: 2008, [cit. 2010-4-3]. Dostupné z: <http://www.sycode.com/products/stl_import_sw/images/stl_import_sw.gif>
- [6] INTEO.CZ. *Rapid Prototyping* [on-line]. Vydáno: 2008, [cit. 2010-4-3]. Dostupné z: <http://www.inteo.cz/img/user_images/uploaded/3D%20prpttypy/SOUBOR.JPG>
- [7] CUSTOMPART.NET. *Selective Laser Sintering* [on-line]. Vydáno: 2009, [cit. 2010-4-25]. Dostupné z: <<http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>>
- [8] NAVRÁTIL, R. *Selective Laser Sintering* [on-line]. Vydáno: leden 2000, [cit. 2010-4-25]. Dostupné z: <<http://robo.hyperlink.cz/rapid/main06.html>>
- [9] 3D TECH. *Kovové výrobky* [on-line]. Vydáno: 2002, [cit. 2010-4-26]. Dostupné z: <<http://www.3dtech.cz/default.asp?language=cs§ion=12>>
- [10] BIBA. *SLS* [on-line]. Vydáno: 2001, [cit. 2010-4-26]. Dostupné z: <<http://louisville.edu/speed/rpc/applications/selective-laser-sintering.html>>
- [11] ARPTECH. *SLS services from Arptech* [on-line]. Vydáno: 2004, [cit. 2010-4-26]. Dostupné z: <<http://www.arptech.com.au/services/slsrv.htm>>
- [12] EOS. *Materials for Sand-Systems* [on-line]. Vydáno: 2008, [cit. 2010-4-29]. Dostupné z: <<http://www.eos.info/en/products/materials/materials-for-sand-systems.html>>
- [13] 3D Systems, Inc. *Materials* [on-line]. Vydáno: 2009 [cit. 2010-4-29]. Dostupné z: <<http://www.3dsystems.com/products/materials/sls/castformPS.asp>>
- [14] ENGINEERS EDGE. *Stereolithography* [on-line]. Vydáno: 2010, [cit. 2010-4-29]. Dostupné z: <http://www.engineersedge.com/sla_rapid_proto.htm>
- [15] DTP. *Prototyping* [on-line]. Vydáno: 2006, [cit. 2010-4-29]. Dostupné z: <<http://www.dpt-fast.com/rapidprototyping/sla.asp>>
- [16] ARPTECH. *SLA services from arptech* [on-line]. Vydáno: 2004, [cit. 2010-4-29]. Dostupné z: <<http://www.arptech.com.au/services/slasrv.htm>>
- [17] CUSTOMPART.COM. *Stereolithography* [on-line]. Vydáno: 2009, [cit. 2010-4-29]. Dostupné z: <<http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>>

- [18] NAVRÁTIL, R. *Stereolithography* [on-line]. Vydáno: leden 2000, [cit. 2010-4-29]. Dostupné z: <<http://robo.hyperlink.cz/rapid/main05.html>>
- [19] NASR, E.A, KAMRANI, A.K. *Computer-based design and manufacturing: an information-based approach* [on-line]. Vydáno: 2006, [cit. 2010-4-29]. Dostupné z: <<http://books.google.cz/books?id=FawH3OJQ22QC&pg=PA285&dq=stereolithography+technology+OR+SLA&cd=2#v=onepage&q=stereolithography%20technology%20OR%20SLA&f=false>>
- [20] REDEYE EXPRESS. *Stereolithography* [on-line]. Vydáno: 2010, [cit. 2010-4-29]. Dostupné z: <<http://express.redeyeondemand.com/SLA.aspx>>
- [21] REALIZE, Inc.. *Stereolithography (SLA)* [on-line]. Vydáno: 2005, [cit. 2010-4-29]. Dostupné z: <<http://www.realizeinc.com/stereolithography.asp>>
- [22] 3D Systems, Inc.. *Product Materials* [on-line]. Vydáno: 2009, [cit. 2010-4-29]. Dostupné z: <http://www.3dsystems.com/products/datafiles/datasheets-1007/SLA/Selector_Guide-Accura_SL_Materials.pdf>
- [23] VENUVINOD Patri K., MA Weiyin. *Rapid prototyping: laser-based and other technologies* [on-line]. Vydáno: 2004, [cit. 2010-4-30]. Dostupné z: <http://books.google.cz/books?id=7W2Wx_gUMygC&pg=PA288&dq=fused+deposition+modeling&cd=10#v=onepage&q=fused%20deposition%20modeling&f=false>
- [24] TECH, Inc. *Fused Deposition Modeling (FDM)* [on-line]. Vydáno: 2007, [cit. 2010-4-30]. Dostupné z: <<http://www.techok.com/fuse-deposition-modeling.html>>
- [25] CUSTOMPART.NET. *Fused Deposition Modeling (FDM)* [on-line]. Vydáno: 2009, [cit. 2010-4-30]. Dostupné z: <<http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>>
- [26] BIBA. *Rapid Prototyping Group FDM* [on-line]. Vydáno: 6.3.2001, [cit. 2010-4-30]. Dostupné z: <<http://www.ppc.biba.uni-bremen.de/projects/rp/fdm.html>>
- [27] CHEE, Kai Chua, KAH, Fai Leong, CHU, Sing Lim. *Rapid prototyping: principles and applications* [on-line]. Vydáno: 2003, [cit. 2010-4-30]. Dostupné z: <<http://books.google.cz/books?id=hpNT01xw4EEC&pg=PA124&dq=fused+deposition+modeling&cd=1#v=onepage&q=fused%20deposition%20modeling&f=false>>
- [28] ARPTECH. *FDM services from arptech* [on-line]. Vydáno: 2004, [cit. 2010-4-30]. Dostupné z: <<http://www.arptech.com.au/services/fdmsrv.htm>>
- [29] Wikipedia. *Fused deposition modeling* [on-line]. Vydáno: 28.3.2010, [cit. 2010-4-30]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling>
- [30] CUSTOMPARTNER.COM. *Laminated Object Manufacturing (LOM)* [on-line]. Vydáno: 2009, [cit. 2010-5-1]. Dostupné z: <<http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>>
- [31] NAVRÁTIL, Robert. *Rapid prototyping* [on-line]. Vydáno: leden 2000, [cit. 2010-5-1]. Dostupné z: <<http://robo.hyperlink.cz/rapid/main07.html>>

- [32] MM Průmyslové spektrum. *Nekonvenční metody obrábění 10.díl* [on-line]. Vydáno: 17.12.2008, [cit. 2010-5-1]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil>>
- [33] HAGUE, R.J.M., REEVES, P.E., *Rapid prototyping, Tooling and Manufacturing*. Rapra technology Ltd., 2000. 107s. ISSN 0889-3144.
- [34] MÜLLER, B. Rychlá výroba odlitků otevírá nové možnosti použití. *Slévárství*. 2008. roč. 56, č. 1-2, s. 34-37.
- [35] CHUA, C.K., LEONG, K.F., LIM, C.S., *Rapid prototyping: principles and applications*. 2.nd Edition: World Scientific, 2003. 448s. ISBN 981-238-117-1.
- [36] NAVRÁTIL, Robert. *Rapid prototyping* [on-line]. Vydáno: leden 2000, [cit. 2010-5-1]. Dostupné z: <<http://robo.hyperlink.cz/rapid/main08.html>>
- [37] STEREOLOGRAPHY.COM. Solid ground curing [on-line]. Vydáno: 2002, [cit. 2010-5-1]. Dostupné z: <<http://knowledge.stereolithography.com/activekb/questions/12/Solid+Ground+Curing>>
- [38] MIT. *Three Dimensional Printing* [on-line]. Vydáno: 28.6.2000, [cit. 2010-5-1]. Dostupné z: <<http://www.mit.edu/~tdp/whatis3dp.html>>
- [39] CUSTOMPART.NET. *3D Printing* [on-line]. Vydáno: 2009, [cit. 2010-5-1]. Dostupné z: <<http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>>
- [40] ARPTECH. *3DP services from Arptech* [on-line]. Vydáno: 2004, [cit. 2010-5-1]. Dostupné z: <<http://www.arptech.com.au/services/3dpsrv.htm>>
- [41] PROTOFACTURING. *Gallery* [on-line]. Vydáno: 2009, [cit. 2010-5-10]. Dostupné z: <<http://www.protofacturing.com/Gallery.aspx>>
- [42] ZCORPORATION. Materials Options [on-line]. Vydáno: 2007, [cit. 2010-5-10]. Dostupné z: <<http://www.zcorp.com/en/Products/3D-Printers/Material-Options/spage.aspx>>
- [43] WIMPENNY, D.I. Použití technologie Rapid Prototyping v oblasti přesného lití. *Slévárství*. 2005. roč. 48, č. 1, s. 29-34.
- [44] ENGINEERSHANDBOOK.COM. *DSPC* [on-line]. Vydáno: 2006, [cit. 2010-5-10]. Dostupné z: <<http://www.engineershandbook.com/RapidPrototyping/dspcrt.htm>>
- [45] Soligen. *From art to part in 90 days* [on-line]. Vydáno: 1997, [cit. 2010-5-10]. Dostupné z: <<http://www.soligen.com/articles/art2part/art2part.shtml>>
- [46] SANDIA. *Laser Engineered Net Shaping* [on-line]. Vydáno: 2010, [cit. 2010-5-10]. Dostupné z: <<http://www.sandia.gov/mst/technologies/net-shaping.html>>
- [47] CASTLE ISLAND. *Laser Powder Forming* [on-line]. Vydáno: 3.7.2008, [cit. 2010-5-10]. Dostupné z: <<http://www.additive3d.com/lens.htm>>
- [48] DMLS. Direct Metal Laser Sintering [on-line]. Vydáno: 2007, [cit. 2010-5-22]. Dostupné z: <<http://www.dmls.cz/>>

- [49] MMSPEKTRUM. *Rapid Manufacturing technologií ProMetal* [on-line]. Vydáno: 2003, [cit. 2010-5-22]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/rapid-manufacturing-technologie-prometal>>
- [50] CASTLE ISLAND. Plastic or Polymer Parts [on-line]. Vydáno: 27.7.2005, [cit. 2010-5-23]. Dostupné z: <http://www.additive3d.com/tl_20.htm>
- [51] WOHLERSASSOCIATES. *Methods of Rapid Tooling Worldwide* [on-line]. Vydáno: 2000, [cit. 2010-5-23]. Dostupné z: <<http://www.wohlersassociates.com/Oct00MMT.htm>>
- [52] LERNER, Y.S., RAO, P.N., KOUZNETSOV, V.E. New trends in rapid prototyping and rapid manufacturing applications in metal casting. *Foundry Trade Journal*. October 2004. Volume 178, No.3618, s.336-343.
- [53] HERMAN, A. *Lití na vytavitelný model* [on-line]. Vydáno: 2010, [cit. 2010-5-23]. Dostupné z: <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>
- [54] Promet Foundry. *Lost Foam – výroba odlitků metodou spalitelného modelu* [on-line]. Vydáno: 2001, [cit. 2010-5-24]. Dostupné z: <<http://www.streamtech.tv/video-108-lost-foam-vyroba-odlitku-metodou-spalitelneho-modelu.htm>>
- [55] American Foundry Society. *Lost Foam Casting* [on-line]. Vydáno: 2004, [cit. 2010-5-24]. Dostupné z: <http://www.sfsa.org/tutorials/eng_block/GMBlock_13.htm>
- [56] EOS. *Primecast 101 Polystyrene* [on-line]. Vydáno: 2008, [cit. 2010-5-24]. Dostupné z: <<http://www.eos.info/en/products/materials/materials-for-plastic-systems/primecast-101.html>>