

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SOUČASNÉ TRENDY VE VÝROBĚ TRVALÝCH MODELŮ Z PROGRESIVNÍCH MATERIÁLŮ

**ACTUAL TRENDS IN MANUFACTURE OF PERMANENT PATTERNS MADE OF
PROGRESSIVE MATERIALS**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Michal Štokman

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc

ABSTRAKT

Rapid Prototyping je důležitou součástí moderního odvětví slévárenství. Cílem této bakalářské práce je vytvoření přehledu jednotlivých metod RP pro výrobu trvalých modelů a pískových forem, jejich uplatnění při rychlé výrobě prototypů.

Klíčová slova

Rychlé Prototypování, Slévárenství, Trvalý model

ABSTRACT

Rapid Prototyping is an important part of modern foundry industry. The aim of this thesis is to create an overview of different methods for making permanent RP models and sand molds, as applied to rapid prototyping.

Key words

Rapid Prototyping, Foundry industry, Permanent model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠTOKMAN, Michal. *Současné trendy ve výrobě trvalých modelů z progresivních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 37 s., Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Současné trendy ve výrobě trvalých modelů z progresivních materiálů vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 25. 5. 2012

.....
Michal Štokman

Poděkování

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

OBSAH

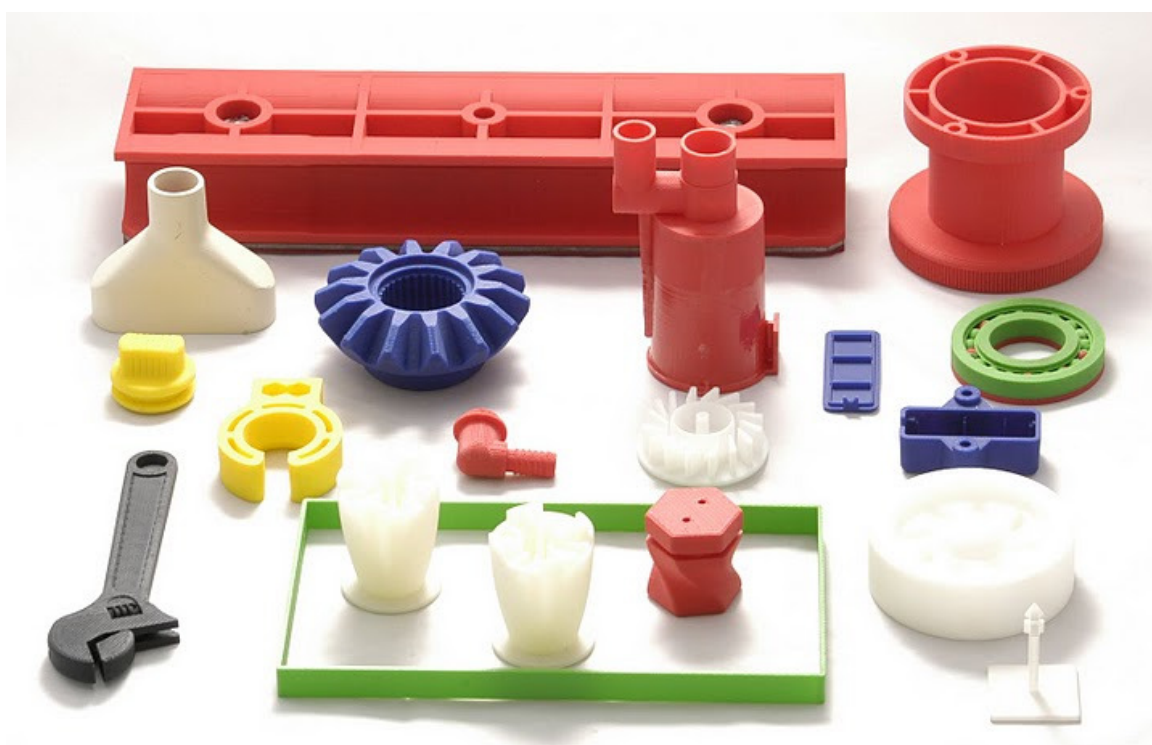
Abstrakt	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
Úvod	8
1 Rapid prototyping.....	9
2 Proces výroby modelu	10
3 Přehled metod RP pro výrobu trvalých modelů	11
3.1 Stereolitografie (SLA)	11
3.1.1 Výhody a nevýhody metody SLA.....	12
3.2 Selective Laser Sintering (SLS).....	13
3.3 Laminated Object Manufacturing (LOM)	15
3.4 Fused Deposition Modeling (FDM)	16
3.5 Multiphase Jet Solidification (MJS)	17
3.6 Three - Dimensional Printing (3DP)	18
3.7 Solid Ground Curing (SGC).....	19
3.8 Model Maker 3D Plotting	20
3.9 Ballistic Particle Manufacturing (BPM)	20
3.10 ProMetal 3D Printing	22
3.11 Multi - Jet Modeling	23
3.12 Direct Metal Laser Sintering (DMLS).....	24
3.13 Electron Beam Melting Proces (EBM).....	25
4 Ostatní Technologie RP	27
4.1 Solid Creation System (SCS).....	27
4.2 Solid Object Ultraviolet Laser Plotting (SOUP)	27
4.3 Computer-Operated Laser Active Modeling	27
4.4 Masking and Depositing (MD*)	27
4.5 Shape Melting.....	27
4.6 Design - Controled Automated Fabrication (DESCAF).....	27
5 Využití metod RP pro Lití do pískových Forem.....	28
5.1 Nepřímá výroba forem	29
5.2 Přímá výroba forem	30
6 Závěr.....	32
Seznam použitých zdrojů	33
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	35
Seznam obrázků.....	36
Přílohy	37

ÚVOD

V současné době jsou kladeny vysoké nároky na výrobu, vývoj a kvalitu součástí. Rychlost, kvalita a nízké náklady jsou požadavky, které jsou dnes kladeny na výrobu ve strojírenském průmyslu a v dalších odvětvích.

Principem technologie Rapid Prototyping je výroba prototypové součásti v co nejkratší době a dosáhnutí co nejlepší kvality. Z důvodu vysokých nároků na odlitky se ve slévárenství stále více využívají některé metody RP. Tyto technologie nám výrazně sníží dobu od zadání zakázky od zákazníka, až po finální produkt. Takto vytvořený 3D model má znaky nejvyšší kvality, který by nebylo možno, nebo jen s velkými obtížemi vyrobit běžnými technologiemi.

Rapid prototyping má uplatnění především v oblasti lití a to na vytavitelný model, vypařitelný model, zhotovení modelu pro formování do pískových forem nebo vytvoření pískové formy přímo technologií RP.

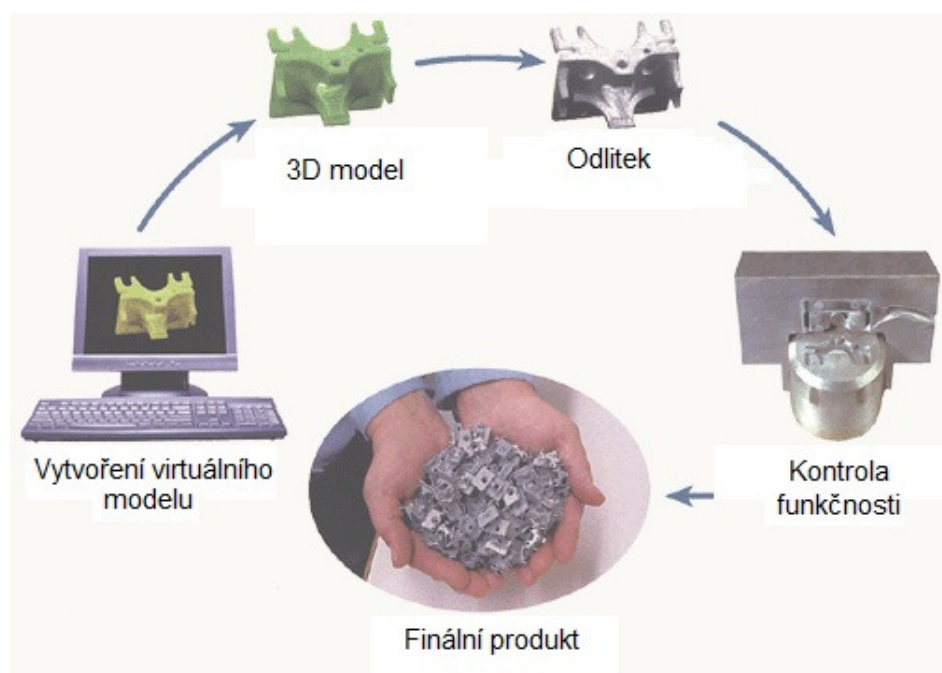


Obr. 1: Využití technologie Rapid Prototyping [16]

1 RAPID PROTOTYPING

Rapid prototyping (RP) je soubor technologií při výrobě prototypů, modelů, nástrojů, prototypových forem, atd. Počátek vývoje se datuje již od osmdesátých let, kdy vznikla jedna z prvních metod stereolitografie. V současnosti tvorba modelů a prototypů směřuje zvláště do oblasti výroby nástrojů a forem. Metody rapid prototyping se také využívají v oblasti konstruování a to v případě ověřování vlastností budoucího výrobku. V mnoha případech se výrobky či modely zhotovené pomocí metod RP používají k simulacím nebo zkouškám namáhání, obtékání atd. Metody RP přispěly ke zdokonalení softwarových a hardwarových technologií, které umožní vyžít celý vývojový proces výrobku na virtuálním modelu přímo v CAD systému. Ze zkušeností současných konstruktérů a designérů je lepší pracovat s fyzickým modelem, kde se dá snadněji upravovat design, odstraňovat chyby, kontrolovat smontovatelnost, opravitelnost nebo kontrolovat kompatibilitu s ostatními konstrukčními prvky. Všechny tyto výhody fyzického modelu mají v konečném důsledku za následek zrychlení celého vývojového procesu výrobku. Výroba modelů a prototypů konvenčními metodami je velice zdoluhavá a nákladná, proto se většinou volí technologie RP, která je rychlá a umožňuje přímé spojení s vývojovým prostředím CAD/CAM systémů.

Výhody metod RP jsou využity v automobilovém, leteckém a elektrotechnickém průmyslu, kde dochází ke zkrácení vývojových časů, snížení nákladů a zvýšení kvality konečného produktu. Při aplikaci ve vývoji montážních celků metod RP se dosahují největší rozdíly v ušetřeném čase. V kombinaci s metodami přesného lití kovů se dosahuje ve slévárenství rychlejší, levnější a kvalitnější výroby modelů a prototypů. [1] [2] [3]



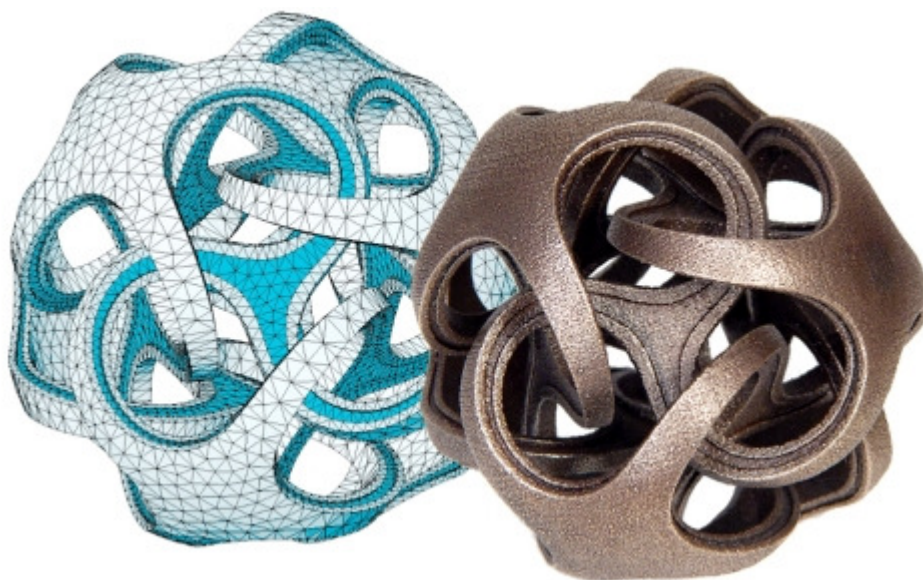
Obr. 2: Výrobní proces technologií RP [1]

2 PROCES VÝROBY MODELU

Výrobní proces začíná u návrhu virtuálního modelu a jeho následný převod do formátu STL. Model STL je nutno upravit pro potřeby tiskárny a metody, kterou je prototyp zhotovován. Provádí se kontrola STL souboru, rozdělení modelu na jednotlivé prvky, generování vrstev, podpor a drah nástroje. Formát STL představuje 3D model jehož povrch je tvořen sítí trojúhelníků, která je v závislosti na tvaru a přesnosti hustější více nebo méně. Takto převedený a zkontrolovaný model je rozdělen dle technologie na jednotlivé vrstvy, které jsou tvořeny jak samotným modelem, tak podporami nutnými k vytvoření samotného výrobku. V závislosti na přesnosti a drsnosti povrchu se volí tloušťky vrstev, ve kterých se bude výrobek zhotovovat.

Poté je model zhotoven za pomoci metod 3D tisku, které budou popsány později. Tento proces je plně automatizovaný a časově náročný. Výroba modelu může trvat až desítky hodin v závislosti na složitosti modelu, nároků na kvalitu a použité technologii.

Konečnou fází jsou manuální operace jako odstranění podpor, které je prováděno ručně nebo rozpouštěno v roztocích, broušení, leštění, nátěry atd. [1] [2] [3]



Obr. 3: Virtuální 3D Model a hotový model [3]

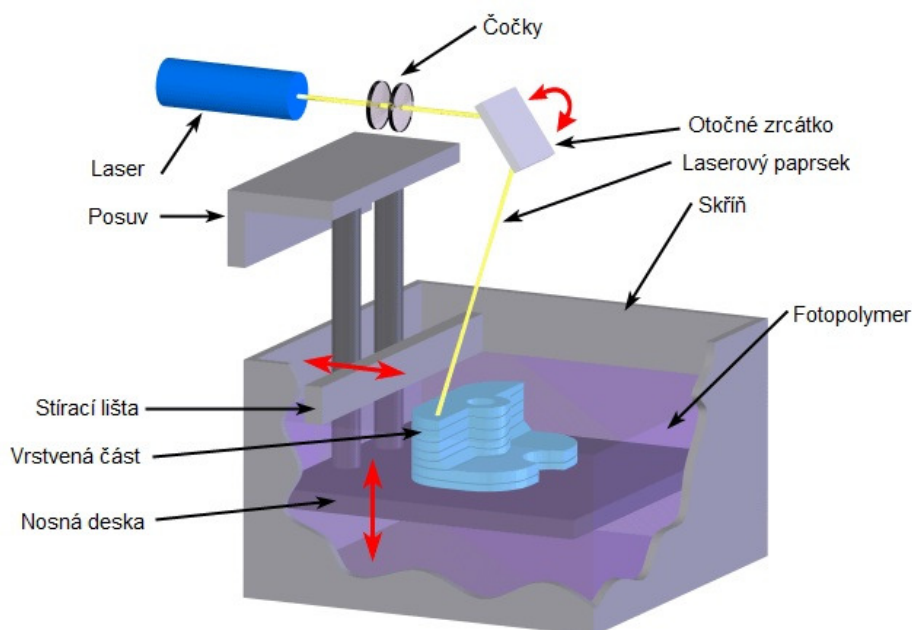
3 PŘEHLED METOD RP PRO VÝROBU TRVALÝCH MODELŮ

3.1 Stereolitografie (SLA)

Stereolitografie je nejstarší z technologií RP, která vytváří model postupným vytvrzováním jednotlivých vrstev fotopolymeru (plastické hmoty citlivé na světlo) pomocí UV laseru, který na základě dat přicházejících z počítače zaměřován optickou soustavou. Tato technologie vyniká vysokou přesností a poměrně širokou škálou použitelných materiálů a také lze vytvářet velice miniaturní objekty, funkční prvky, otvory atd. Vytvořený model je možné použít nejen k vizuální kontrole, ale v některých případech také k funkčnímu zkoušení a také je lze v některých případech použít jako formy pro lití.

SLA stroj je složen ze tří hlavních částí: pracovní komora, opticko-laserová soustava a řídicí jednotka. V pracovní komoře je umístěna nádoba s příslušným modelovacím materiálem, ve které se ve směru osy Z posouvá pracovní stůl. Opticko-laserový systém se skládá z pevnolátkového nebo plynného laseru, čoček, soustavy zrcadel, které slouží k nasměrování laserového paprsku. Řídicí jednotka je poslední z hlavních částí, která ovládá všechny komponenty stroje.

Princip tvoření stereolitografického modelu je postupné vytvrzování jednotlivých vrstev pryskyřice za pomoci laserového paprsku. Před samotným vykreslováním je hladina pryskyřice zarovnána za pomoci nože, aby byla zachována tloušťka vrstvy. Tento proces je opakován až do doby, kdy je model dokončen. Poté je model zbaven podpor, které slouží jako pomocný materiál k vytvoření požadovaného modelu a má takové vlastnosti, aby se dal lehce oddělit od výrobku mechanicky nebo chemicky. Konečný výrobek se dále brousí, lakuje, leští atd., a to podle účelu použití. [1] [2] [3]



Obr. 4: Schéma stereolitografie [17]

3.1.1 Výhody a nevýhody metody SLA

Výhody technologie SLA:

- Masivní materiál
- Dobrá povrchová drsnost
- Vysoká přesnost
- Rychlost výroby
- Pevnost
- Odolnost vůči vlhkosti
- Dobrá obrobitelnost
- Odolnost vůči teplotě

Nevýhody technologie SLA:

- Uzavřené objemy
- Křehké díly
- Viditelné krokování vrstev
- Limitované materiály



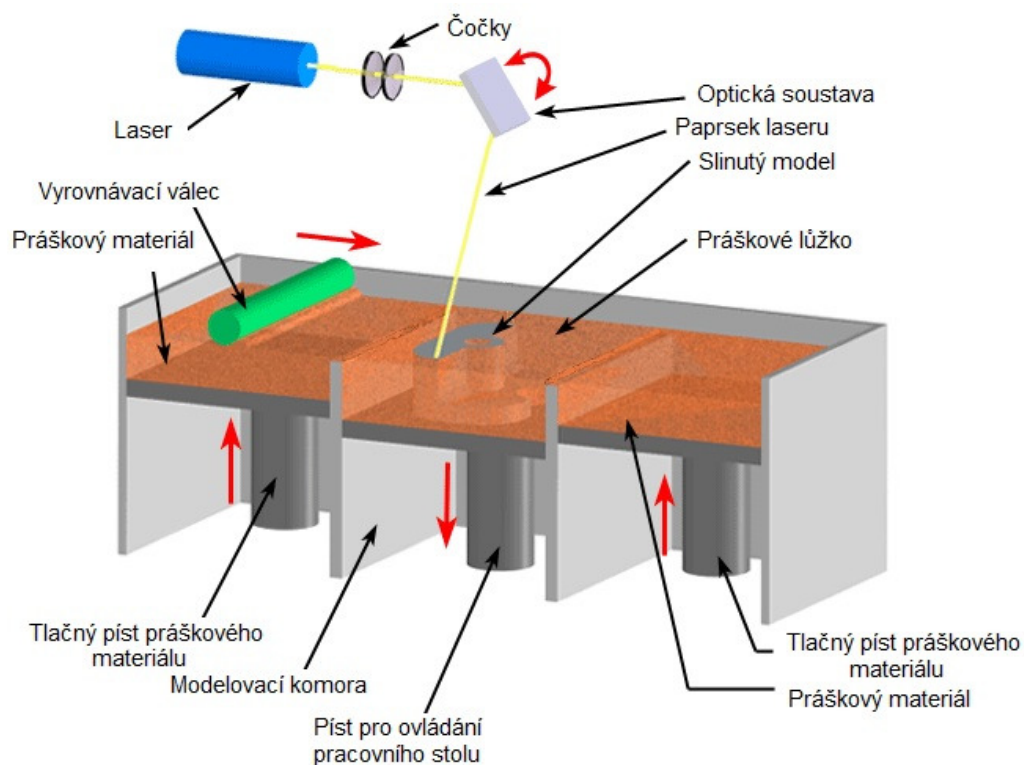
Obr. 5: Modely zhotovené technologií SLA [2]

3.2 Selective Laser Sintering (SLS)

Metoda Selective Laser Sintering (SLS) pracuje na principu spékání přídavného materiálu pomocí laseru. Tento systém byl vyvinut v Americe na univerzitě v Austinu a patentován byl v roce 1989.

Jako modelový materiál se používá kovový prášek, díky kterému vznikají velice pevné modely. Tato metoda umožňuje využití široké škály práškových materiálů a jejich následné vytvrzování laserem v ochranné CO₂ atmosféře. Používají se nylon, sklo, nástrojová a nerezová ocel, bronz, sklo, titanové slitiny a speciální kompozity. Tato metoda je velice podobná SLA metodě, liší si jen použitím modelovacích materiálů a možnost tisknout bez podpor.

Díly vznikají nanášením, a následným tavením jednotlivých vrstev modelového materiálu za pomoci laseru. V pracovní komoře probíhá samotný tavící proces vrstvu po vrstvě a po každém kroku je nanесena a následně zažehlena vrstva prášku, která se následně spéká. Jelikož se při této metodě nepoužívá přídavný materiál pro tvorbu podpor, výsledný model je zcela hotov a není potřeba dalšího procesu na odstranění přídavného materiálu. [1] [2] [3] [7]



Obr. 6: Schéma technologie SLS [7]

Zařízení pro zhotovené 3D modelů metodou SLS jsou rozlišovány podle použitého modelovacího materiálu. Nelze tedy použít pro stejné zařízení jakýkoliv typ práškového materiálu. Jejich vytvrzení si vyžaduje výrazně odlišné podmínky a podle toho rozlišujeme jednotlivé metody této technologie:

- **Laser - Sintering Plastic:** součásti jsou vyráběny slinováním plastických materiálů, jako je nylon, z něhož je model vyroben dosahuje velmi dobré tvrdosti, houževnatosti a teplotní odolnosti.
- **Laser - Sintering Metal:** spékání speciálních kovových prášků, hustota hotového modelu je 60% teoretické hodnoty. Tyto modely se vyznačují vysokou pevností a mechanickou odolností.
- **Laser - Sintering Formsand:** pro spékání je používán upravený slévárenský písek.
- **Laser - Sintering Ceramic:** jako modelovací materiál je použit keramický prášek, který je spojovaný pomocí tekutého pojiva.
- **Laser - Micro Sintering:** modely jsou vyráběny slinováním wolframového prášku o velmi malé zrnitosti. Výsledný model se vyznačuje velice malou drsností povrchu.
- **3-D Laser Cladding:** jako modelovací materiál je použit kovový prášek, který je přímo přiváděn k laserovému paprsku v místě spékání. Používají se titanové, niklové, kobaltové a hliníkové slitiny. Konečný model má srovnatelné vlastnosti jako součásti vyráběné konvenčními metodami.



Obr. 7: Model zhotovený metodou Laser - Sintering Metal [22]



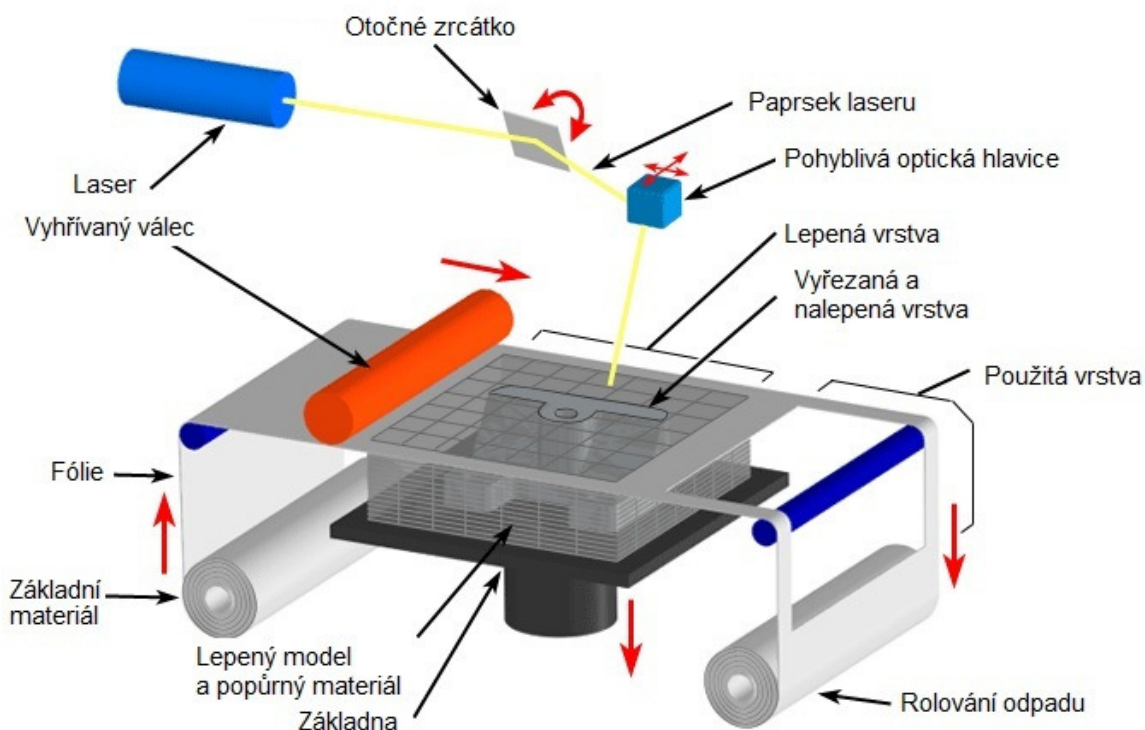
Obr. 8: Model zhotovený metodou Laser - Sintering Plastic [22]

3.3 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Metoda Laminated object manufacturing pracuje na principu vrstvení lepidivého materiálu, nejčastěji to jsou tabulkové fólie z papíru, nylonu nebo polyesteru. Tuto metodu 3D tisku vyvinula americká společnost Helysis Inc. v roce 1985.

Šířka vrstvy je rovna šířce přilepované fólie. Proces řezání zajišťuje laser nebo ořezávací nůž. Řezací hlava vyřeže požadovaný profil a tak rozdělí celou tabuli na dvě části, kde první představuje vrstvu modelu a druhá podpůrnou vrstvu. Podpůrné vrstvy jsou v požadovaných místech modelu rozříznuty tak, aby se po dokončení snadno součást vyjmula. Po dokončení jedné vrstvy se základní deska sníží o šířku dané vrstvy a následně se nanáší vrstva další.

Výhodou potom je vysoká přesnost vyrobených modelů, možnost výroby větších rozměrů, a při výrobě nevznikají žádné toxické látky. Nevýhodou je problematika při zhotovení tenkostěnných modelů, velké množství odpadu, povrch je nutno opracovat ručně a soudržnost celého modelu je dána kvalitou lepidla, které jednotlivé vrstvy spojuje. Celkově se vlastnosti modelu zhotovené technologií LOM podobají modelu vyrobeného ze dřeva. Použití takových modelů je vhodné pouze pro prezentační účely. [1] [3] [6]



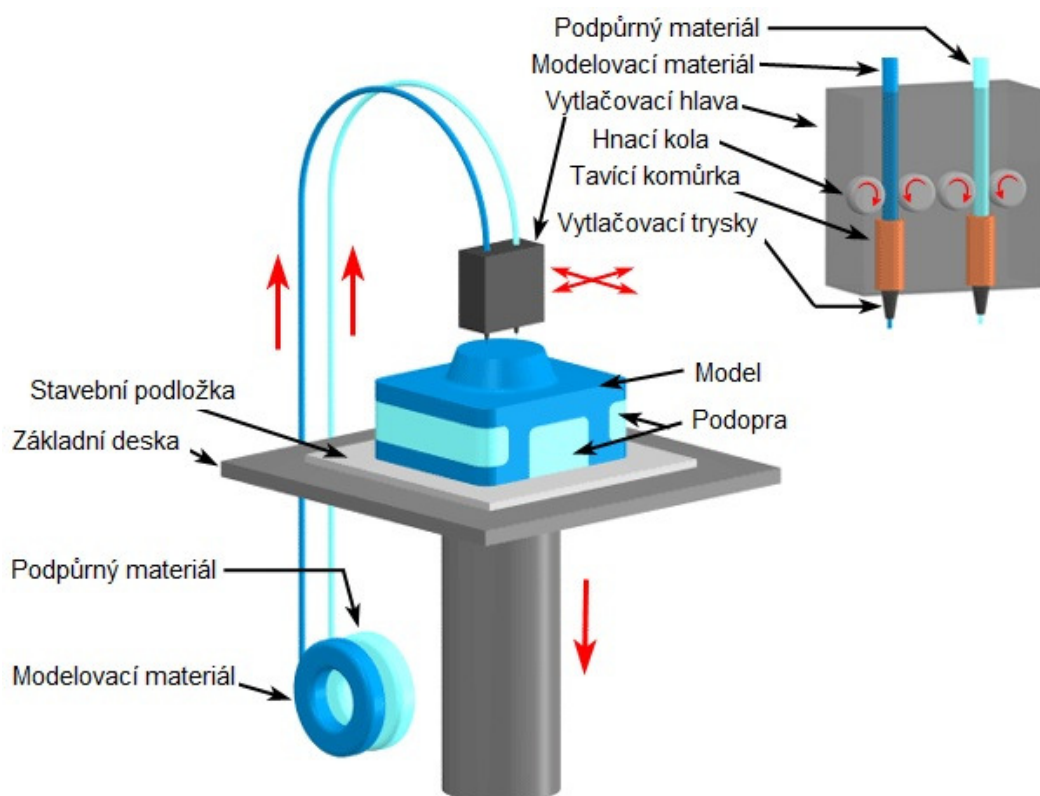
Obr. 9: Schéma technologie LOM [20]

3.4 Fused Deposition Modeling (FDM)

Tato metoda RP pracuje na principu vytlačování pevné látky za pomoci trysky a byla vyvinuta a patentována americkou firmou Stratasys, Inc. v roce 1988. Tato metoda patří mezi nejpoužívanější ze všech RP metod 3D tisku. Jedná se o metodu velice tichou, jednoduchou, pomocí které vznikají prototypy s vysokou přesností.

Tisková tryska se skládá z tavící komůrky a trysky. Materiál se v tavící komůrce taví na teplotu tavení a následně je vytlačován pomocí trysky v tenkém vlákně na podložku, kde okamžitě tuhne. Tisková hlava se pohybuje v souřadnicích x a y po vygenerovaných drahách, které byly předem zpracovány pomocí příslušného softwaru. Po dokončení jedné vrstvy se podložka sníží o výšku vrstvy a celý proces se opakuje až po dokončení součásti. Při samotném procesu tisku 3D modelu jsou použity dvě trysky pro modelovací a podpurný materiál, který slouží ke zpevnění celé konstrukce a umožňuje její zhotovení. Tento podpurný materiál je po dokončení odstraněn mechanicky nebo chemicky. Jako modelovací materiál se používají termoplasty, nejčastěji ABS, polyetylen, polykarbonát, polyamid, polypropylen a líčí vosky. Výsledný model má dobré mechanické vlastnosti a odolávají teplotě až 90 °C.

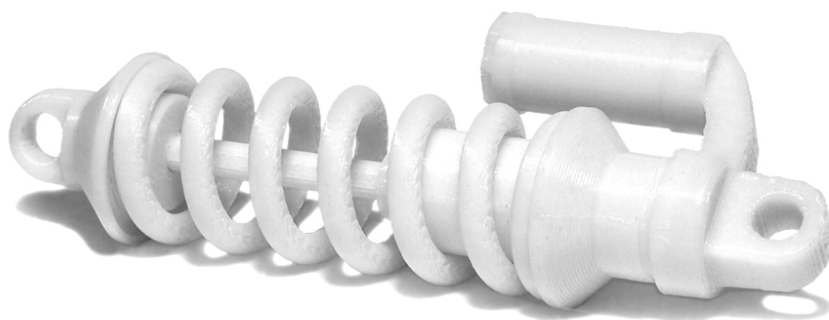
Metoda FDM a použité modelovací materiály umožňují tisk rozměrných a přesných modelů, které jsou dobře obrobitelné a dají se snadno povrchově upravit. Jednotlivé modely lze spojovat za pomoci lepení do velkých celků. Nevýhodou této metody je nutnost použití podpurného materiálu k zhotovení modelu. [1] [3] [6] [8]



Obr. 10: Schéma technologie FDM [18]

3.5 Multiphase Jet Solidification (MJS)

Technologie MJS pracuje na principu zahřátí modelového materiálu a jeho následné nanášení ve vrstvách tryskou. Modelový materiál je ve formě prášku, který je kovový, z keramiky nebo směsi kovů. Takový materiál je zahříván na tavicí teplotu a tryskou s pístovým systémem je vytlačován a nanášen postupně po vrstvách. Při styku s materiálem vytvářeného modelu vrstva okamžitě tuhne. Po dokončení vrstvy se pracovní stůl sníží o již dokončenou vrstvu a celý proces se opakuje až do dokončení modelu požadované geometrie. Princip technologie MJS je velice podobný technologii FDM. Lze vyrábět součásti z hliníku, ušlechtilých ocelí, siliciumkarbidu, titanu a jeho slitin. [6]



Obr. 11: Model vytvořený technologií MJS [6]

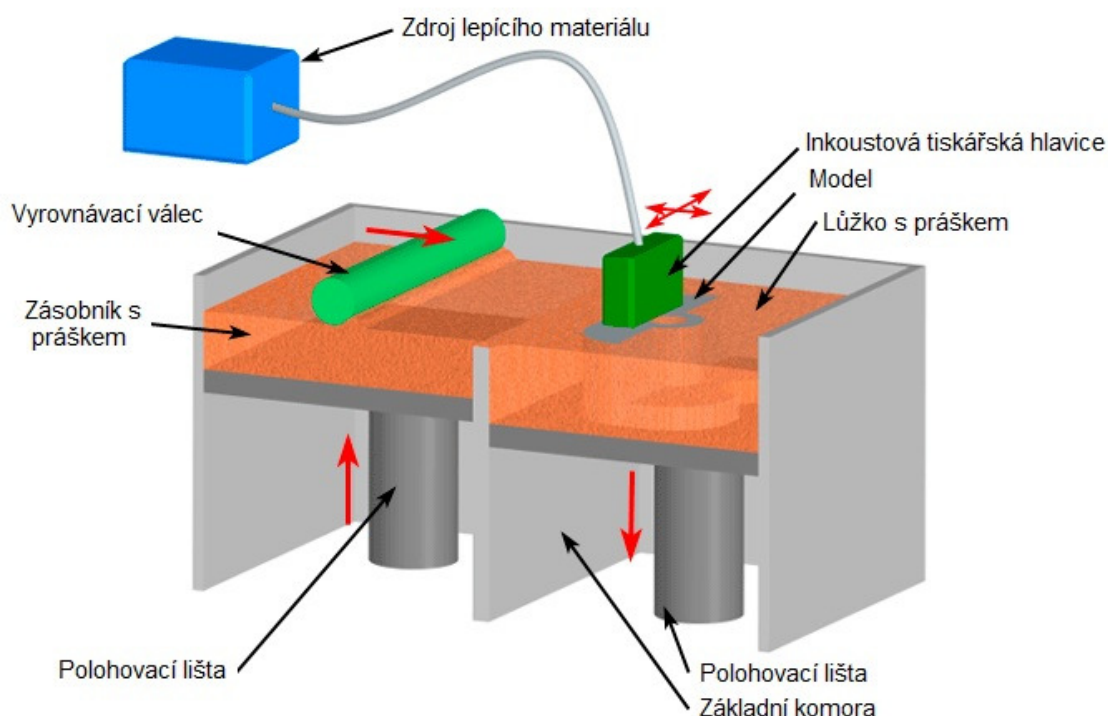


Obr. 12: Model vytvořený technologií FDM [6]

3.6 Three - Dimensional Printing (3DP)

Technologie Three - Dimensional Printing (3DP) byla vyvinuta v Massachusetts Institute of Technology v USA. Princip trojrozměrného tisku pro technologii 3DP spočívá v nanášení tenkých vrstev modelového materiálu. Tato technologie připomíná selektivní laserové slinování (SLS), kromě toho, že laser je nahrazen inkoustovou hlavou. Nedochází tedy k vytvrzování materiálu laserem. [6]

Vrstva je vytvořena za pomoci sypkého prášku a pojiva. Za pomoci inkoustových trysek se mísí pojivo s tvrdidlem, vícekanálová tryska vstříkne pojivo do práškové vrstvy v požadovaném tvaru a dochází k vytvoření vrstvy. Tento proces se opakuje až po dokončení finálního modelu. Modely zhotovené touto metodou mají relativně nízkou hustotu. Hustota hotového modelu je 60% teoretické hodnoty. Při procesu tisku se k pojivu přidává také tvrdidlo, aby se zamezilo poškození modelu při jeho další manipulaci a použití. [1] [6]

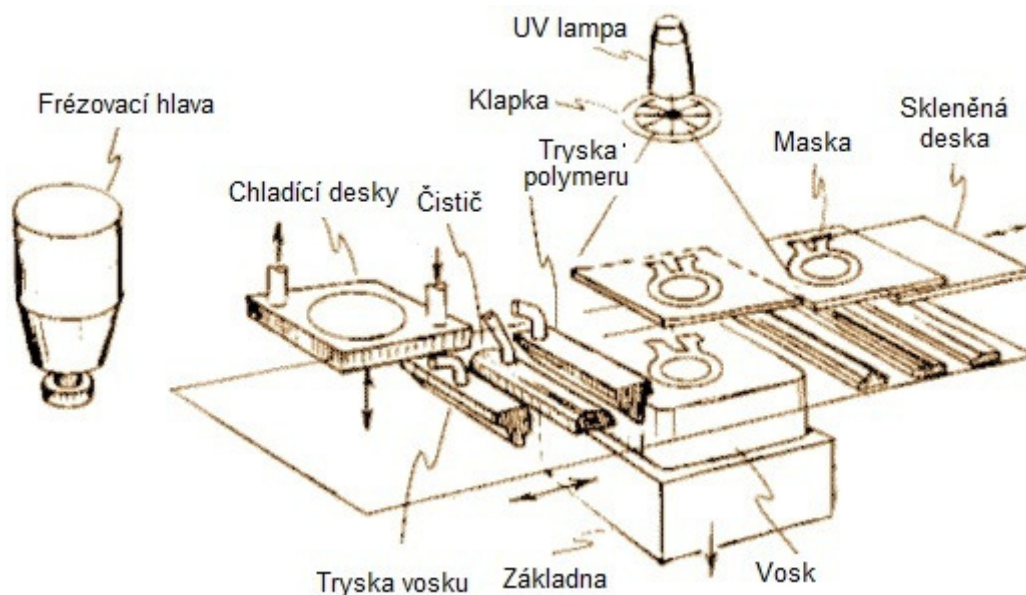


Obr. 13: Schéma technologie 3DP [19]

3.7 Solid Ground Curing (SGC)

Tato technologie byla vyvinuta izraelskou firmou Cubital Ltd. Solid Ground Curing funguje na principu vytvrditelného fotopolymeru. Tento systém využívá při vytváření modelu dvou materiálů. Jedním je modelový materiál, který vytváří tělo samotného modelu a druhým je podpurný materiál, který vytváří podpory kolem modelu, v dutinách, složitých geometrických tvarech atd. Jako modelový materiál je použita pryskyřice a jako podpurný materiál je použit vosk.

Při této metodě model vzniká tvorbou jednotlivých vrstev vytvořené náraz. Skleněná destička, na které je vyznačený tvar vytvářené vrstvy, je označována jako tzv „maska“. Přes tuto masku prochází ultrafialové světlo, které vytvrzuje fotocitlivý polymer. Osvícený fotopolymer ztvdne, zbytek se odsává pomocí sací hlavice a vzniklé prostory jsou vyplněny voskem, který má funkci podpory celé konstrukce modelu. Po vytvoření modelu se vosk tepelně nebo chemicky odstraní. Následuje opracování vytvořené vrstvy frézováním. Tím se připraví povrch pro nanesení další vrstvy tekutého fotopolymeru. Tento proces je velice výkonný, jelikož se celá vrstva vytvrzuje najednou a povrch je zároveň upravován frézováním. Tím se dosahuje vysoké přesnosti finálního modelu. Nevýhodou je velice nákladné zařízení, materiál a celkově složitost celého procesu. [3] [6]



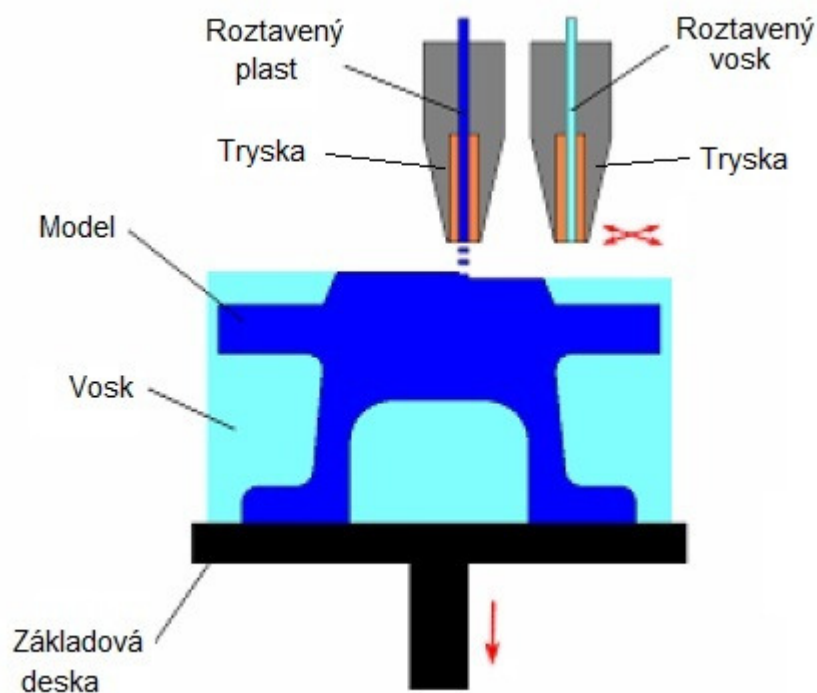
Obr. 14: Schéma technologie SGC [6]

3.8 Model Maker 3D Plotting

Metoda Model Maker 3D plotting využívá pro stavbu modelu termoplast a je založen na podobném principu, který je využíván u běžných inkoustových tiskáren.

Model je vytvářen nanášením velmi malých kapek termoplastu, které jsou vstřikovány pomocí tlakové hlavy na pracovní plochu, kde ihned tuhnou. Rychlost vstřikovací hlavy je 6000 až 10 000 kapek za sekundu. Model je vytvářen pomocí dvou tiskových hlav. Jedna nanáší roztavený plast a druhá podpurný materiál, kterým je vosk. Tento podpurný materiál je po dokončení modelu odstraněn v olejové lázni.

Výsledný model je velmi přesný. Přesnost je v setinách milimetru. Pomocí této technologie lze zhotovit poměrně malé modely. Větších modelů či sestav umožňuje lepení jednotlivých dílů nebo modelů pomocí lepidel. [3] [6]

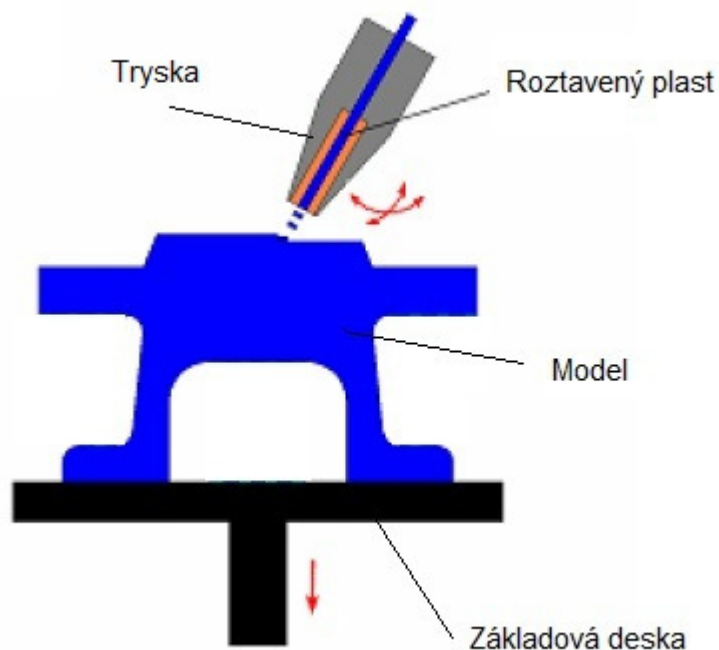


Obr. 15: Schéma technologie Model Maker 3D petting [6]

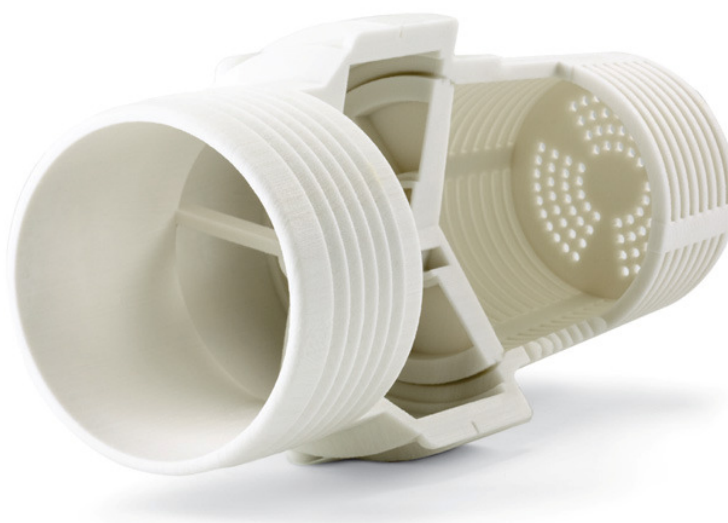
3.9 Ballistic Particle Manufacturing (BPM)

Technologie BPM pracuje na principu nanášení kapek termoplastu za pomoci jedné vstřikovací hlavy. Tuto technologii vynalezl v roce 1987 Bill Masters, který v roce 1988 založil společnost Perception Systems, Inc., později přejmenovanou na BPM Technology, Inc., který se zabývá vývojem BPM systému.

Zařízení pracuje na principu inkoustových tiskáren. Termoplast je v tekutém stavu nanášen pomocí trysky. Termoplast ve formě kapek nanášen na pracovní plochu, kde dochází k jeho vytvrzení ihned po dopadu. Cíleným nanášením dalších kapek pomocí trysky je vytvářen konečný trojrozměrný model. Trysková hlava má pět stupňů volnosti a modely lze vytvářet bez podpůrné konstrukce. [3] [6]



Obr. 16: Schéma technologie BPM [6]



Obr. 17: Příklady metody BPM

3.10 ProMetal 3D Printing

Princip metody je založen na slinování velmi jemných prášků. Technologii ProMetal 3D Printing vyvinu americká společnost Extrude Hone z Irwinu v Pennsylvánii.

Technologie ProMetal 3D Printing je založena na selektivním vrstveném inkoustovém tisku třírozměrných předmětů z ultrajemných kovových, keramických, cermetových a kompozitních prášků se speciálními pojivy. Technologie používá principu ink-jet počítačových tiskáren a tiskových hlav s vysokým rozlišením podle složitosti dílu. Model je vytvářen po vrstvách a jeho hustota je téměř 100% teoretické hustoty. Jelikož dochází ke slinování kovových prášků, výsledný model má totožné vlastnosti jako model vyrobený konvenční metodou ze stejného materiálu. Při tepelném zpracování dochází k vyhoření pojiva a slnutí kovových prášků na porézní strukturu, která se zpevňuje pronikáním kovu.

Nejmenší zařízení pro technologii ProMetal 3D printing je zařízení s označením R2, které dokáže vyrobit díl o velikosti 190 x 190 x 150 mm. Naopak největší možný model lze vyrobit na zařízení s označením R10. Model vytvořený na takovém zařízení má velikost 1000 x 500 x 250 mm a hmotnost až 50 kg. Pracovní prostor zařízení lze využít k současné výrobě až tisíce různých dílů v jednom nanášecím cyklu, který trvá 48 hodin.

Pro výrobu se využívají směsi prášků z kovových materiálů až po žárovevné slitiny, keramické materiály a cermety různého složení s patentovanými systémy pojiv. Hlavní předností procesu je jeho téměř neomezená flexibilita, rychlost a schopnost přímé výroby funkčních dílů, výroba dílů s komplikovanou vnější a vnitřní geometrií obtížně vyrobitelných obráběcími procesy při vysoké přesnosti výroby. [6] [10]



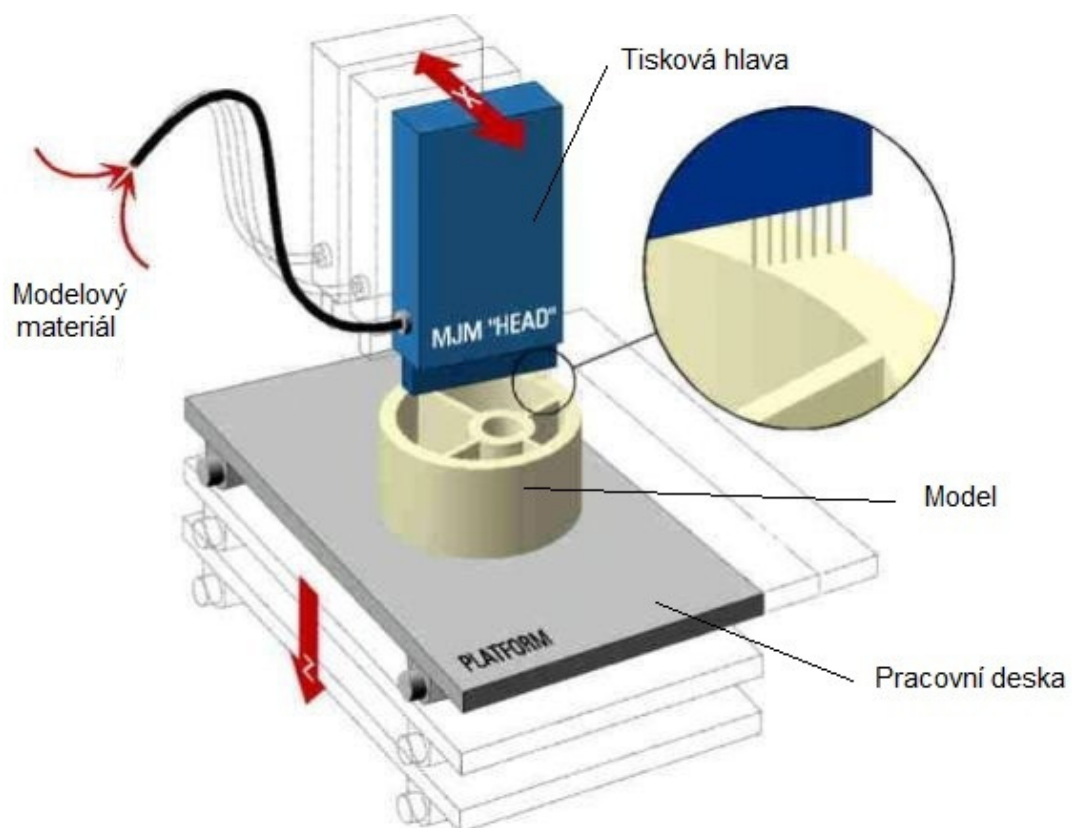
Obr. 18: Příklady metody ProMetal 3D Printing [10]

3.11 Multi - Jet Modeling

Princip metody je založený na nanášení jednotlivých vrstev termopolymery postupně na sebe pomocí speciální tiskové hlavy. Tato speciální tisková hlava může být opatřena až 350 tryskami uspořádaných rovnoběžně vedle sebe. Ovládání jednotlivých trysek je řízeno strojem a zvoleným programem.

Model se vytváří na speciální nosné desce. Systém je podobný jako u stereolitografie. Vrstva se nanáší v závislosti na šířce tiskové hlavy a modelu. Jestliže je model širší než tisková hlava, tak se pracovní deska posouvá tak aby se vytvořila celá požadovaná vrstva. Po dokončení vrstvy se pracovní deska posune o výšku vrstvy a celý cyklus se opakuje, dokud nevznikne kompletní model. Velký počet trysek zaručuje rychlé a rovnoměrné nanesení materiálu, který při kontaktu s již nanesenou vrstvou téměř okamžitě tuhne.

Mezi výhody patří použitý materiál pro stavbu modelu a velké množství trysek. Termopolymery jsou poměrně levné a díky velkému množství trysek je tato metoda velice rychlá. Provoz je možný v kancelářském prostředí z důvodu velice čistého provozu. Výsledné modely se vyznačují vysokou přesností, hladkým povrchem a tvarovou stálostí. Nevýhodou je malý výběr materiálů. [3] [6]



Obr. 19: Schéma metody MJM [6]



Obr. 20: Příklady metody MJM

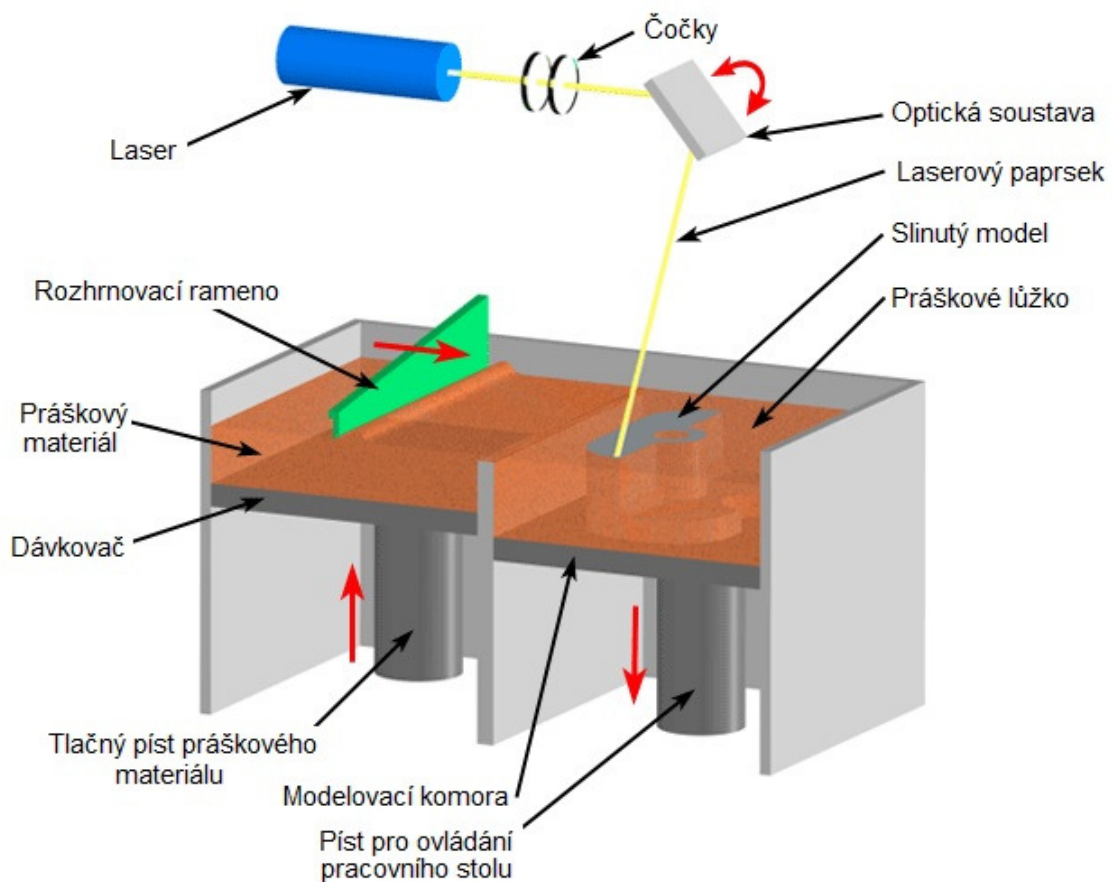
3.12 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Technologie DMLS je velice podobná metodě SLS. Modelový materiál ve formě kovového prášku je spékán za pomoci laseru. Ze zásobníku se přehrne vrstva prášku do pracovního prostoru a pomocí laseru je vytvrzena vrstva požadovaného tvaru. Pracovní stůl se sníží o výšku vrstvy, pomocí příhrnovacího ramena se přihrne další vrstva prášku ze zásobníku a celý proces se opakuje. Dokončovací operace finálního modelu se provádí běžnými technologiemi, jakou jsou frézování, vrtání, broušení atd.

Hlavní předností této technologie je možnost recyklace až 98 % nespotřebovaného prášku, výkonný laserový zdroj a široká škála použitelných materiálů (kovový prášek, titan, slitiny bronzu atd.). Naopak velkou nevýhodou je vysoká energetická a prostorová náročnost, nutnost dokončovacích operací na jiném stroji a nebezpečí rozšíření kovového prášku. [6] [11] [12]



Obr. 21: Příklady metody DMLS [21]



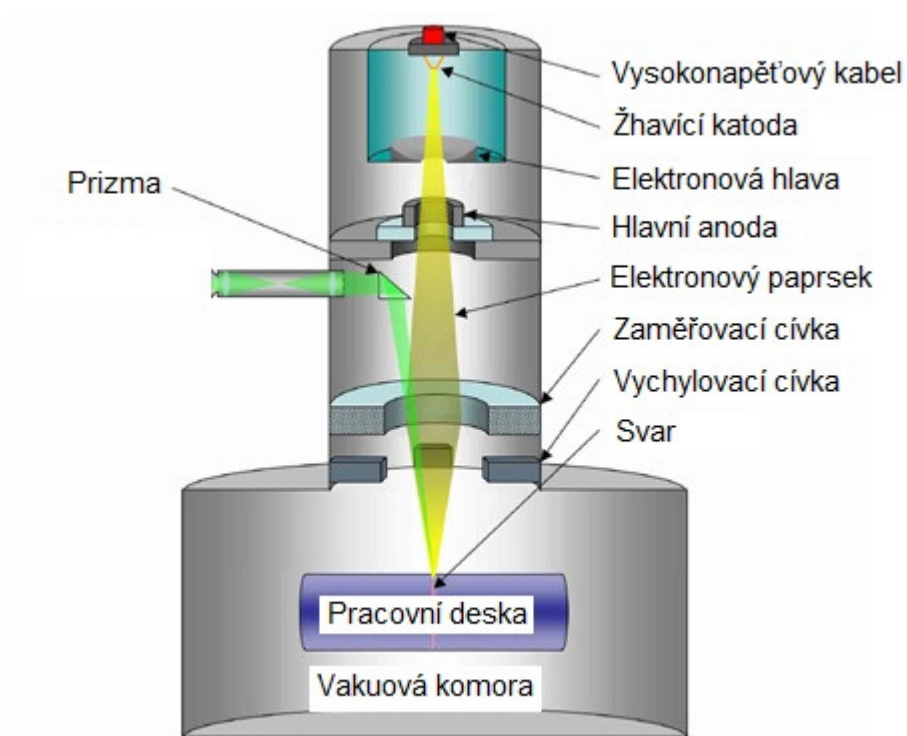
Obr. 22: Schéma technologie DMLS [21]

3.13 Electron Beam Melting Proces (EBM)

Elektron Beam Melting proces pracuje na principu slinování práškových materiálů podobně jako u metody SLS. Laser je nahrazen elektronovým paprskem. Tento způsob elektronového tavícího paprsku byl vynalezen na Chalmers Univerzitě ve Švédsku v roce 1990. Vyzařované elektrony mají vysokou kinetickou energii, která se uvolní při nárazu na kovový prášek a způsobí jeho tavení. Díky větší přiváděné energii je možno zpracovávat nástrojové oceli, legované oceli, hliník a jeho slitiny, slitiny titanu nebo čistý titan. Celá pracovní komora je umístěna v tlakové komoře s vakuem z důvodu zamezení oxidizování materiálu, ztráty energie a vychylování paprsku.

Na pracovní desku se rovnoměrně rozhrne prášek pomocí stěrky nebo vyrovnávacího válce. Elektronový paprsek nataví prášek a po vrstvách vzniká konečný model. Po zhotovení vrstvy se pracovní stůl posune dolů o tloušťku vrstvy, přihrne se rovnoměrná vrstva tavícího prášku a proces se opakuje do zhotovení požadovaného tvaru modelu. Neroztavený prášek slouží jako podpurná struktura při vytváření složitější součástí. Nevýhodou jsou vysoké provozní náklady. Naopak velkou výhodou je schopnost dosáhnout stejných

vlastností modelu jako při výrobě konvenčními metodami. Tato technologie se vyznačuje schopností vytvářet modely v mnohem kratší době než laserové technologie. [3] [13]



Obr. 23: Schéma technologie Elektron Beam Melting [3]



Obr. 24: Příklady metody Elektron Beam Melting [16]

4 OSTATNÍ TECHNOLOGIE RP

4.1 Solid Creation System (SCS)

Je výsledkem spolupráce japonských firem Sony Corporation a Japan Synthetic Rubber. Princip této technologie je podobný stereolitografii, hlavní rozdíl je ve velikosti vytvářených součástí. Technologií SCS lze vyrobit větší součásti. [6]

4.2 Solid Object Ultraviolet Laser Plotting (SOUP)

Byla vyvinuta japonskou firmou Mitsubishi Corporation a je prodávána společností CMET. Princip je téměř stejný jako u stereolitografie. Použitá pryskyřice má vysokou rozměrovou stálost, vynikající mechanické vlastnosti a nevyžaduje dotvrzení. [6]

4.3 Computer-Operated Laser Active Modeling

Byla vyvinuta japonskou firmou Mitsui Ship Building Company. Princip je opět velmi podobný stereolitografii. [6]

4.4 Masking and Depositing (MD*)

Byla vyvinuta při výzkumech na Carnegie Mellon University. Umožňuje vytvářet modely z některých kovů a jejich slitin. [6]

4.5 Shape Melting

Je technologie, jejíž výrobou a vývojem se zabývá společnost Babcock & Wilcox. Roztavený kov je nanášen pomocí elektrického oblouku po vrstvách a odlit do výsledné součásti. Použitým materiálem jsou slitiny na bázi niklu. Použití této technologie je téměř neomezeno tvarem i rozměrem součástí. [6]

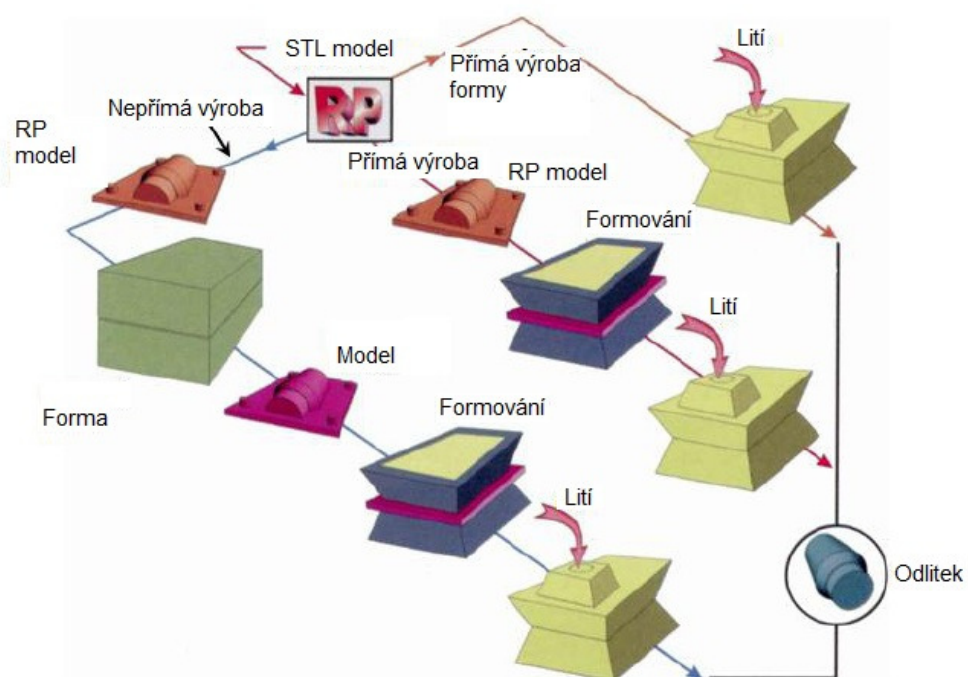
4.6 Design - Controlled Automated Fabrication (DESCAF)

Byla vyvinuta v roce 1986 společností Light Sculpting, Inc. Princip je zčásti podobný technologii SGC. Jako materiál je používán fotopolymer, který je vytvrzován působením UV záření přes masku. Z toho důvodu je celá vrstva vytvrzena najednou. [6]

5 VYUŽITÍ METOD RP PRO LITÍ DO PÍSKOVÝCH FOREM

V současné době jsou na kvalitu a složitost odlitků kladeny vysoké nároky a proto stále více pronikají metody rychlého prototypování do slévárenství. Kvalitní, tvarově složitý, přesný a často také vícedílný model je mnohdy velice složité vyrobit konvenčními metodami a při zavádění nového odlitku do výroby poměrně nákladná. Proto se dnes stále více využívá metod 3D tisku ke zhotovení master modelu nebo pískové formy. Účelem zhotovení modelu za pomoci metod RP ve slévárenství je zrychlení zavedení nového odlitku do výroby. Hlavními přednostmi využití metod RP je možnost kontroly výsledného tvaru nebo funkčnosti, navrhovaný model je možno v kterékoliv fázi vývoje snadno vyrobit, korigovat další vývojové fáze a v případě neexistující výkresové dokumentace lze pomocí scannerů vytvořit virtuální model. S vývojem metod RP je možno konečné licí formy dosáhnout několika způsoby. [14]

- **Nepřímá výroba forem:** Nejprve je vytvořen model pomocí některé z metod RP pomocí kterého je vytvořena forma pro vytvoření více modelů a následné vytvoření pískové formy. Z jednoho RP modelu lze vytvořit více odlitků. Patří zde tvorba modelů, jader, kompletních vtokových soustav, případně výroba forem na výrobu modelů
- **Přímá výroba forem:** Zhotovení formy probíhá přímo jednou z technologií RP. Jedná se o pískové formy nebo kovové formy pro tlakové lití.



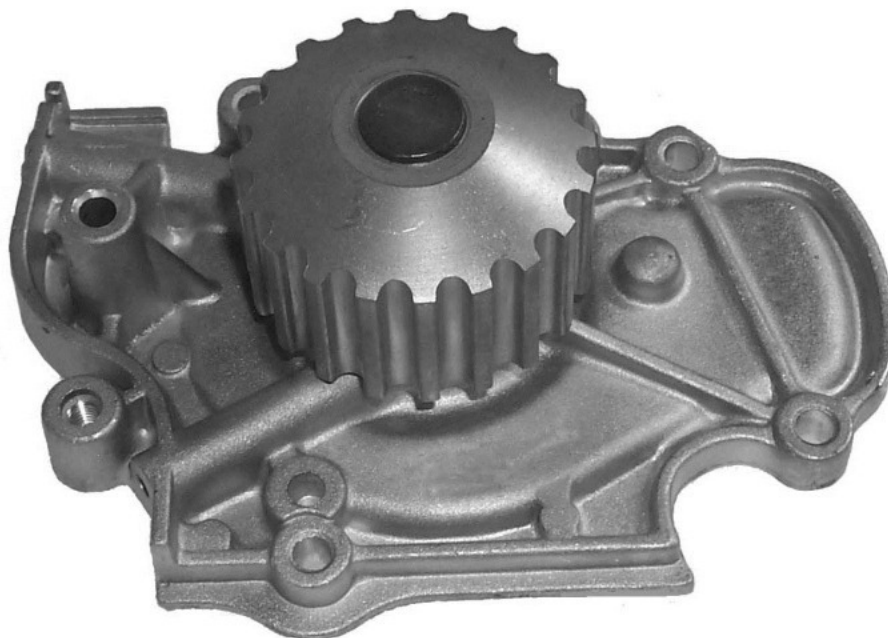
Obr. 25: Možnosti zhotovení pískové formy s využitím metod RP [14]

5.1 Nepřímá výroba forem

K rozvoji v této oblasti výroby forem s využitím Rapid Prototyping dochází od počátku vzniku metod rychlého prototypování. Při vzniku stereolitografie již měly modely vzniklé touto technologií své uplatnění ve slévárnictví při výrobě odlitků z konvenčních materiálů. Tehdy ještě funkční modely vytvořené touto metodou byly pouze v rovině teoretické, ale už tehdy se využívaly k vytváření forem.

Základem je zhotovení originálního modelu, nazýván také jako master model pomocí některé RP metod. Při návrhu modelu musíme mít jasnou představu o tom, na jaký typ formy a lití bude použit. Materiálů je široká škála a ne každý vyhovuje požadavkům pro tvorbu formy. Při formování do pískových forem se používá dělený model, který musí splňovat pevnostní a tvarové požadavky na výrobu formy. Podle sériovosti je vytvořena forma podle master modelu. Ty potom slouží k vytvoření stejného modelu pomocí vakuového lití.

V současné době neustále stoupá tvarová a jakostní náročnost na odlitek. Proto se stále více využívá metod RP pro zhotovené modelů pro formování do pískových forem. [14]



Obr. 26: Součást zhotovená litím do pískové formy při použití RP modelu [14]

5.2 Přímá výroba forem

Principem přímé metody výroby slévárenských forem pro lití je zhotovení takové formy přímo metodou RP. Vytvoření 3D modelu součásti tedy není potřeba. Tato metoda je využívána při výrobě pískových forem. Lze je tedy vyrobit pouze technologiemi RP, které pracují s práškovým modelovým materiálem.

Na takovou metodu je vhodná technologie SLS. Německá firma EOS za pomoci technologie SLS vyrábí pískové formy ze speciální křemičitého písku a je označena jako **DirectCast**. Na takovém zařízení je možno vyrobit kompletní pískové formy pro lití kovů pro malé série.

Další metodou, kterou je možno využít především pro lití neželezných kovů je technologie **ZCast®**. Tato technologie využívá RP technologii 3DP, pomocí které lze přímo tisknout formu nebo jádra ze speciálního písku.

Jako formovací materiál je použita materiál s označením Ceramics 5.2, což je křemičitan hlinitý potažený fenolovou pryskyřicí. Materiál je vhodný pro výrobu pískových jader a forem pro lití všech aplikací. Vzhledem k vysoké tepelné kapacitě a nízké teplotní roztažnost se tento keramický písek používá zejména při vysoké teplotě lití.

Další formovací materiál je Quartz 4.2 / Quartz 5.7. Je to křemičitý písek potažený fenolovou pryskyřicí. Materiál je vhodný k výrobě komplexních jader a pískových forem všech aplikací. [15]



Obr. 27: Součást zhotovená litím do pískové formy při využití DirectCast metody [15]



Obr. 28: Součást zhotovená litím do pískové formy při využití ZCast® metody [15]

6 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zpracovat přehled technologií Rapid prototyping použitých pro výrobu trvalých modelů pomocí starších i novějších a rozvíjejících se technologií.

V úvodu práce je zaměřeno na princip technologie RP a požadavky na charakteristiku modelu pro 3D zpracování dat. V první části jsou popsány technologie RP pro tvorbu modelů, modelových zařízení a pískových forem. V závěrečné části je popsána aplikace metod RP ve slévárenství. Jedná se o využití vytvořených modelů k zaformování do pískové formy nebo její kompletní vytvoření pomocí metod RP.

Technologie Rapid Prototyping se velice rychle rozvíjí v mnoha odvětví průmyslu a ne jen ve slévárenství. Značné využití metod RP je v letectví, kosmonautice, lékařství, automobilový průmysl, zlatnictví atd. Hlavním cílem je zhotovení modelu v co nejkratší době, dosažení nejlepší rozměrové přesnosti, dobré mechanické vlastnosti a minimální náklady. Tyto všechny vlastnosti dosahujeme pouze metodami RP, konvenčními metodami by nebylo možné splnit všechna tato kritéria. Rozmanitost tvarů, použitých materiálů a celková komplexnost technologií RP nelze nahradit běžnými technologiemi. Pořizovací náklady na technologie RP jsou velice vysoké, proto musíme vždy zvážit kompromis mezi vysokou pořizovací cenou zařízení a rychlého zavádění nových součástí do výroby ve velmi krátkém čase.

Nejstarší technologií RP je Stereolitografie. Její využití značně převyšuje ostatní metody z důvodu vysoké přesnosti výsledných modelů a širokou škálou použitelných materiálů. Tato technologie je ve slévárenství využívána k tvorbě trvalých modelů a při použití měkkých materiálů také jako netrvalé modely. Ostatní metody pracují na podobném principu jako Stereolitografie, odlišují se pouze použitými materiály, strukturou zařízení, optickou soustavou a použitím laseru. Tyto metody jsou využívány k tvorbě modelu, který dále slouží k tvorbě dalšího totožného modelu za pomoci lití, nebo je využit při formování pískové formy. Technologie RP co pracují s práškovým modelovým materiálem, jsou dnes využívány ke zhotovení přímo pískové formy. Takto vytvořené pískové formy se zhotovují pomocí technologie SLS. Aplikace technologií RP ve slévárenství umožňuje široké využití, neustále se technicky rozvíjí. Jeho využití v budoucnu bude čím dál častější.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1]...Rapid Prototyping, [online]. s. 49, [cit. 2012-05-15]. Dostupné z www: <http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/rp2_skripta1.pdf>.
- [2]...Nekonvenční metody obrábění 9. Díl, Ing. Jaroslav Řasa, CSc., Ing. Zuzana Kerečaninová, Ph.D., [online]. c2008 [cit. 2012-05-15] dostupný z www: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>>
- [3]...HÁJEK, Pavel. Rapid Prototyping. [online]. s. 44 [cit. 2012-05-16].
- [4]...Ing. Robert Navrátil. *Rapid Prototyping* [online] [cit. 2012-02-16]. URL<<http://robo.hyperlink.cz/rapid/index.html>>.
- [5]... MM průmyslové spektrum. *Technologie Rapid Prototypingu*. [online] [cit. 2011-02-16]. URL< <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-rapid-prototypingu> >.
- [6]... MM průmyslové spektrum., *Nekonvenční metody obrábění 10. Díl* [online] [Cit. 2012-02-16]. URL<<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil>>.
- [7]...Custompartnet., Selective Laser Sintering [online] [Cit. 2012-02-16]. URL<<http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>>.
- [8]... AlphaPrototypes., *FDM Prototyping Services* [online] [Cit. 2012-02-17]. URL<<http://www.alphaprototypes.com/FDM-Fused-Deposition-Modeling.aspx>>.
- [9]... LIOU, FRANK W. *Rapid prototyping and engineering applications: a toolbox for prototype development*, 2007ISBN-13: 978-0-8493-3409-2. ISBN-10: 0-8493-3409-8.
- [10]... MM průmyslové spektrum., *rapid manufacturing technologii prometal* [online] [Cit.2012-02-18]. URL<<http://www.mmspektrum.com/clanek/rapid-manufacturing-technologie-prometal.html>>.
- [11]... Custompartnet., direct metal laser sintering [online] [Cit.2012-02-16].URL<<http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>>.
- [12]... Wikipedia., direct metal laser sintering [online] [Cit.2012-02-16].URL< http://en.wikipedia.org/wiki/Direct_metal_laser_sintering>.
- [13]... Wikipedia., Electron beam melting [online] [Cit.2012-02-16].URL<http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_beam_melting>.

[14]...Horáček, M. – Slovák, V., *Metody rychlého prototypování (RP) použitelné ve slévárenství*. Brno:Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 6 s.

[15]...ZcastTM Direct Metal Casting. [s.l.] : [s.n.], 2003. 14 s.

[16]...Sur Seal., ZcastTM Direct Metal Casting. [s.l.] : [s.n.], 2003. 14 s.

[17]...Custompartnet., *Stereolithography*. [online]

[Cit. 2012-02-16].

URL< <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>>.

[18]... Custompartnet., *Fused Deposition Modeling*. [online]

[Cit.2012-02-19].URL<<http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>>.

[19]...Custompartnet., *3D Printing*. [online]

[Cit.2012-02-19].URL< <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>>.

[20]...Custompartnet., *Laminated Object Manufacturing*. [online]

[Cit.2012-02-25].URL<<http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>>.

[21]...Custompartnet., *Direct Metal Laser Sintering*. [online]

[Cit.2012-02-25].URL<<http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>>.

[22]...Zare Prototipi. [online]

[Cit.2012-02-25]. URL<<http://www.zare.it/sites/all/themes/zare>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
RP		Rapid Prototyping
SLA		Stereolitografie
SLS		Selective Laser Sintering
LOM		Laminated Object Manufacturing
FDM		Fused Deposition Manufacturing
MJS		Multiphase Jet Solidification
3DP		Three-Dimensional Printing
SGC		Solid Ground Curing
BPM		Ballistic Particle Manufacturing
DMLS		Direct Metal Laser Sintering
EBM		Electron Beam Melting Proces
SCS		Solid Creation Systém
SOUP		Solid Object Ultraviolet Laser Plotting
MD*		Masking and Deposition
DESCAF		Design-Controlled Automated Fabrication

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1:** Využití technologie Rapid Prototyping
- Obr. 2:** Výrobní proces technologií RP
- Obr. 3:** Virtuální 3D Model a hotový model
- Obr. 4:** Schéma stereolitografie
- Obr. 5:** Modely zhotovené technologií SLA
- Obr. 6:** Schéma technologie SLS
- Obr. 7:** Model zhotovený metodou Laser - Sintering Metal
- Obr. 8:** Model zhotovený metodou Laser - Sintering Plastic
- Obr. 9:** Schéma technologie LOM
- Obr. 10:** Schéma technologie FDM
- Obr. 11:** Model vytvořený technologií MJS
- Obr. 12:** Model vytvořený technologií FDM
- Obr. 13:** Schéma technologie 3DP
- Obr. 14:** Schéma technologie SGC
- Obr. 15:** Schéma technologie Model Maker 3D plotting
- Obr. 16:** Schéma technologie BPM
- Obr. 17:** Příklady metody BPM
- Obr. 18:** Příklady metody ProMetal 3D Printing
- Obr. 19:** Schéma metody MJM
- Obr. 20:** Příklady metody MJM
- Obr. 21:** Příklady metody DMLS
- Obr. 22:** Schéma technologie DMLS
- Obr. 23:** Schéma technologie Elektron Beam Melting
- Obr. 24:** Příklady metody Elektron Beam Melting
- Obr. 25:** Možnosti zhotovení pískové formy s využitím metod RP
- Obr. 26:** Součást zhotovená litím do pískové formy při použití RP modelu
- Obr. 27:** Součást zhotovená litím do pískové formy při využití DirectCast metody
- Obr. 28:** Součást zhotovená litím do pískové formy při využití ZCast® metody

PŘÍLOHY

CD-ROM Obsahuje elektronickou verzi bakalářské práce (*.docx a *.pdf)

