



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**MOŽNOSTI UPLATNĚNÍ MODERNÍCH
ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ PŘI VÝROBĚ
PROTOTYPOVÝCH ODLITKŮ**

ADDITIVE TECHNOLOGIES AND THEIR USING WHEN MAKING PROTOTYPE
CASTINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Čagánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

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

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

Možnosti uplatnění moderních aditivních technologií při výrobě prototypových odlitků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přehled metod rychlého prototypování (RP) a možnost jejich uplatnění při výrobě odlitků

Cíle bakalářské práce:

Získání literárního přehledu nejmodernějších způsobů zhotovení prototypových odlitků

Seznam literatury:

Beeley, PR., Smart, RF. (1995): Investment Casting. 1st ed. Cambridge, The University Press, 486 p. ISBN 0 901716 66 9.

Doškář, J., Gabriel, J., aj. (1976): Výroba přesných odlitků. 1. vyd. Praha, SNTL, 315 s. DT 621.746.

Campbell, J. (1991): Castings. 1st ed. Oxford , Butterworth – Heinemann, 288 p. ISBN 0 7506 1072.

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

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

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D

děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o systémech Rapid Prototyping a možnosti jejich využití ve slévárenství. V práci jsou nejprve popsány tři nejvýznamnější metody, na kterých je vysvětlen princip a rozdělení. Poté jsou v práci popsány systémy RP vhodné k výrobě pískových forem, keramických skořepin a trvalých forem.

Klíčová slova

rychlá výroba prototypů, model, forma, odlitek, vytavitelný model, technologie přesného lití, 3D tisk

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with Rapid Prototyping systems and their uses in foundry. This thesis describes three most significant RP systems, on which is explained principle and distribution of them. The another part of the thesis describes how is RP systems useful in production of sand molds, ceramic shells and permanent mold.

Key words

rapid prototyping, pattern, mold, cast, lost wax, investment casting, 3D printing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČAGÁNEK, R. *Možnosti uplatnění moderních aditivních technologií při výrobě prototypových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 39 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc..

PROHLAŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Možnosti uplatnění moderních aditivních technologií při výrobě prototypových odlitek* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny v seznamu na konci této práce.

V Brně dne 27. 5. 2016

.....

Radim Čagánek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Milanovi Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

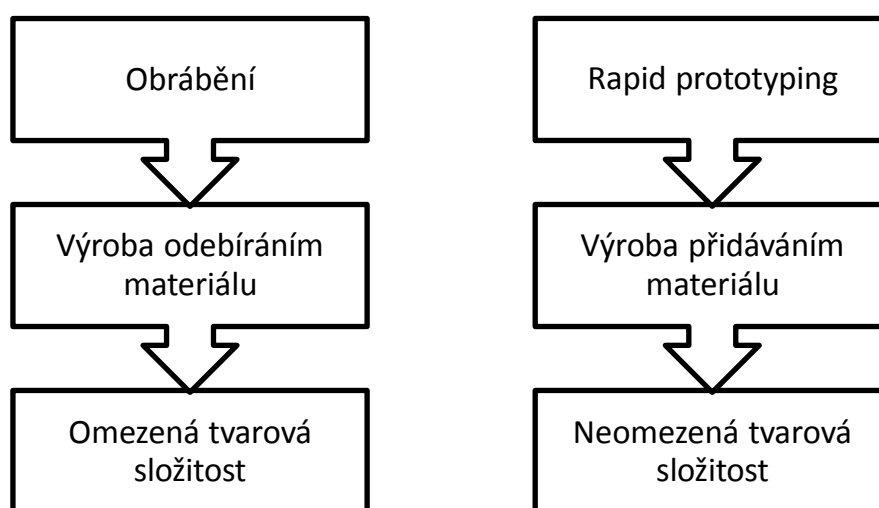
ABSTRAKT	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	4
PROHLAŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
1 RAPID PROTOTYPING	9
1.1 Stereolitografie (SLA)	11
1.2 Selective Laser Sintering (SLS)	13
1.3 Fused Deposition Modeling (FDM)	15
2 MOŽNOSTI VYUŽITÍ SYSTÉMŮ RAPID PROTOTYPING VE SLÉVÁRENSTVÍ	17
2.1 Netrvalé formy	17
2.2 Trvalé formy	18
2.3 Přímá výroba součástí	19
3 METODY RP VYUŽITELNÉ PŘI VÝROBĚ NETRVALÝCH PÍSKOVÝCH FOREM	20
3.1 Pískové formy — přímá výroba	20
3.2 Pískové formy — formování pomocí RP modelu	23
4 METODY RP VYUŽITELNÉ PŘI VÝROBĚ KERAMICKÝCH SKOŘEPIN	25
4.1 Skořepinová forma — přímá výroba	26
4.2 Skořepinová forma — výroba vytavitelného nebo spalitelného modelu	28
4.3 Skořepinová forma — výroba silikonové formy	30
5 METODY RP VYUŽITELNÉ PŘI VÝROBĚ TRVALÝCH FOREM	31
ZÁVĚR	33
SEZNAM ZDROJŮ A LITERATURY	34
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	38
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	39

ÚVOD

Téma této práce spojuje nejstarší způsob zhotovení součástí z kovu společně s nejmodernějšími technologiemi současnosti, což bezpochyby splňují systémy Rapid Prototyping. Slévárenství jako takové se poprvé objevilo již před 5 000 lety, kdy se odlévalo pomocí technologie vytavitelného modelu. Jako model byl použit vytvarovaný včelí vosk, který se obaloval pískem a nejčastěji se tak vytvářely šperky nebo jednoduché nástroje. Používal se kov s nízkou tavicí teplotou, většinou bronz. Na rozdíl od toho jsou systémy Rapid Prototyping známy teprve od roku 1987. Ovšem i za tak krátkou dobu vzniklo v tomto odvětví mnoho nových metod a patentů. Využití systémů Rapid Prototyping ve slévárnách zažívá obrovský rozmach. Je to způsobeno značnými výhodami těchto systémů, kde největší výhodou je rychlost dodání prvního prototypového odlitku. Doba od zadání zakázky po dodání prvního odlitku se pohybovala v rozmezí několika týdnů, s příchodem systémů rapid prototyping se dodání prvního odlitku pohybuje již v řádu dnů. Tato doba se stále zkracuje a vize je taková, že během jednoho dne bude dodán první odlitek. Slévárny vybavené právě takovými systémy mají daleko větší šanci získat zakázku a udržet si zákazníka než slévárny bez technologie Rapid Prototyping. Pomocí těchto systémů lze vytvářet modely z plastu, ze kterých se následně vytvoří silikonová forma, modely přímo z vosku, ale také kovové nebo keramické skořepinové formy. Cílem této práce je získání literárního přehledu všech moderních metod zhotovení prototypového odlitku.

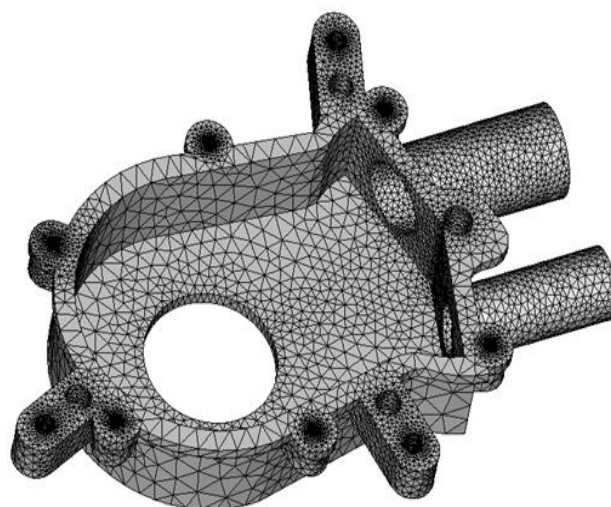
1 RAPID PROTOTYPING [1, 2, 3, 4,5]

Rapid Prototyping neboli rychlá výroba prototypů je souhrnný název pro mnoho metod, které vytváří výrobek nekonvenčními postupy neboli vrstveným aditivním postupem. To znamená, že výrobek je vyroben postupně po jednotlivých vrstvách přidáváním materiálu a ne odebíráním jako je tomu u obrábění. RP je moderní metoda na rychlé vytvoření a výrobu nových prototypů, designových modelů, ale také na přímou výrobu dílů. Díly vytvořené systémy RP jsou vhodné k ověření rozměrů, smontovatelnosti, ergonomie, ale také pro výrobu nástrojů a přípravků potřebných pro zavedení sériové výroby. Na Obr. 1 můžeme vidět porovnání konvenčního obrábění, kde je materiál odebíráný z předem definovaného polotovaru oproti metodám RP, kde naopak je materiál postupně přidáván.



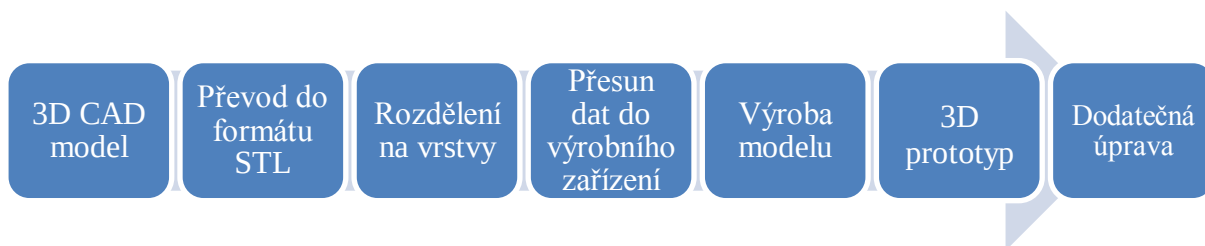
Obr. 1: Srovnání obrábění s metodou rapid prototyping [1]

Všechny metody Rapid Prototyping mají společný proces výroby, který je vyobrazený na Obr. 3. Nejprve se vytvoří 3D model v kterémkoliv CAD systému. Tento model se následně exportuje do formátu používaného všemi RP systémy (Preprocessing). Jedná se o formát STL, který byl původně vyvinut pro stereolitografii. Převedený model je reprezentován trojúhelníky různých velikostí



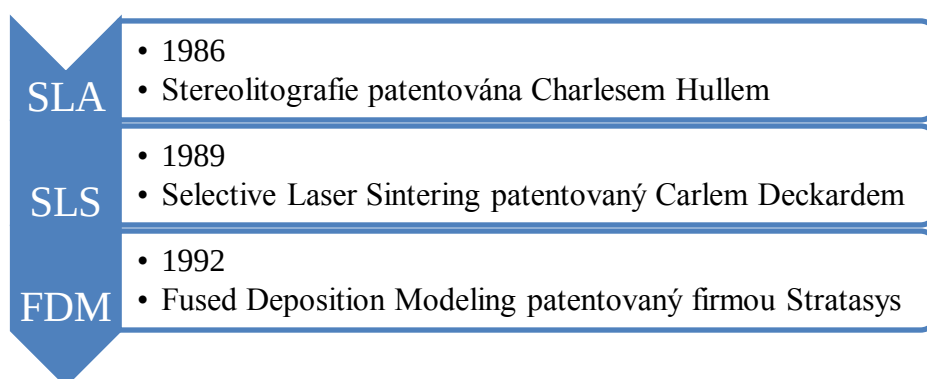
Obr. 2: Součást ve formátu STL [5]

v závislosti na požadovaném rozlišení a přesnosti (Obr. 2). Následně se model rozdělí na jednotlivé vrstvy a vygenerují se dráhy nástroje. Poté jsou tyto data přesunuty přímo do výrobního zařízení a následuje samotná výroba součásti (Processing). Po výrobě modelu vyžadují některé technologie dodatečnou úpravu např. tepelné zpracování, nebo se modely dodatečně brousí, barví a odstraňují se podpůrné materiály (Postprocessing). První komerční systémy Rapid Prototyping se objevily roku 1987. Využívali je především vývojové instituce a jejich popularita postupně narůstala. Největší rozmach nastal v roce 2010, kde se tyto systémy staly cenově dostupné. V současnosti je Rapid Prototyping využíván ve většině firem zabývajících se konstrukcí nebo designem, ale právě taky ve slévárnách.



Obr. 3: Proces výroby prototypové součásti [1]

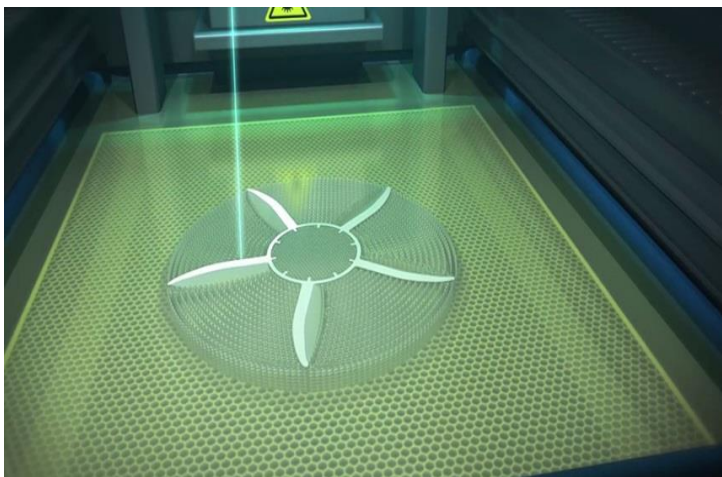
Systémy RP lze rozdělit podle mnoha kritérií. Metody se například dělí podle způsobu vytváření, podle rychlosti výroby, ale nejčastější rozdělení je podle použitého materiálu pro výrobu. Jako první metoda byla vyvinuta Stereolitografie, která využívá jako vstupní materiál tekutý fotopolymer, tudíž pracuje s materiálem v tekuté fázi. Jako další metoda vznikla metoda Selective Laser Sintering (SLS), jedná se o metodu, které pomocí laserového paprsku spéká práškový materiál. I když prášek patří mezi pevné materiály, v dělení systémů RP má svou vlastní kategorii. Metoda Fused Deposition Modeling (FDM) byla vyvinuta krátce po předchozích metodách a pracuje s pevným materiálem, který je ve formě vlákna navinut na cívce a postupně se natavuje. Všechny tyto základní a průkopnické systémy RP budou vysvětleny v následujících podkapitolách. Systémy RP se neustále vyvíjí, zlepšuje se přesnost a stále se rozšiřuje škála použitelných materiálů.



Obr. 4: Historie systémů RP [4]

1.1 Stereolitografie (SLA) [1, 6, 7, 8, 9]

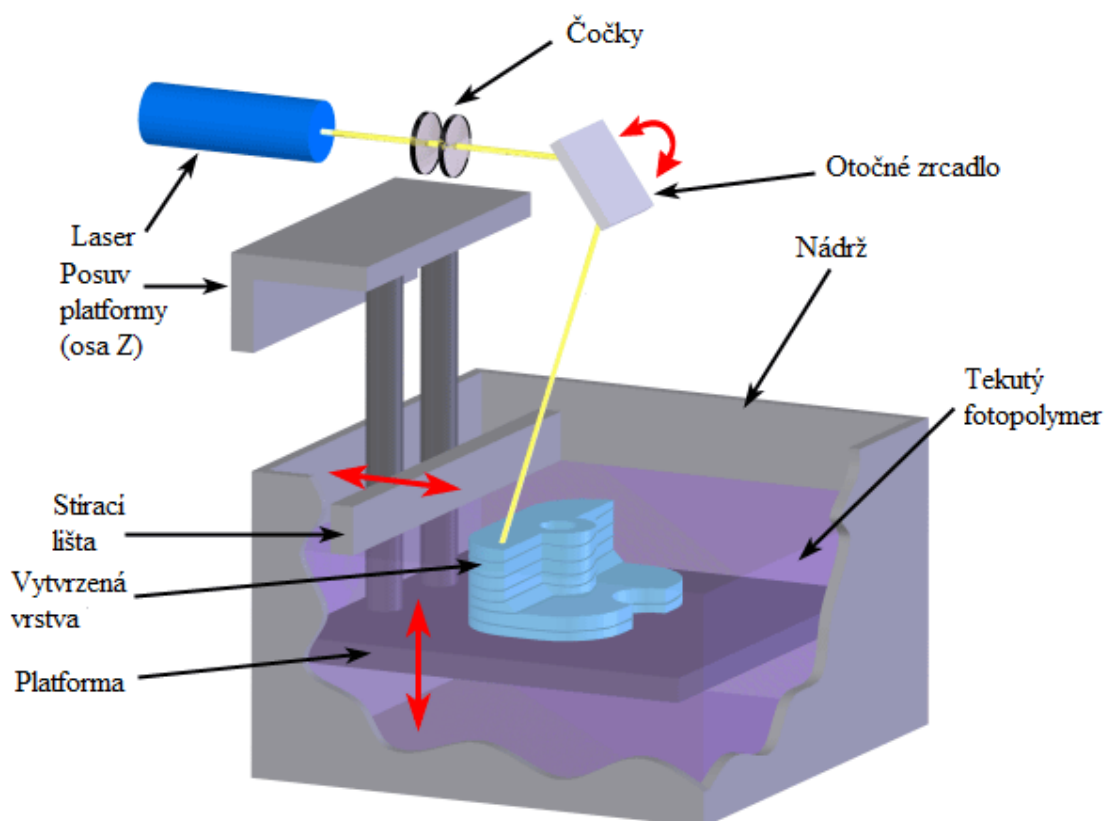
Jedná se o nejstarší technologii RP na základě které se postupně vyvinuli další systémy. Patentovaná byla Charlesem Hullem roku 1986, který je také zakladatel firmy 3D Systems. Komerčně se začala využívat rok po uvedení patentu. Stereolitografie patří mezi metody na vytváření modelu z materiálu v tekuté formě. Tekutá fotopolymerická pryskyřice je ve vrstvách vytvrzována pomocí ultrafialového laserového paprsku. Jedna vrstva vždy odpovídá dané vrstvě řezu STL modelu. Zařízení se skládá z nádrže, ve které se nachází fotopolymer společně se stavební platformou, na které se bude vytvářet model. Platforma se pohybuje ve vertikálním směru a na začátku procesu je ponořena právě o jednu vrstvu vznikajícího modelu. Pro zachování konstantní tloušťky je celá platforma zarovnaná stírací lištou. Vrstva u metody SLA bývá obvykle v rozmezí 0,05 až 0,15 mm a odvíjí se od požadované přesnosti budoucího modelu a také výkonu laseru. V procesu se využívá helium-kadmiový (HeCd) laser, který má vysokou kvalitu paprsku, a proto je využíván v oblasti 3D tisku, ale také ve spektroskopii nebo při výrobě CD disků. Vytvrzování laserem můžeme vidět na Obr. 5. Nejprve se laserem vytvrdí obrys konkrétní vrstvy a až potom vnitřní část, případně podpory. V procesu výroby je možné použít více laserů, což vede k urychlení výroby.



Obr. 5: Vytvrzování modelu laserem [10]

Při výrobě tvarově složitých součástí je nutno stavět i dočasné podpory, které zajistí požadovaný tvar součásti a stabilitu. Struktura podpor je navrhnutá tak, aby je bylo možno co nejjednodušeji odstranit.

Schéma zařízení je vyobrazeno na Obr. 6. Laserový paprsek přes soustavu čoček dorazí na otočné zrcadlo, které směřuje paprsek na místo, které má být vytvrzeno. Po vytvrzení celé vrstvy se platforma ponoří o jednu vrstvu do fotopolymeru. Pohyb platformy je realizován většinou pomocí krokového motoru. Následně se stírací lištou celá plocha zarovná. Kdyby se tak nestalo, tak nemusí být dodržena konstantní tloušťka po celém povrchu a mohly by vzniknout nerovnosti. Poté se celý proces opakuje do doby, než vznikne celý model.



Obr. 6: Schéma zařízení – Stereolitografie [11]

Po ukončení procesu výroby je nutná další úprava modelu. Vyrobený model stále obsahuje nevytvrzený polymer a také podpory, které musí být odstraněny. Po vytažení z kádě je model stále křehký a snadno může dojít k jeho poškození. Po odstranění podpor proto následuje vytvrzení v UV peci, které dodá modelu konečnou pevnost. Po vytvrzení je model připravený k použití nebo může být ještě upraven. SLA modely se můžou brousit, pískovat nebo pokovovat například niklem. Pokovování model zpevní, ale také mu dodá elektrickou vodivost, čímž se zvýší možnost uplatnění takového modelu.

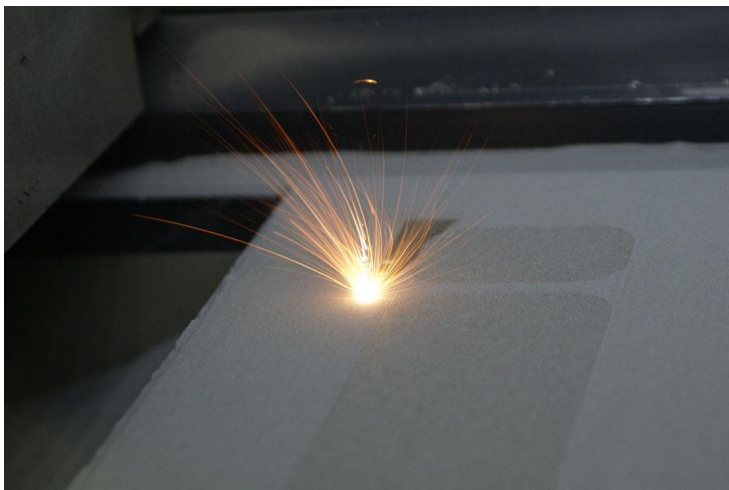
Tab. 1: Výhody a nevýhody Stereolitografie

Výhody:	Nevýhody:
+ rychlost stavby modelu	- potřeba stavby dočasných podpor
+ vysoká přesnost, kvalita povrchu	- nutnost očistit model a odstranit podpory
+ škála použitelných materiálů	- nutné tepelné zpracování
+ rozměrné modely s dobrými fyzikálními vlastnostmi	- pořizovací cena stroje a materiálů

1.2 Selective Laser Sintering (SLS) [1, 6, 12]

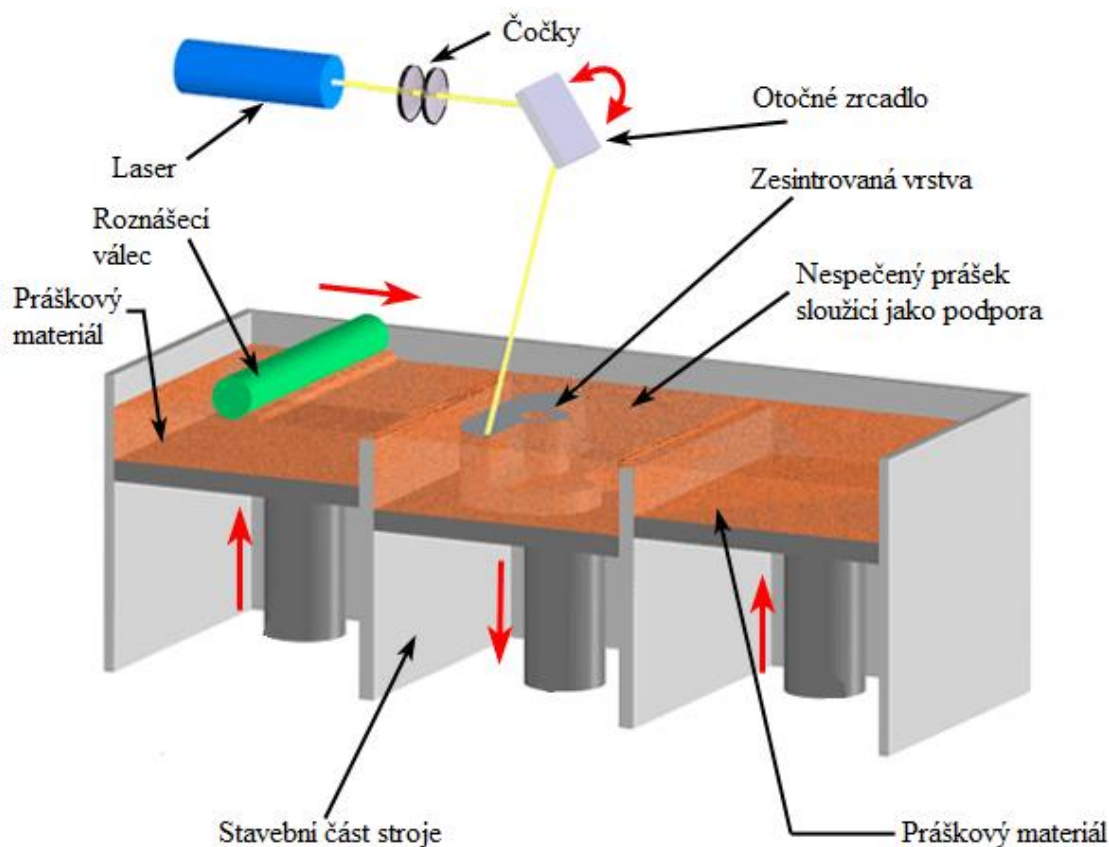
Tento systém RP pracuje s materiálem ve formě prášku. Technologie selektivního spékání laserem byla vyvinuta v roce 1986 Carlem Deckardem a jeho profesorem Joem Beamanem na Texaské univerzitě. Následně založili firmu Desk Top Manufacturing (DTM) zaměřenou na výrobu SLS strojů. V roce 2001 byla tato firma koupena společností 3D Systems, která již dříve vyvinula zcela odlišný systém RP - stereolitografii. Sintrování neboli spékání se používá již několik tisíc let. Stejným principem, pomocí difuze, vznikaly např. cihly nebo porcelán.

Podstatou této metody je spékání prášků různých materiálů pomocí laserového paprsku. Zařízení se skládá většinou ze dvou nebo tří komor (Obr. 8). První komora je zásobník používaného prášku. Tento zásobník se pohybuje ve svislé ose směrem nahoru. Povysunutím platformy zásobníku se dostatečné množství práškového materiálu následně roznese po pracovní ploše pomocí roznášecího válce. Výška vrstvy rozneseného materiálu je předem definovaná. U této metody se výška vrstvy pohybuje od 0,06 po 0,15 mm. Pracovní plocha se pohybuje postupně směrem dolů, vždy o výšku jedné vrstvy. Po nanesení vrstvy prášku se aktivuje laser, který je přes soustavu čoček a zrcadel naveden do místa, kde má dojít ke spečení prášku (Obr. 7). V pracovní komoře stroje se udržuje teplota velmi blízká teploty tání daného materiálu. Díky tomuto může laser pomocí veškeré své energie spéct právě vytvářenou plochu a celý proces se urychlí. V komoře kromě vysoké teploty je též plynná



Obr. 7: Spékání prášku pomocí laseru [13]

atmosféra dusíku, aby nedocházelo k oxidaci materiálu. Na rozdíl od ostatních metod např. FDM nebo SLA tato metoda nevyžaduje stavbu podpor. Nespečený prášek zůstává na svém místě a slouží jako podpora pro další vrstvy. SLS technologie dokáže stavět z různých materiálů – plast, sklo nebo kov. Proto je to metoda vhodná jak ke stavbě prototypů, tak ke stavbě finálních produktů.



Obr. 8: Schéma zařízení – SLS [14]

Po dokončení výroby je potřeba nechat komoru vychladnout. Objemné modely můžou vychladnout i dva dny. Ve srovnání se stereolitografií je zařízení mnohem složitější a komplikovanější, ale nedokáže dosáhnout takové kvality povrchu a takové přesnosti.

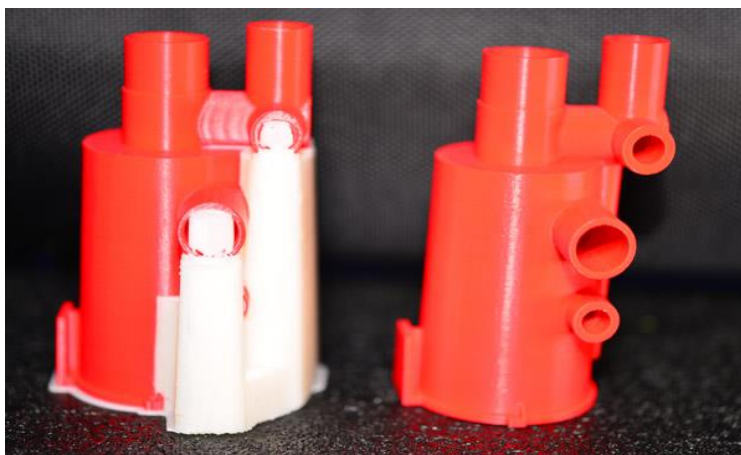
Tab. 2: Výhody a nevýhody metody SLS

Výhody:	Nevýhody:
+ vysoká pevnost modelu (dle materiálu)	- energeticky náročný proces
+ není potřeba stavět podpory	- rozměrné zařízení
+ výroba kovových forem	- kvalita povrchu
+ široká škála použitelných materiálů	- většinou nutnost součástí obrábět, brousit, tryskat

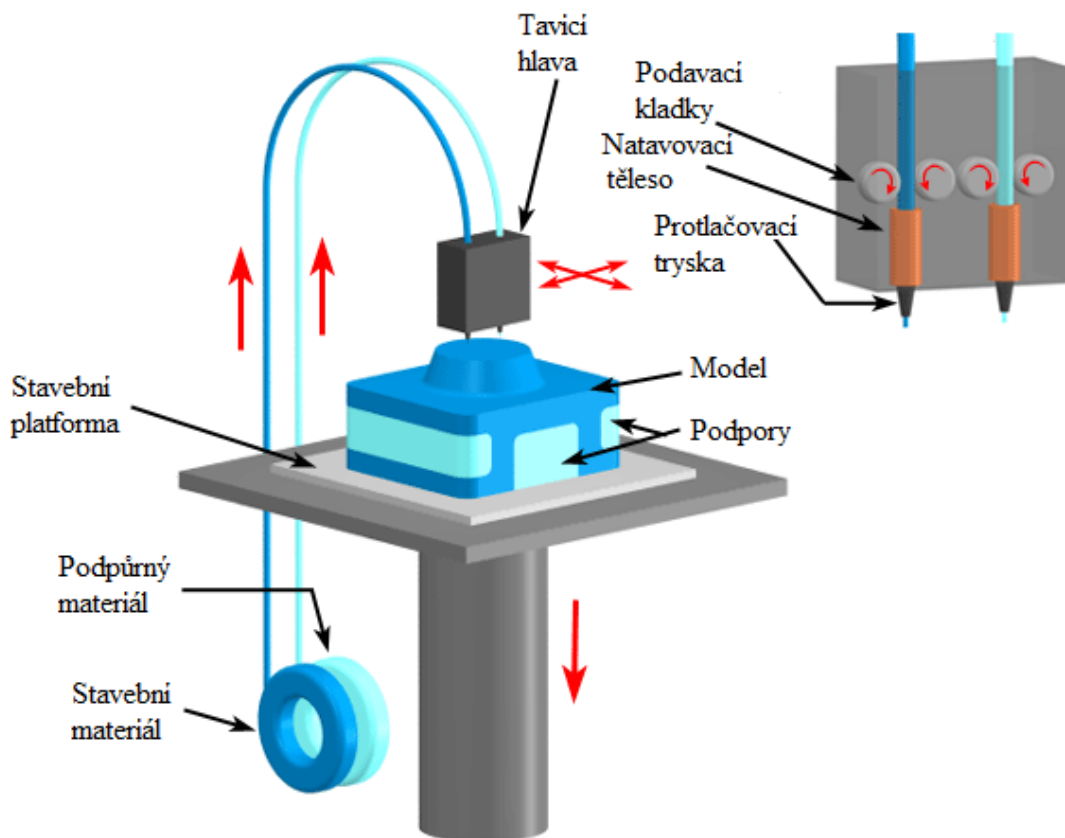
1.3 Fused Deposition Modeling (FDM) [1, 6, 15, 16]

Jedná se o systém Rapid Prototyping na bázi pevného materiálu, který je nejčastěji navinutý na cívce. Tato technologie byla vyvinuta Scottem Crumpem v roce 1989 a následně byla komercializovaná v roce 1992 firmou Stratasys Inc. V současnosti se jedná o jednu z nejrozšířenějších metod 3D tisku hned po stereolitografii. FDM systém využívá nejjednodušší princip na bázi tavné pistole a proto je také průkopníkem levných 3D tiskáren. Stalo se tak po expiraci patentu Scotta Crumpa v roce 2009. Tiskárna používá dva druhy materiálů, které jsou navinuty na cívce. Jeden je modelovací a slouží k vytvoření modelu a druhý je podpurný, který slouží na vytvoření podpor pro převísle části modelu. Jsou to plochy umístěné v prostoru a není pod nimi žádný materiál (Obr. 9).

Pomocí podávacího mechanismu a podávacích kladek se materiál postupně odvíjí z cívky a je dopravován do tavicí hlavy. Tady je drát pomocí kladek posouván do natavovacího tělesa, které je složeno z NiCr cívky a dále pak do protlačovací trysky. V závislosti od použitého stavebního a podpurného materiálu je specifická i teplota natavení. Například pro stavební materiál z ABS plastu je teplota 280 °C a pro podpurný materiál může být teplota kolem 100 °C. Tavicí hlava se nad platformou pohybuje v souřadnicích X-Y pomocí krokových motorů a dokonale kopíruje konturu budoucího modelu. Nejprve se na platformu nanese vrstva podpurného materiálu a až poté stavební materiál. Nanesený materiál tuhne téměř okamžitě. Po nanesení materiálu po celé vrstvě se stavební platforma sníží o jednu vrstvu směrem dolů a celý proces se opakuje. Stejně jako u metody SLS i tady se tiskne v uzavřené komoře, která je zahřívána na předem danou teplotu. U levnějších zařízení se tiskne na vyhřívanou platformu.



Obr. 9: Model s podporami a výsledný model po odstranění podpor [17]



Obr. 10: Schéma zařízení – FDM [15]

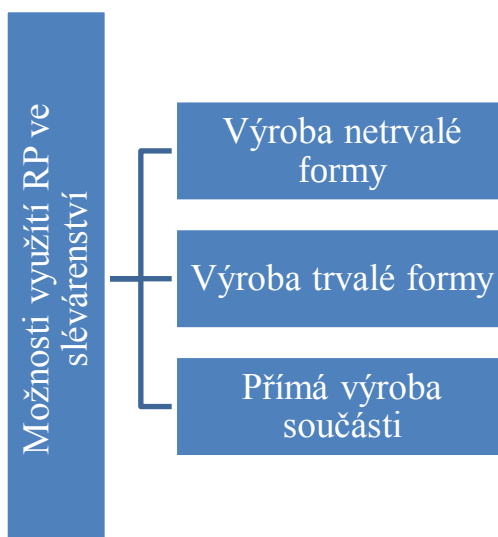
Metodou FDM lze tisknout velkou řadu plastových materiálů a dokonce i vosk pro tvorbu vytavitelných modelů. Materiál ABS má dobré pevnostní charakteristiky, ale vytisknutý model je anizotropní, což znamená, že nemá stejné mechanické vlastnosti ve všech směrech. Zařízení FMD je velmi tiché a kompaktní a vhodné zejména pro menší modely. Oproti stereolitografii je FDM méně přesné, ale vytisknuté modely mají vyšší pevnost.

Tab. 3: Výhody a nevýhody metody FDM

Výhody:	Nevýhody:
+ jednoduchá konstrukce	- omezená přesnost, závisí na použité trysce
+ nízká cena materiálu i zařízení	- výrobní čas, metoda vhodná spíše pro menší modely
+ lehké odstranění podpěr	- nutnost stavět podpory
+ možnost barevného tisku	- možná deformace modelu

2 MOŽNOSTI VYUŽITÍ SYSTÉMŮ RAPID PROTOTYPING VE SLÉVÁRENSTVÍ

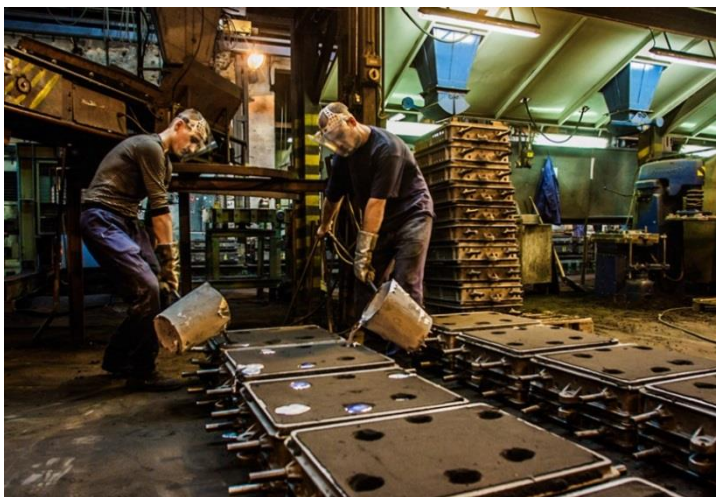
Slévárenské formy dělíme na trvalé a netrvalé. Trvalé formy jsou z kovu a nazývají se kokily. Do těchto forem lze odlévat velké série odlitků a lze dosáhnout vysoké přesnosti a kvality povrchu. Netrvalé formy jsou buďto pískové, anebo keramické skořepinové. Pojem netrvalá forma znamená, že po odlití se forma zničí a pro další odlitek se musí vyrobit nová.



Obr. 11: Možnosti využití RP ve slévárenství

2.1 Netrvalé formy [18, 19]

Odlévání do netrvalých forem, konkrétně pískových je nejrozšířenější metoda na celém světě. Jedná se o formovací směs složenou ve většině případů z ostřiva (křemičitý písek), pojiva (bentonit) a vody. Do této směsi se odlévá 75% světové produkce odlitků. Tyto směsi se nejčastěji formují do rámců a to buď ručně



Obr. 12: Odlévání do pískových forem [20]

anebo strojně, což může být lisováním, střešáním, foukáním nebo různou kombinací těchto způsobů. Existují i automatické formovací linky, které pracují s rámy nebo bez rámců a jsou schopny vyrobit

téměř 500 ks forem za hodinu. Po odlití se odlitek vytluče na vytloukacím roštu a použitý písek se regeneruje pro další použití. Systémy RP lze v tomto případě použít pro tvorbu modelů a modelových zařízení stejně tak jako ze dřeva, anebo je možno vytisknout přímo pískovou formu systémem pracujícím na způsobu SLS. Všechny způsoby a možnosti využití systémů RP u lití do pískových forem budou vysvětleny v následující kapitole.

Další netrvalé formy jsou keramické skořepiny. Ve většině případů tato keramická skořepina vznikne pomocí vytavitelného modelu, který je vyroben ze slévárenského vosku. Výroba voskového modelu patří mezi nejdůležitější fáze výroby přesného odlitku. V sériové výrobě se voskové modely vyrábí vstřikováním vosku do matečné formy. Tato forma je zpravidla vyrobena obráběním a její výroba je nákladná. Při výrobě prototypových odlitků není potřeba kovová forma, jelikož se nejedná o velké série odlitků. Forma lze vyrobít například ze silikonu, případně lze pomocí systémů RP tisknout model přímo z vosku, ale existují i takové metody, které vytisknou přímo keramickou skořepinu.

2.2 Trvalé formy [21,22]

Trvalé formy neboli kokily jsou nejčastěji vyrobeny z šedé litiny, ve výjimečných případech z oceli. Odlévání do kokil patří mezi metody přesného lití. Forma je trvalá a pro vytvoření dutin se používají ocelové nebo pískové jádra. Životnost kokily je od 200 po 200 000 odlitků a závisí to na odlévaném materiálu. Pro ochranu a zvětšení životnosti kokily se používají speciální nátěry. Odvzdušnění formy je provedeno pomocí odvzdušňovacích kanálků, které musí mít velikost takovou, aby do nich nezatekl kov. Do kokil se kov odlévá stejně jako do pískových forem gravitačně. Oproti pískovým formám lze dosáhnout větší přesnosti a kvality povrchu, ale jsou zde větší vstupní náklady na výrobu formy a lze odlévat jen omezené tvary odlitku. Například tenkostěnné odlitky pomocí této metody odlévat nelze. Systémy RP lze v tomto případě použít na výrobu kovové formy a to konkrétně metody, které zpracovávají kovový prášek.



Obr. 13: Kokilové lití [22]

2.3 Přímá výroba součásti [23]

V poslední době, kdy je stále větší poptávka po tvarově náročných odlitcích, se nejvíce prosazují slévárny přesného lití. Důležitým faktorem při získání zakázky je bezpochyby rychlost dodání odlitku a taky jeho cena. Právě tady se naskytuje možnost využít systémy RP. Slévárny vybavené některým ze systémů RP umožňující tisk součásti z kovu mohou jako první dodat prototypový „odlitek“ vytisknutý na 3D tiskárně a tím

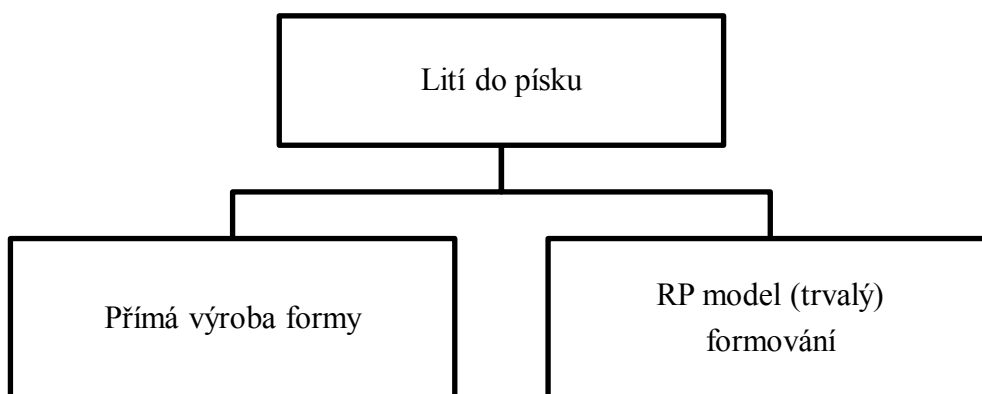
zakázku získat. Zákazník si tak může ověřit smontovatelnost, funkčnost a případně se tak můžou eliminovat chyby před zavedením sériové výroby. Na přímou výrobu součásti budou vhodné metody RP stejně jako u výroby trvalých kovových forem pracující s vytvrzováním kovových prášků. Vhodná je například metoda DMLS, která je popsána v další kapitole. Tato metoda nabízí kvalitní povrch a výborné mechanické vlastnosti.



Obr. 14: Součást vyrobená metodou DMLS [24]

3 METODY RP VYUŽITELNÉ PŘI VÝROBĚ NETRVALÝCH PÍSKOVÝCH FOREM

Písková forma ve většině případů vznikne zaformováním modelu v kovovém rámu. Tudiž se zde dají využít systémy RP, které tisknou houževnatý plastový materiál, který se zaformuje stejně jako model dřevěný, avšak výroba takového modelu je méně časově náročná. Další možnost jak vyrobit pískovou formu je její přímá výroba, to znamená bez použití modelu. Metody pro přímou výrobu formy pracují na systému spékání částic anebo písek po vrstvách vytvrzují pomocí pojiv, které jsou aplikovány pomocí tiskové hlavy. Písková forma může vzniknout i zaformováním polystyrenového modelu, který se tekutým kovem vypaří. Zde je však použití systémů RP ojedinělé.



Obr. 15: Rozdělení výroby pískové formy

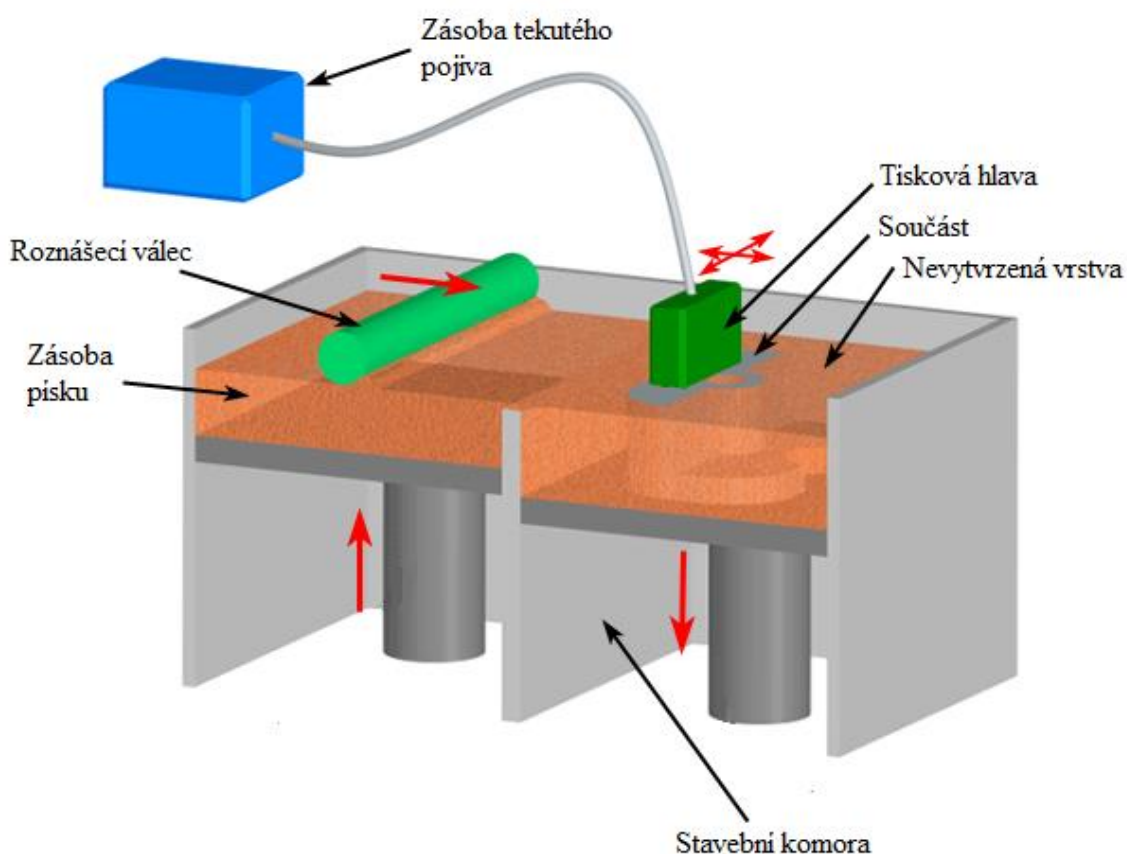
3.1 Pískové formy — přímá výroba

ExOne [25, 26]

Společnost ExOne byla založená roku 2005 a hlavní činností této firmy je výroba a servis 3D systémů pro tisk z kovu a písku. V roce 2010 firma představila největší tiskárnu pro tisk z písku ExOne S-Max, tato tiskárna dokázala tisknout jádra a formy o maximálních rozměrech 1800x1000x700 mm. V současné době je vlajkovou lodí společnosti zařízení, kde lze tisknout ve dvou pracovních komorách každá o rozměrech 2200x1200x700 mm a dosahovaná přesnost vytištěného jádra nebo formy je $\pm 0,3$ mm.

Schéma stroje je zobrazeno na Obr. 16. Zařízení pracuje na principu zvaném Binder Jetting, což v překladu znamená tisknutí pojiva. Nejprve se CAD data přenesou do systému stroje, který si součást rozdělí na jednotlivé vrstvy. Písek, který je smíchaný s aktivátorem, se roznese v tenké vrstvě po pracovní komoře a tisková hlava, ve které je pojivo může postupně vytvrzovat jednotlivé části budoucí formy nebo jádra. Jako pojivo se používá furan, vodní

sklo nebo případně látky na bázi fenolů. Pokud je použito furanové pojivo není potřeba vytištěnou součást dále tepelně vytvrzovat. Nevýhodou může být ekologická závadnost furanu. Naopak vodní sklo je ekologicky nezávadné, v písku nemusí být přimíchán aktivátor, ale vytištěný objekt musí být dále tepelně zpracován, aby došlo k jeho vytvrzení. Na rozdíl od konvenčních metod zhotovení forem a jader lze pomocí těchto systému vytisknout formu během jednoho dne a to za daleko menší cenu. Musíme však počítat s pořizovacími náklady spojenými s nákupem takového stroje.



Obr. 16: Schéma zařízení - Binder Jetting [26]

Laser sintering of silica sand [27]

Tento systém pracuje podobně jako systém SLS. Jako materiál se používá křemenný písek, který je ve slévárenství zcela běžný. Tento písek má vysokou teplotu tání, která je 1600 °C. Dále ale obsahuje mnoho jiných chemických prvků, které mají teplotu tání menší. Je to vápník, hliník, hořčík a jiné. Proto může být tento písek vytvrzovaný i méně energeticky náročným laserem. Nejprve se na kovové podložce vytvrdí první vrstva, která je složena z křemenného písku a křemičitanu sodného, který zajistí dobrou přilnavost mezi pískem a

podložkou. Tato vrstva má tloušťku 0,3 mm. Jelikož křemičitan sodný snadněji tuhne, je laser nastaven na nižší výkon než pro vytvrzování následujících vrstev. Další vrstva se již skládá pouze z křemenného písku, parametry laseru se upraví a vytvrzuje se již kontura budoucí formy. Po vytvrzení celé součásti následuje nátěr křemičitanem sodným, který celou součást zpevní a zlepší její povrch. Tento vytvrzovací proces může být urychlen tuhnutím součásti v peci o teplotě 200 °C. Poté je již forma připravena k odlévání.

Voxeljet [28]

Německá firma Voxeljet založená roku 1999 se již od svých počátků zabývá využitím moderních 3D metod využitelných pro výrobu odlitků. Tato firma nabízí systémy RP pracující na principu Binder Jetting, což znamená postupné přidávání pojiva na práškový materiál. Ve strojích firmy Voxeljet, které jsou dostupné v několika velikostech pracovní komory, kde největší dosahuje rozměrů 4000 x 2000 x 1000 mm lze tisknout pískové formy a jádra.



Obr. 17: Vytisknuté pískové jádro [28]

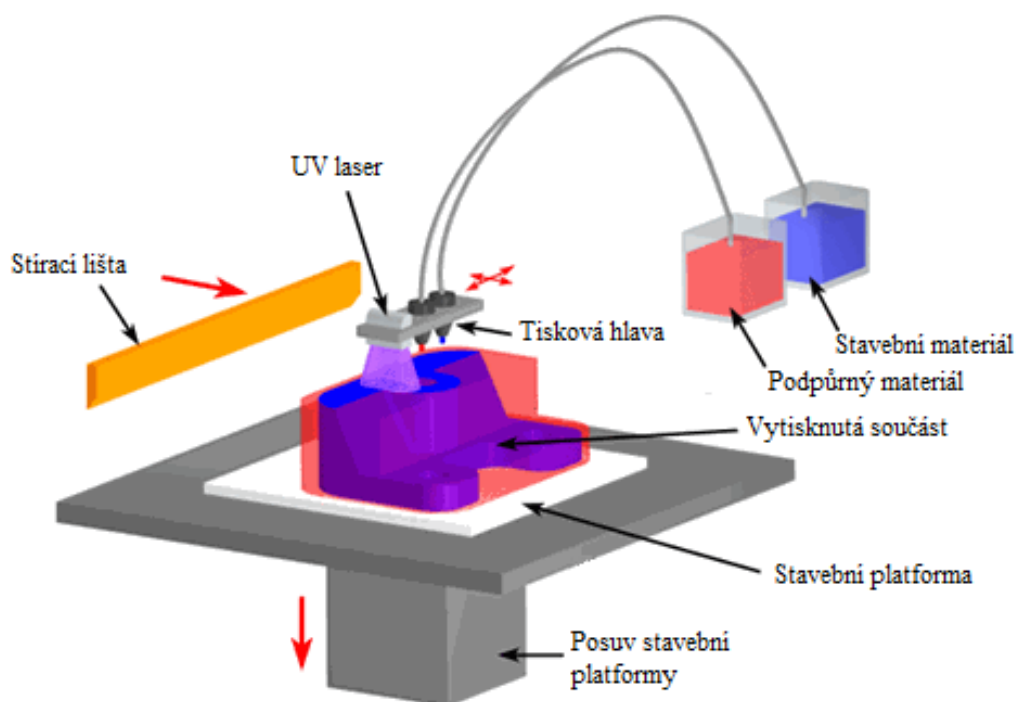
Schéma systému je obdobné jako u firmy ExOne (Obr. 16). Poté, co se stavební platforma dostane do nejvyšší možné pozice, se nanese první vrstva zvoleného materiálu. Tloušťka jednotlivé vrstvy je při použití písku 300 μm. Pomocí tiskové hlavy začne nanášení pojiva a po nanesení celé vrstvy se stavební platforma sníží o velikost jedné vrstvy směrem dolů a celý proces se opakuje až do doby než se vytvoří celá forma nebo model. Následně se ze zařízení vyjme kovový box, ve kterém jsou vytisknuté součásti i s přebytečným práškem a pomocí vysavače začne první hrubé čištění. Po odsátí přebytečného materiálu se vytisknutá součást dále čistí pomocí štětců, případně stlačeného vzduchu. Výhody u vyrobených pískových jader nebo forem jsou vysoká přesnost, rychlost a v případě výroby prototypových odlitků taky cena.

3.2 Pískové formy — formování pomocí RP modelu [29]

Nejčastěji vzniká písková forma zaformováním dřevěného nebo kovového modelu. Pokud se jedná o automatické formovací systémy, tak model je ve většině případů vyroben CNC obráběním z hliníku. Nevýhodou tohoto konvenčního obrábění je vysoká cena, ale i čas výroby, která může trvat několik týdnů. Další nevýhodou může být, že již vyrobený model a následný odlitek nesplňují požadavky zákazníka a model musí být draze opraven. Právě z těchto důvodů jsou do sléváren zaváděny systémy RP. Pro výrobu modelů jsou vhodné i metody, které byly vysvětleny výše a to konkrétně Stereolitografie a metoda FDM.

PolyJet Technology [29, 30]

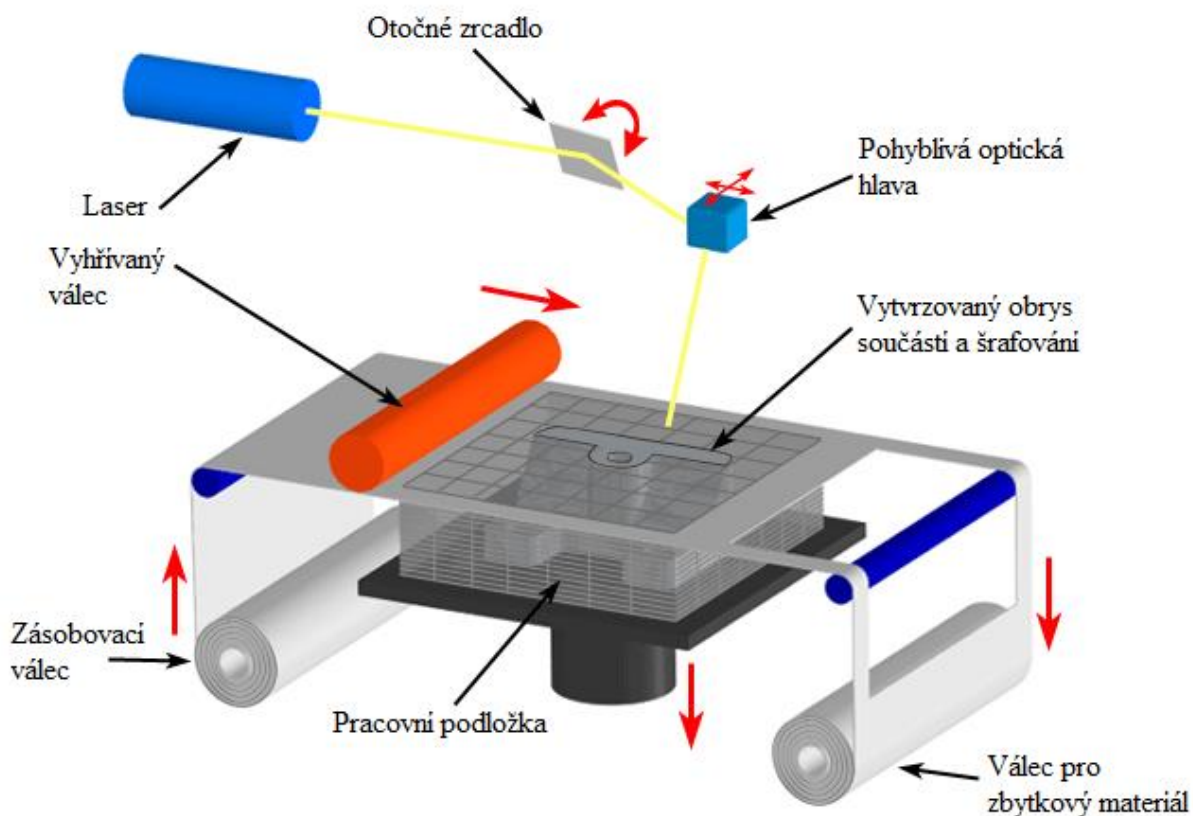
Systém od firmy Stratasys je velmi podobný Stereolitografii. Ovšem zde není fotopolymer v kádi, ale je po malých kapkách pomocí tiskové hlavy tisknut na stavební platformu. Po vytisknutí celé vrstvy součásti a také stavebních podpor se vrstva pomocí UV laseru vytvrdí. UV laser je upevněn na tiskové hlavě, tudíž dochází téměř k okamžitému vytvrzení dané vrstvy. Poté se již stavební platforma sníží o jednu vrstvu a celý proces se opakuje. Pomocí této metody lze vytisknout modely, které se poté upevní na modelové zařízení. Modely vytisknuté systémem PolyJet mají vysokou přesnost a hladký povrch stejně tak jako Stereolitografie. Schéma zařízení je popsáno na Obr. 19. Finanční úspora oproti obráběným modelům dosahuje až 60% stejně tak jako časová úspora.



Obr. 18: Schéma zařízení – PolyJet Technology [30]

Laminated Object Manufacturing (LOM) [31, 32, 33]

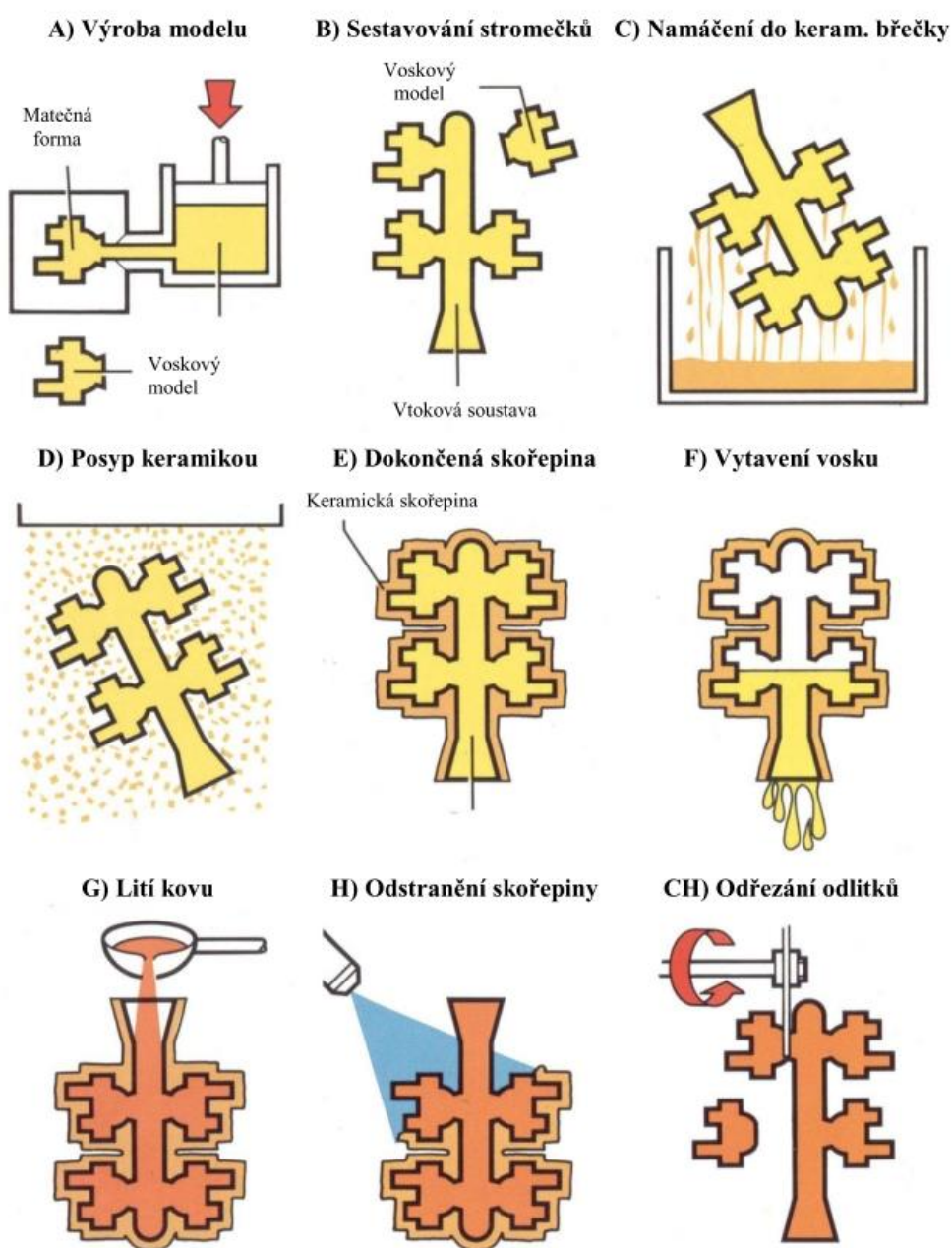
Metoda vyvinutá firmou Helisys Inc. (nyní Cubic Technologies) pracuje s tenkou vrstvou papírového nebo plastového materiálu, který je pomocí tepla a tlaku spojen s vrstvou předchozí. Schéma zařízení je na Obr. 20. Zařízení je složeno ze soustavy dvou válců, kde první z nich je zásobovací a druhý je pro zbytkový materiál. Mezi těmito dvěma válci se nachází pracovní podložka, na které dochází ke stavbě modelu. Použitý materiál je předem napuštěný lepidlem, jakmile se pomocí vyhřívaného válce přitiskne na podložku nebo předchozí vrstvu dojde k jeho okamžitému spojení. Poté se pomocí laseru vyřeže požadovaný tvar modelu. Laser také vytvoří šrafování na přebytečném materiálu, který následně slouží jako podpora pro převislé části modelu a díky šrafování lze tuto podporu jednodušeji odstranit. Pracovní podložka se poté sníží o vrstvu papírové nebo plastové fólie a celý proces se opakuje. Ve slévárenství musí modely splňovat důležité vlastnosti a to odolnost vůči opotřebení, odolnost vůči vlhkosti, pevnost a stabilitu. Proto je nesmírně důležitá správná volba materiálu a také úprava již hotového modelu. Na hotový model se nanáší speciální otěruvzdorné laky nebo tenká vrstva různých kovových materiálů. Upravený, obroušený a natřený model lze získat zhruba za jeden a půl týdne, kdežto výroba dřevěného modelu zabere až 4 týdny. Náklady na výrobu modelu pomocí metody LOM jsou také o 25% nižší.



Obr. 19: Schéma zařízení – Laminated Object Manufacturing [33]

4 METODY RP VYUŽITELNÉ PŘI VÝROBĚ KERAMICKÝCH SKOŘEPIN [19]

Technologie vytavitelného modelu neboli přesné lití je stále se rozrůstající odvětví slévárenství. Výsledný odlitek vznikne odlitím kovu do keramické skořepiny. Tato skořepina nejčastěji vznikne obalováním tzv. stromečku, který je složen ze vtokové soustavy a nalepených modelů. Modely jsou vyrobeny vstřikováním vosku do matečné formy. Poté se již celý stromeček obaluje keramickou hmotou a po vytvoření dostatečné tloušťky stěny se voskový model společně s vtokovou soustavou vytaví. Následuje žhánání formy a odlévání. Po odlití se keramická skořepina odstraní a odlitky se ze stromečku odřezou.



Obr. 20: Princip technologie vytavitelného modelu [19]

Keramické skořepiny lze vyrobit přímo spékáním keramického prášku na principu RP metody SLS. Dále pak lze pomocí systémů RP vytvořit modely z vosku anebo z plastu, které se následně obalí keramickou hmotou a vytaví. Nebo se vytvoří trvalý plastový model, ze kterého se následně vyrobí silikonová forma, ve které poté vznikne voskový model.



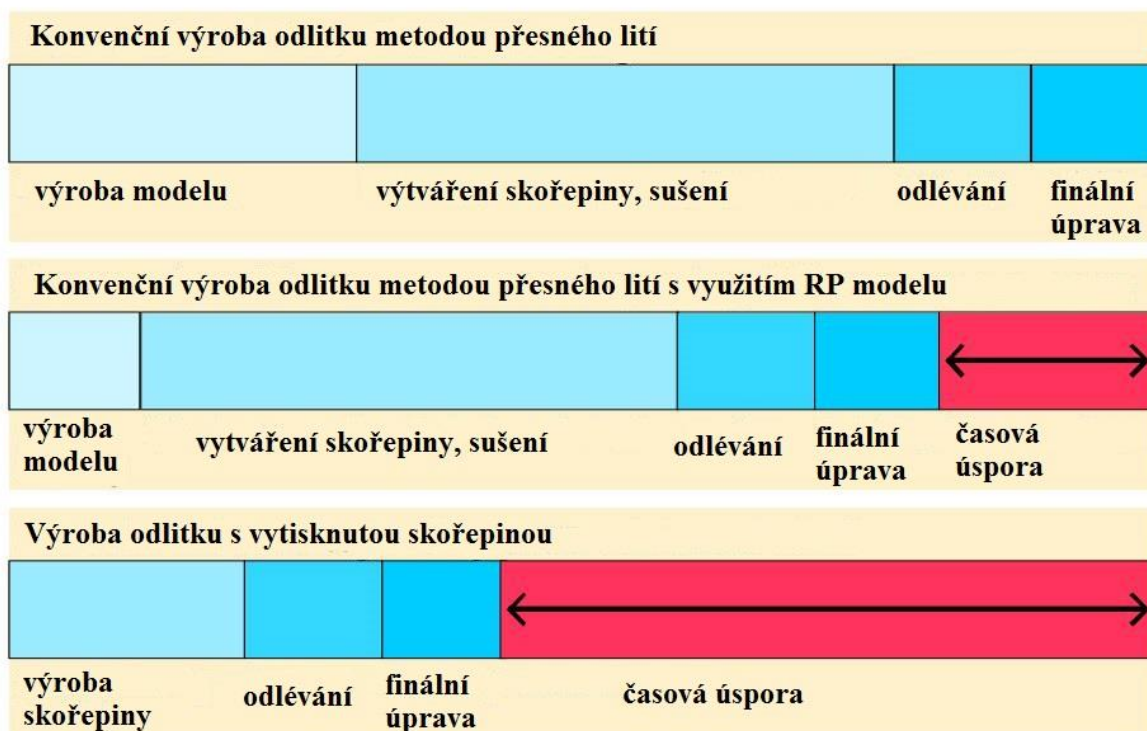
Obr. 21: Rozdělení výroby keramické skořepiny

4.1 Skořepinová forma — přímá výroba

Direct Laser Sintering of Ceramics [34]

Jedná se o metodu, která pracuje stejně jako SLS, avšak je zaměřena pouze na výrobu keramických skořepin. Pomocí laseru se zde v jednotlivých vrstvách vytvrzuje keramický prášek na bázi zirkonu. Křemičitan zirkoničitý (ZrSiO_4) je nejvhodnější materiál pro tuto metodu. Velkou roli ve výsledné přesnosti hraje kvalita materiálu, proto se prášek před použitím rozdělí na jednotlivé frakce a odstraní se prachové částice. Velikost spékané vrstvy závisí na velikosti jednotlivých zrn materiálu, nejtenčí možná vrstva má 50 μm . Na Obr. 22 lze vidět srovnání výroby odlitku technologií přesného lití z časového hlediska. Jako první je uvedena konvenční metoda zhotovení odlitku, kde se model vyrobí konvenčním způsobem, tedy vstřikováním do matečné formy, která je vyrobena obráběním. Poté již následuje nanášení keramické hmoty, sušení, vytavení vosku, žíhání a odlévání. Druhá varianta je již s využitím metod RP. Model je zde vyroben jednou z metod, která bude popsána v následující podkapitole. Jelikož se zde nemusí vytvářet kovová vstřikovací forma, vzniká tím časová úspora. A jako poslední je na obrázku uvedena metoda přímé výroby keramické skořepiny, kde je časová úspora značná. Odpadá zde jak výroba modelu, tak i zdoluhavý proces vytváření skořepiny postupným obalováním a sušením. Tato metoda je vhodná pro rozměrově menší součásti. Takto vyrobené odlitky mají dobrou rozměrovou přesnost, avšak drsnost

povrchu je horší než u konvenční výroby. Nevýhoda je i nemožné ověření vnitřních rozměrů vzniklé skořepiny.



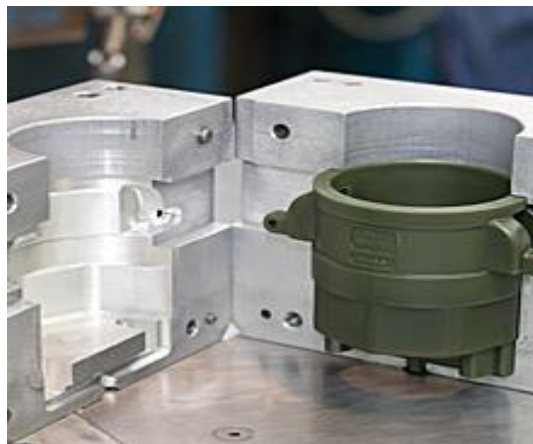
Obr. 22: Časová úspora při využití systémů RP [34]

Direct Shell Production Casting (DSPC) [35]

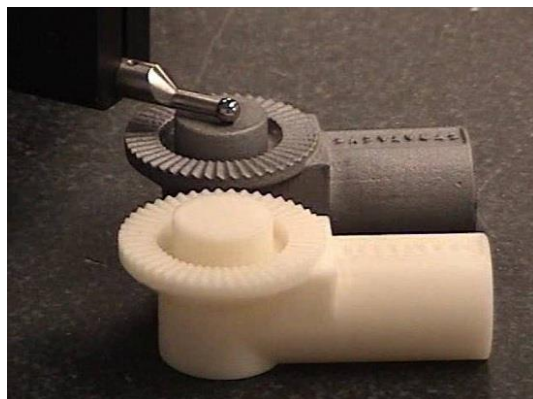
Tato metoda pro výrobu keramických skořepinových forem pracuje na systému tisknutí pojiv. Keramický prášek je pomocí roznášecího válce rozprostřen po pracovní podložce a poté již tisková hlava kopíruje obrys tisknuté skořepiny a nanáší pojivo, které spojuje jednotlivé zrna. Forma se po vytisknutí očistí od přebytečného prášku a poté se vypálí v peci. Následuje již odlévání kovu. Tato metoda dokáže vytisknout ve formě i jádra, které tvoří dutou část odlitku. Tato metoda je velmi rychlá a vhodná pro výrobu prototypů. Pokud odlitek nesplňuje požadavky zákazníka lze pozměnit pouze CAD data a nový odlitek je dodán během dnů.

4.2 Skořepinová forma — výroba vytavitelného nebo spalitelného modelu Fused Deposition Modeling (FDM) [37, 38]

Princip této metody je popsán výše. Pro výrobu prototypových odlitků technologií přesného lití jsou modely vytvořené metodou FDM hojně využívány. Je to z důvodu, že nemusí být vyráběna drahá matečná forma pro vstřikování vosku, ale model se vytiskne metodou FDM nejčastěji z ABS plastu. Takto vytisknutý model je dokonce pevnější než voskový. Jelikož vytisknutý model nemá zrovna dokonalou přesnost a strukturu povrchu, tak se před obalování keramikou buď brousí, nebo je ponořen do rozpouštědla, které povrch vyhladí. Model z ABS plastu se nevytavuje jako vosk, ale ve skořepině shoří. Ve skořepině poté vznikne popílek, který je nutno odstranit vypláchnutím skořepiny. Proces žíhání formy a odlévání je již stejný jako při použití voskových modelů. Při výrobě prototypových odlitků lze dosáhnout až 80% úspory času a nákladů než při použití kovové vstřikovací formy.



Obr. 23 : Matečná forma [36]

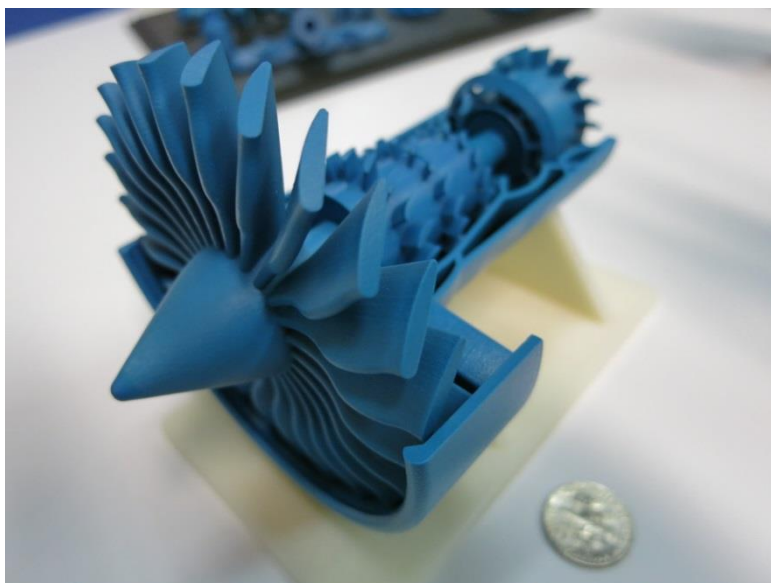


Obr. 24 : Model z ABS plastu a
výsledný odlitek [38]

Solidscape [39, 40, 41]

Solidscape je americká firma založena roku 1994, která se zabývá prodejem a vývojem 3D tiskáren pracujících s voskem. Tyto tiskárny jsou velice přesné a nacházejí uplatnění ve slévárnách přesného lití, u výrobců šperků, ale také v lékařství. Vytisknuté modely z vosku lze jednoduše připájet ke vtokové soustavě a poté se již můžou nanášet vrstvy keramického prášku, které vytvoří skořepinu. Vosk se poté vytaví, skořepina se vyžihá a může se odlévat. Z důvodu vysoké přesnosti může tisk zabrat i několik desítek hodin, na druhou stranu je ale stroj bezobslužný a dokonce mu nevádí ani krátkodobý výpadek proudu.

Princip zařízení spočívá v nanášení dvou různých vosků (stavební a podpůrný) na stavební podložku. Tyto vosky jsou dodávány v granulích a lze je kdykoliv během tisku doplnit do zásobní nádoby. V nádobě se granule rozpustí a vosk poté putuje přímo do piezoelektrických trysek. Pokud se granule vosku doplňují během tisku, tisk je pozastaven a stroj počká, až se všechny granule rozpustí, poté zkontroluje provozní teploty a může pokračovat v tisku. Pohyb tiskové hlavy v osách X,Y je zajištěn pomocí krokových motorů v ose Z pohyb zajišťuje mikrometrický šroub. První dvě vrstvy na pracovní podložce jsou z podpůrného materiálu. Vrstva může mít tloušťku od 12,7 do 76 μm a po vytisknutí každé vrstvy se povrch zarovná pomocí frézy s vodorovnou osou rotace, kde nastavený úběr materiálu definuje právě tloušťku jednotlivé vrstvy. Zařízení po každé dokončené vrstvě kontroluje prostupnost trysek vytisknutím kontrolního křížku na papírový pásek, který kontroluje optickým senzorem. Po vytisknutí se celá součást ponoří do speciální lázně, v níž je teplota udržovaná na 50 °C a podpůrný vosk se zcela vytaví. Poté je již model připraven k dalšímu kroku, což je obalování keramickou směsí.



Obr. 25: Model turbíny vyrobený z vosku v zařízení
SolidScape Max2 [41]

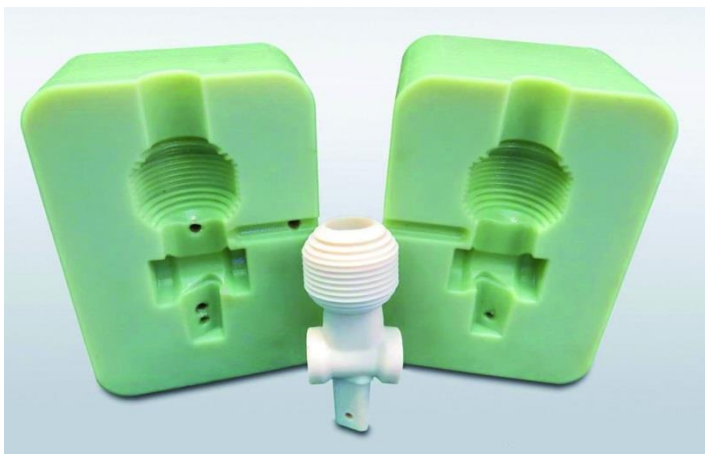
Replicast [42, 43]

Replicast je proces vynalezený společností Casting Technology International. Tento proces využívá keramickou skořepinu, která je vytvořena pomocí polystyrenového modelu. Polystyrenový model lze vytvořit obráběním kvádrů anebo za pomoci systému RP. Například firma EOS nabízí pro své tiskárny práškový materiál na bázi polystyrenu nazvaný PrimeCast 101. Tento prášek je vytvrzován v tepelné komoře za pomoci laseru stejně tak jako u metody SLS. Takto vytisknutý model dosahuje vysoké rozměrové přesnosti a kvality povrchu a proto se používá pro skořepinové lití. Polystyrenové modely lze snadno lepit do stromečku anebo větší modely jsou vyrobeny již s vtokovou soustavou. Před odléváním je polystyrenový model spálen.

4.3 Skořepinová forma — výroba silikonové formy

Soft Tooling [44, 45]

Tato metoda spočívá ve vytvoření uretanové formy, která je určena pro výrobu několika kusů nebo malé série voskových modelů (1 - 100). Nejprve se pomocí některé z metod RP (SLA, FDM, PolyJet, ...) vytvoří přesný model, který se následně zalije hmotou na bázi uretanů. Těchto hmot je celá řada a každá má různé vlastnosti. Tímto



Obr. 26: Příklad uretanové formy [46]

procesem vznikne jednoduchá forma, do které lze odlévat vosk. Jedná se o velmi jednoduchou a levnou metodu, kterou lze získat voskový model.

5 METODY RP VYUŽITELNÉ PŘI VÝROBĚ TRVALÝCH FOREM

[47]

Pro výrobu trvalých forem nazývaných kokily se používají RP metody pracující s práškovým kovovým materiálem. Ten je různými způsoby natavován do požadovaného tvaru. Pomocí těchto metod lze též vytisknout funkční součásti. Metoda DMLS pracuje s laserovým paprskem a prášek je vytvrzovaný ve vrstvách, metoda LENS pracuje s přidáváním kovového prášku do tekutého kovu. Tyto metody jsou však omezeny velikostí tisknutých součástí a také životností těchto forem, které sotva přesáhnou 10 000 odlití.

Direct Metal Laser Sintering (DMLS) [1, 24, 48, 49]

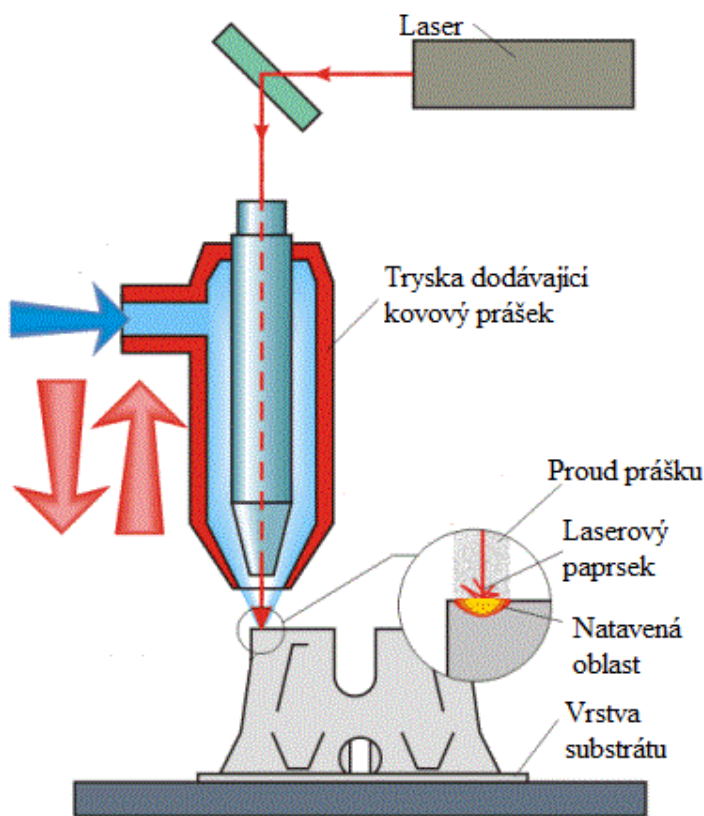
DMLS je aditivní proces výroby součástí z kovového prášku. Tato metoda byla vyvinuta v roce 1995 německou firmou EOS. Proces začíná rozřezáním 3D CAD modelu na jednotlivé vrstvy (formát STL) a načtením do systému stroje. Pracovní proces začne roznesením materiálu na stavební platformu pomocí keramického bříty a poté již laser může začít vytvrzovat konturu vytvářené součásti. Tloušťka vrstvy se pohybuje od 0,02 do 0,04 mm a ovlivňuje přesnost a čas výroby. Pro vznik další vrstvy se stavební platforma sníží o jednu vrstvu, nanese se nová vrstva prášku a proces se opakuje až do vytvoření celé součásti. V průběhu stavby součásti se staví také podpůrná struktura, která fixuje vytvářenou součást společně se stavební podložkou. Celý proces probíhá v uzavřené komoře, která je vyplněna dusíkem, a to z důvodu ochrany vytvářené součásti proti oxidaci. Po ukončení procesu výroby se součást vyjme, očistí se a odstraní se podpůrná struktura. Poté se povrch součástí tryská, brousí, leští nebo obrábí, aby bylo dosaženo požadované rozměrové přesnosti. Tolerance tvaru součásti je v rozmezí $\pm 0,1$ mm. Nespotřebovaný prášek je znovu použit pro další výrobu. Rozdíl mezi metodami SLS a DMLS je, že metoda SLS používá kovový prášek obalený polymerem a jednotlivé zrna se spékají dohromady právě pomocí polymeru. Metoda DMLS spéká přímo kovová zrna mezi sebou.



Obr. 27: Součásti vyrobené metodou DMLS [49]

Laser Engineered Net Shaping (LENS) [1, 50]

Tato metoda byla vyvinuta výzkumnou institucí Sandia National Laboratories okolo roku 1995. Proces výroby modelu začíná nasměrováním laseru na kovový substrát, který se nachází na pohyblivé podložce. Stavební podložka se pohybuje v souřadnicích X,Y. Pomocí laseru se tento substrát roztaví a soustavou trysek, které obklopují laser, je zde pomocí inertního plynu dopraven kovový prášek. Jako plyn se nejčastěji používá argon, který také tvoří ochranou atmosféru celého procesu. Natavený materiál tuhne okamžitě po opuštění místa laserem. Po vytvoření jedné vrstvy se celá laserová hlava posune o tloušťku jedné vrstvy směrem nahoru a proces se opakuje, než vznikne celý model. Vytvořené modely mají vynikající materiálové vlastnosti, ale s velikostí modelu se také zvětšuje nepřesnost, která je větší než u metody DMLS. V procesu lze využívat širokou škálu materiálů od nerezových až po slitiny na bázi titanu nebo niklu. Výsledné modely mají dokonce lepší metalurgické a mechanické vlastnosti než zhotovené konvenčními způsoby.



Obr. 28: Schéma zařízení – LENS [50]

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo získání literárního přehledu nejmodernějších metod zhotovení prototypových odlitků. V současné době se pro výrobu prototypových odlitků využívají systémy nesoucí jednotný název Rapid Prototyping. Od prvního uvedení systému Stereolitografie je to 30 let a mezitím proběhl obrovský vývoj a vznik velkého množství nových metod. Dříve byly tyto systémy velmi nákladné a mohli si je dovolit jen vývojové laboratoře. V dnešní době se systémy stávají cenově dostupnějšími a můžeme sledovat jejich využití ve stále více oborech včetně slévárenství.

Na začátku práce je obecně popsán princip RP, který spočívá v aditivním procesu a je zde také uvedeno srovnání s obráběním. Poté je vysvětlen postup výroby součásti pomocí systémů RP, ten se skládá ze tří základních kroků (preprocessing, processing, postprocessing). Dále jsou metody rozděleny podle používaného materiálu do tří skupin a z každé skupiny je zde popsána nejvýznamnější metoda. Jako první je popsána Stereolitografie, která pracuje s materiálem v tekuté formě a je to dokonce první metoda RP, která vznikla. Další popsána metoda je SLS a ta pracuje s materiálem ve formě prášku, který může být vyroben z mnoha materiálů (kov, plast, sklo). Jako poslední je vysvětlena metoda FDM a ta pracuje s pevným materiálem, který je ve formě drátu namotán na cívce upevněné na stroji.

Další část práce je již věnována využitím systému RP ve slévárenství. Nejprve jsou popsány slévárenské formy, které se dělí na trvalé a netrvalé. Dále je popsána také možnost využití přímé výroby součásti z kovu. Netrvalé formy jsou dále rozděleny na pískové a keramické skořepinové. Jako první jsou popsány systémy RP pro přímou výrobu pískové formy, ty pracují buď s pojivem anebo s laserem, který spéká jednotlivé zrna písku k sobě. Následně jsou popsány systémy, které dokáží vytvořit houževnatý model vhodný k zaformování. Konkrétně to je systém LOM, který pracuje s pevným materiálem a výsledný model má vlastnosti jako ze dřeva a systém PolyJet, který je velmi podobný Stereolitografii. V další části je popsána technologie přesného lití a hned poté jsou popsány systémy vhodné pro přímou výrobu keramické skořepiny, systémy vytvářející vytavitelný nebo spalitelný model (FDM, Solidscape) a taky je zde uvedena metoda Soft Tooling, což je uretanová forma vyrobená z trvalého modelu. Jako poslední jsou v práci uvedeny systémy pro výrobu trvalých forem, jsou to systémy vytvrzující práškový kov (DMLS, LENS).

Využití systémů RP při výrobě prototypových odlitků je více než vhodné. Slévárna využívající některý ze systémů RP, bude vždy o krok napřed oproti slévárně, která takový systém nevlastní. Je to dáno rychlostí dodání prvního prototypového odlitku, ale také ušetřenými náklady na výrobu matečné formy, případně jejími opravami.

SEZNAM ZDROJŮ A LITERATURY

- [1] BENIAK, Juraj. *Systémy Rapid Prototyping*. 1. vydanie. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-4287-0.
- [2] PAGÁČ, Marek. Jak připravit kvalitní a přesný model pro 3D tisk. In: *Mujsolidworks* [online]. 2015 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.mujsolidworks.cz/jak-pripravit-kvalitni-a-presny-model-pro-3d-tisk/>
- [3] *Rapid Prototyping: An Overview* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm
- [4] Timeline [online]. 2014 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2014/02/timeline.png>
- [5] Emendo STL file. *Avante Technology* [online]. [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://www.avante-technology.com/wp-content/uploads/2014/11/Emendo-logo-1.png>
- [6] Encyklopedie 3D tisku. *Aditivní výroba & Rapid Prototyping* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/encyklopedie-3d-tisku/>
- [7] *Rapid Prototyping: An Overview* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm
- [8] *Helium Cadmium (HeCd) Lasers Information* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.globalspec.com/learnmore/optical_components_optics/lasers/helium_cadmium_hecd_lasers
- [9] PALERMO, Elizabeth. What is Stereolithography? In: *Livescience* [online]. 2013 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/38190-stereolithography.html>
- [10] *How it Works: Stereolithography* [online]. 2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/blog/how-it-works-stereolithography/>
- [11] *Stereolithography* [online]. 2009 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- [12] PALERMO, Elizabeth. What is Selective Laser Sintering? In: *Livescience* [online]. 2013 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/38862-selective-laser-sintering.html>
- [13] *SLS-Selective Laser Sintering* [online]. 2015 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <https://www.novomet.ru/eng/company/technologies-and-manufacturing/sls-selective-laser-sintering/>
- [14] *Selective Laser Sintering* [online]. 2009 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
- [15] *Fused Deposition Modeling (FDM)* [online]. 2009 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>

- [16] *International Journal of Research in Engineering and Technology: SAND CASTING: CONVENTIONAL AND RAPID PROTOTYPING MANUFACTURING APPROACHES*. 2014, **2014**(03). ISSN 2319-1163
- [17] 3D printing. *Advanced equipment manufacturing* [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.pfiaem.com/additive-manufacturing/3d-printing/>
- [18] CHRÁST, J. ZAŘÍZENÍ NA VÝROBU FOREM ZE SMĚSÍ POJENÝCH BENTONITEM. *Slévárenství*. 2008, **2007**(11-12), 511-522. ISSN 0037-6825.
- [19] HORÁČEK, Milan. *ROZMĚROVÁ PŘESNOST ODLITKŮ VYRÁBĚNÝCH METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU* [online]. Brno, 2009 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>
- [20] *Písková slévárna (bentonit) – popis výroby* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.unitherm.cz/cs/piskova-slevarna/popis-vyroby/>
- [21] BARTOŠ, Filip. *TECHNOLOGIE ZHOTOVENÍ ODLITKŮ "NA HOTOVO"*. Brno, 2010. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.
- [22] *Kokilové lití* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.silesia-tech.cz/kokilove-liti>
- [23] Uplatnění 3D ve slévárenství - Seminář. *MCAE 3D digitální technologie* [online]. [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/uplatneni-3d-technologie-ve-slevarenstvi>
- [24] Jak funguje 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering. *Konstruktor* [online]. 2015 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.konstruktor.cz/2015/03/09/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>
- [25] What is Binder Jetting? *ExOne* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.exone.com/Resources/Technology-Overview/What-is-Binder-Jetting>
- [26] Binder jetting. *3D Printing - 3D Printers - Additive Manufacturing* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [27] *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology: Laser Sintering of Silica Sand – Mechanism and Application to Sand Casting Mould*. Springer London, 2003, **2003**(21). ISSN 1433-3015.
- [28] *Voxeljet* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.voxeljet.de/en/>
- [29] *Stratasys* [online]. 2016 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com>
- [30] Polyjet Technology. *The world of 3dprinters* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: [http://www.theworldof3dprinters.com/methods-of-printing/#Polyjet Technology](http://www.theworldof3dprinters.com/methods-of-printing/#Polyjet%20Technology)
- [31] MÜLLER, Bernhard. Rychlá výroba odlitků otevírá nové možnosti použití. *Slévárenství*. 2008, **2008**(1-2), 34-37. ISSN 0037-6825.

- [32] PALERMO, Elizabeth. What is Laminated Object Manufacturing? In: *Livescience* [online]. 2013 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>
- [33] *Laminated Object Manufacturing (LOM)* [online]. 2009 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
- [34] KLOCKE, F. a C. ADER. *DIRECT LASER SINTERING OF CERAMICS* [online]. In: . [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2003/2003-43-Klocke.pdf>
- [35] DSPC (Direct Shell Production Casting). *Engineer's Handbook* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.engineershandbook.com/RapidPrototyping/dspcrt.htm>
- [36] Investment Cast Foundry. *Parrish Manufacturing Group* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.parrishmfg.com/services/investment-cast-foundry/>
- [37] *TECHNICAL APPLICATION GUIDE: Investment Casting with FDM Patterns* [online]. In: . Stratasys Inc., 2011, s. 1-11 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Secure/Applications/Investment%20casting/Technical%20application%20guide%20-%20Investment%20casting.pdf?v=635533899308787140>
- [38] Upgrade a Centuries-Old Manufacturing Technique with FDM. *Stratasys Direct Manufacturing* [online]. 2014 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/blog/fdm-investment-casting/>
- [39] *SolidScape High precision 3D printers* [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.solid-scape.com/>
- [40] BUK, Václav a Karel HEINIGE. SolidScape T76 Benchtop – 3D tiskárna pro puntickáře. In: *CAD.cz* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/hardware/78-hardware/1532-solidscape-t76-benchtop-3d-tiskarna-pro-puntickare.html>
- [41] The SolidScape Max2 High Precision 3D Printer has arrived at Bold Machines. *Bold Machines* [online]. 2014 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.boldmachines.com/blog/2014/9/25/the-solidscape-max2-high-precision-3d-printer-has-arrived-at-bold-machines>
- [42] *EOS Plastic Materials for Additive Manufacturing* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.eos.info/material-p>
- [43] *Replicast®* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.castingstechnology.com/public/services/specialprocesses/scpreplicastmain.asp>
- [44] What's the Difference Between Soft and Hard Tooling? *3D Printing & Rapid Prototyping - The Technology House* [online]. 2015 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.tth.com/whats-difference-soft-hard-tooling/>
- [45] Soft Tooling vs. Hard Tooling. *Blog | Stratasys Direct Manufacturing* [online]. 2015 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/blog/soft-tooling-vs-hard-tooling/>

- [46] Prototyping | Urethane Molds and Cast Parts. *Enhance Product Development* [online]. 2015 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://enhancepd.com/blog/prototyping-urethane-molds-and-cast-parts/>
- [47] KAPEL, Denise. Quick-turn castings. *Modern Casting*. 2013, **2013**(January), 37-41.
- [48] Direct Metal Laser Sintering (DMLS). *Stratasys* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/resources/direct-metal-laser-sintering-dmls/>
- [49] *Industrial Production Systems for Metal Additive Manufacturing* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.farinia.com/additive-manufacturing/3d-technique/metal-additive-manufacturing-production-systems>
- [50] *Major RP Technologies* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.uni.edu/~rao/rt/major_tech.htm

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

CAD	Computer Aided Design
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DSPC	Direct Shell Production Casting
FDM	Fused Deposition Moulding
LOM	Laminated Object Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
SLA	Stereolitography
SLS	Selective Laser Sintering

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1: Srovnání obrábění s metodou rapid prototyping [1]	9
Obr. 2: Součást ve formátu STL [5].....	9
Obr. 3: Proces výroby prototypové součásti [1]	10
Obr. 4: Historie systémů RP [4].....	10
Obr. 5: Vytvrzování modelu laserem [10].....	11
Obr. 6: Schéma zařízení – Stereolitografie [11]	12
Obr. 7: Spékání prášku pomocí laseru [13]	13
Obr. 8: Schéma zařízení – SLS [14].....	14
Obr. 9: Model s podporami a výsledný model po odstranění podpor [17].....	15
Obr. 10: Schéma zařízení – FDM [15]	16
Obr. 11: Možnosti využití RP ve slévárenství	17
Obr. 12: Odlévání do pískových forem [20].....	17
Obr. 13: Kokilové lití [22]	18
Obr. 14: Součást vyrobena metodou DMLS [24]	19
Obr. 15: Rozdělení výroby pískové formy	20
Obr. 16: Schéma zařízení - Binder Jetting [26]	21
Obr. 17: Vytisknuté pískové jádro [28].....	22
Obr. 18: Schéma zařízení – PolyJet Technology [30].....	23
Obr. 19: Schéma zařízení – Laminated object manufacturing [33]	24
Obr. 20: Princip technologie vytavitelného modelu [19]	25
Obr. 21: Rozdělení výroby keramické skořepiny	26
Obr. 22: Časová úspora při využití systému RP [34].....	27
Obr. 23 : Matečná forma [36]	28
Obr. 24 : Model z ABS plastu a výsledný odlitek [38]	28
Obr. 25: Model turbíny vyrobený z vosku v zařízení Solidscape Max2 [41].....	29
Obr. 26: Příklad uretanové formy [46]	30
Obr. 27: Součásti vyrobené metodou DMLS [49]	31
Obr. 28: Schéma zařízení – LENS [50].....	32
Tab. 1: Výhody a nevýhody Stereolitografie	12
Tab. 2: Výhody a nevýhody metody SLS.....	14
Tab. 3: Výhody a nevýhody metody FDM.....	16