

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R016 Strojírenská technologie – technologie obrábění

Bakalářská práce

Technologické aspekty stavby kovových součástí metodou
rapid prototyping

Autor: **Veronika Čapková**
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Jan Řehoř, PhD.**

Akademický rok 2012/2013

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Čapková	Jméno Veronika	
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie – technologie obrábění		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Řehoř, PhD.	Jméno Jan	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Technologické aspekty stavby kovových součástí metodou rapid prototyping		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	61	TEXTOVÁ ČÁST	44	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce je zaměřena na technologii Rapid Prototyping pro výrobu převážně kovových součástí. Cílem je zjistit výrobce 3D tiskáren pro tisk kovových součástí, zjistit pro jaký okruh odběratelů se tyto tiskárny hodí a podrobně popsat technologii kovového tisku.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Rapid prototyping, 3D tisk, technologie, metoda, 3D tiskárna, DMLS, SLS

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Čapková	Name Veronika	
FIELD OF STUDY	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Řehoř, PhD.	Name Jan	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Technological aspects of the construction of metal parts using rapid prototyping		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	61	TEXT PART	44	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The focus of the Bachelor's work is Rapid Prototyping for manufacturing mostly metal components. The goals of the work are to identify the companies which make 3D printers with the capabilities of printing metal components, identify the purchasers of these 3D printers, and specify for what kind of consumers are these 3D printers beneficial and describe in detail the process of the metal printing.
KEY WORDS	Rapid prototyping, 3D printing, technology, method, 3D printer, DMLS, SLS

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat panu Doc. Ing. Janu Řehořovi PhD. za odborné vedení a cenné rady při tvorbě této bakalářské práce, slečně Ing. Jaroslavě Fulemové, slečně Ing. Ivaně Česákové a v neposlední řadě mé rodině, za její podporu při studiu.

Tato bakalářská práce vznikla za podpory projektu ESF OP VpK „Posílení spolupráce mezi vysokými školami, výzkumnými ústavy a průmyslovými partnery v Plzeňském kraji - CZ.1.07/2.4.00/17.0052“. Tento projekt napomohl při propojení výstupů bakalářské práce mezi aplikačním a akademickým prostředím.

Obsah

ÚVODNÍ SLOVO	10
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	11
1.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE	11
1.2 HISTORICKÝ VÝVOJ	12
1.3 VYUŽITÍ TECHNOLOGIE RP	13
1.3.1 Oblasti využití RP	13
1.3.2 Výhody a nevýhody RP	14
2 PŘEHLED SOUČASNÝCH METOD STAVBY KOVOVÝCH A NEKOVOVÝCH SOUČÁSTÍ A JEJICH UPLATNĚNÍ.....	15
2.1 METODY VÝROBY RP PRO POLYMERŇÍ MATERIÁLY	15
2.1.1 Stereo Lithography (SLA) – vytvrzování vrstev tekutého polymeru	15
2.1.2 Selective Laser Sintering (SLS) – spékání práškového materiálu pomocí laseru	17
2.1.3 Laminated Object Manufacture (LM, LOM) - vrstvení lepidivého materiálu	18
2.1.4 Solid Ground Curing (SGC) – vytvrzování fotocitlivého polymeru	19
2.1.5 Fused Deposition Modeling (FDM) – nanášení vlákn z termoplastu	20
2.1.6 Model Maker 3D Plotting – nástřik kapek termoplastu pomocí dvou hlav.....	21
2.1.7 Ballistic Particle Manufacturing – nástřik kapek termoplastu pomocí jedné hlavy	21
2.1.8 Multi-Jet Modelling - tisk vrstev pomocí termopolymeru	22
2.2 METODY VÝROBY RP PRO NEPOLYMERŇÍ MATERIÁLY	22
2.2.1 Multiphase Jet Solidification (MJS) – nanášení pomocí trysky	23
2.2.2 Direct Shell Production Casting (DSPC) – selektivní spojování pojivem	23
2.2.3 ProMetal 3D Printing – slinování kovového prášku	24
2.2.4 Direct Laser Forming (DLF) – nanášení kovového prášku.....	24
2.3 OSTATNÍ METODY RP	25
2.3.1 Hot Plot.....	25
2.3.2 Shape Melting	25
2.3.3 Printed Computer Tomography (PCT).....	25
3 PŘEHLED VÝROBNÍCH ZAŘÍZENÍ PRO STAVBU KOVOVÝCH SOUČÁSTÍ A JEJICH MOŽNOSTÍ SE ZAMĚŘENÍM PŘEDEVŠÍM NA KVALITU A PRODUKTIVITU.....	26
3.1 3D TISKÁRNY.....	26
3.1.1 3DSystems	26
3.1.2 Arcam.....	29
3.1.3 EOS.....	31
3.2 SHRŇUTÍ 3D TISKÁREN	33
3.4 POROVNÁNÍ TISKÁREN.....	34
4 PODROBNÝ ROZBOR STAVBY KOVOVÝCH SOUČÁSTÍ	35
4.1 SLS – SELECTIVE LASER SLITERING.....	35
4.1.1 Pracovní prostor	36
4.1.2 Výrobní parametry	37
4.1.3 Materiály vhodné pro SLS	37
4.2 DMLS – DIRECT METAL LASER SINTERING	38
4.2.1 Výhody, nevýhody	40
4.3 LENS – LASER ENGINEERED NET SHAPING	41
5 POROVNÁNÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ S TVÁŘENÝMI A ODLĚVANÝMI MATERIÁLY	42

5.1 TITAN	42
5.1.1 Vlastnosti titanu	42
5.2 INCONEL	44
5.2.1 Vlastnosti inconelu.....	44
6 POROVNÁNÍ PROVOZNÍCH A VÝROBNÍCH NÁKLADŮ S NÁKLADY U OBRÁBĚNÝCH SOUČÁSTÍ	47
6.1 PŘÍKLADY SROVNÁNÍ OBOU TECHNOLOGIÍ.....	47
6.2 POROVNÁNÍ NÁKLADŮ PŘI OBRÁBĚNÍ A RP	48
6.3 VÝPOČET NÁKLADŮ PRO PROVOZ STROJE	49
6.4 PŘÍKLADY CEN.....	50
6.4.1 Rapid prototyping	50
6.4.2 CNC obrábění	52
7 ZÁVĚR	53
8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	55
9 SEZNAM OBRÁZKŮ	57
10 SEZNAM PŘÍLOH.....	58
11 PŘÍLOHY.....	59

Seznam symbolů a zkratk

RP – Rapid prototyping

SLA - Stereo Lithography

SLS - Selective Laser Sintering

LOM - Laminated Object Manufacture

SGC - Solid Ground Curing

FDM - Fused Deposition Modeling

DSPC - Direct Shell Production Casting

BPM - Ballistic Particle Manufacturing

PCT - Printed Computer Tomography

MJS - Multiphase Jet Solidification

DLF - Direct Laser Forming

PCT - Printed Computer Tomography

DMLS - Direct Metal Laser Sintering

LENS - Laser Engineered Net Shaping

CAD - Computer aided design

CAM - Computer aided manufacturing

CNC - Computer Numeric Control

Úvodní slovo

V současné době je technologie Rapid Prototyping (RP) neboli 3D tisk čím dál tím více žádanou. Tato technologie se stala již poměrně běžně používanou výrobní technologií a je možné se s ní setkat v řadě průmyslových odvětví. Přestože se stále jedná o poměrně mladou metodu, metody na principu RP jsou stále ve vývoji. Hlavním smyslem RP je vytvořit z digitálního modelu model reálný a to co za nejkratší dobu a v co nejvyšší kvalitě. Asi největší výhodou této metody je schopnost výroby velice komplikované geometrie, která by se konvenčními metodami vyráběla jen těžko.

V úvodu této bakalářské práce se věnuji vysvětlení významu pojmu RP, stručnému popisu historie technologie, jejímu využití, výhodám a nevýhodám. Následuje stručný popis metod výroby pro polymerní a nepolymerní materiály. Dále se zabývám zařízeními pro 3D tisk, převážně jejich popisem a použitím. V následující části se dostávám k podrobnému popisu metod pro tisk kovových součástí, konkrétně technologií SLS, DMLS a LENS. Po této kapitole se dostáváme k porovnání materiálových vlastností RP s tvářenými a odlévanými materiály. U tohoto bodu jsme si zvolila k porovnání materiály titan a inconel. V poslední části této bakalářské práce se věnuji porovnání provozních a výrobních nákladů s náklady u CNC obrábění. Zde jsem shromáždila faktory, které značně ovlivňují náklady a také příklady cen 3D tisku u různých materiálů.

Jako cíle této bakalářské práce jsem si zvolila zjistit výrobce 3D tiskáren pro kovové součásti, dále zjistit, pro jaký okruh odběratelů se tyto tiskárny hodí a na závěr popsat technologii kovového tisku.

1 Úvod do problematiky

1.1 Základní informace

Rapid prototyping neboli 3D tisk je moderní technologie, která se používá pro tvorbu kovových či nekovových součástí. Rapid prototyping (RP) = snadné vytvoření modelu, Rapid = rychlý, Prototyping = prototyp. Tato metoda je velice vhodná pro výrobu velice složitých součástí a dílů, které by se klasickými metodami vyráběli jen těžko. Dá se však používat i pro jednoduché tvary jako jsou například koule, válce, krychle a podobně. Touto metodou je možno i odsimulovat budoucí funkční vlastnosti výrobku, jeho schopnosti atd.

Samotná výroba závisí na tvorbě součásti v CAD systému nebo načtení součásti prostorovým scannerem. Součást je transformována do vhodného formátu a následně nahrána do 3D tiskárny, která ji následně vyrobí. Tato metoda přináší velké plus například pro konstruktéry, vývojáře apod., protože díky ní si mohou v reálu vyzkoušet své nápady a případně odhalit slabiny a součást lépe vyřešit. Po několika opravách tak mohou dosáhnout perfektní podoby výrobku. Je tedy logické, že dojde jak k úspoře financí, tak času.

Hlavní rozdíl mezi technologií rapid prototyping a klasickými metodami obrábění spočívá v tom, že při výrobě součásti nedochází k odebrání materiálu, jako například u soustružení, ale k jeho přidávání. Při výrobě metodou rapid prototyping je součást rozdělena na tenké vrstvy o tloušťce setin až desetin milimetru. Po těchto vrstvách vzniká v 3D tiskárně finální 3D model.

Tato metoda neslouží jen k výrobě jednotlivých dílů, ale je schopna vytvářet i pohyblivé celky jako jsou například kinematické mechanismy, u kterých je následně možno ozkoušet rychlosti a zrychlení jednotlivých částí. Samotný proces RP se dá jednoduše zapsat do pěti bodů:

1. 3D modelování
2. Přeměna a přenos dat
3. Kontrola a příprava
4. Samotný proces výroby
5. Dokončovací operace [1], [2], [4]

1.2 Historický vývoj

Počátky 3D tisku sahají do druhé poloviny 20. století, kdy si v roce 1986 nechal Charles Hull patentovat technologii stereolitografie. Následně ve své firmě 3D Systems vyrobil první 3D tiskárnu pro širokou veřejnost, tzv. stereolitografický aparát SLA-1. V tu dobu se jim ještě neříkalo 3D tiskárny, avšak modely SLA se staly základním prvkem pro vývoj dnešních 3D tiskáren nebo CNC strojů. Stereolitografický aparát SLA-1 je možno vidět ve Fordově muzeu v Dearborn, Michigan.

Historický vývoj metody logicky závisel na vývoji počítače a počítačových aplikací. Protože cena počítačů postupem času prudce klesala, jejich zvyšující se počet ve firmách rozšířil používání CAD, CAM a CNC aplikací. Díky CAD aplikacím postupně vznikla již několikrát zmíněná metoda. Velkou roli ve vývoji hrály samozřejmě i výrobní systémy a vývoj materiálů. [5]

Velkým vývojem prošla i samotná výroba prototypů. Výroba se dá rozdělit do tří etap a to:

- a) Ruční výroba prototypu – doba výroby záležela na složitosti prototypu. Ty nebyly nějak zvlášť složité, jednalo se převážně o jednoduché součásti.
- b) Virtuální prototypy – jejich použití je velice časté. Jedná se především o CAD aplikace. Hlavní výhodou je, že pokud jsou známy bližší informace například materiálové vlastnosti, prototyp může být testován ve speciálním softwaru.
- c) Rapid prototyping – největší výhodou této metody je, že vznikne prostorový model.

1.3 Využití technologie RP

Již zmíněná metoda má velké množství využití:

- a) Prostorové zobrazení – pro zobrazení složitých součástí ve 3D.
- b) Kontrola součásti – velká výhoda je možnost kontroly výsledného tvaru.
- c) Vývoj součásti – navrhnout součást je možno v jakékoli fázi vývoje, následně ji vyrobit, popřípadě následně upravit.
- d) Optimalizace – možnost vybrat z konkurenčních výrobků ten nejlepší.
- e) Výroba – RP je možno použít i s další výrobou např. odlévání metodou spalitelného modelu
- f) Reverzní inženýrství – pokud neexistuje výrobní dokumentace, lze využitím například optického 3D scanneru vytvořit virtuální model existující součásti a ten použít pro RP. [1]

1.3.1 Oblasti využití RP

- a) Strojírenství – jak v oblasti lehkého, tak i těžkého strojírenství (konstrukce automobilů, lodí apod.)
- b) Stavebnictví - (architektura)
- c) Elektrotechnika
- d) Design
- e) Umělecká výroba – výroba replik cenných předmětů
- f) Lékařství – kardiologie (prostorové modely srdce), zubní lékařství (výroba otisků zubů), chirurgie (protézy)
- g) Spotřební průmysl – (hlavně obuvnický průmysl)
- h) Školství – (školní pomůcky) [1]

1.3.2 Výhody a nevýhody RP

a) Výhody

- výroba součástí s velmi složitou geometrií
- výroba i její příprava je převážně automatická
- rychlá příprava dat pro výrobu
- ve srovnání s konvenčními metodami je výroba rychlá a levná

b) Nevýhody

- není vhodné pro hromadnou výrobu
- vlivem vrstvení jednotlivých vrstev není povrch součásti hladký
- menší přesnost než u konvenčních metod
- omezené množství použití materiálů [1], [4]

2 Přehled současných metod stavby kovových a nekovových součástí a jejich uplatnění

2.1 Metody výroby RP pro polymerní materiály

Postupným vývojem metody se ve výrobě prosadilo několik technologií RP:

1. Stereo Lithography (SLA) - vytvrzování vrstev tekutého polymeru
2. Selective Laser Sintering (SLS) - spékání práškového materiálu pomocí laseru
3. Laminated Object Manufacture (LM, LOM) - vrstvení lepidivého materiálu
4. Solid Ground Curing (SGC) - vytvrzování fotocitlivého polymeru
5. Fused Deposition Modeling (FDM) - nanášení vlákna z termoplastu
6. Model Maker 3D Plotting - nástřik kapek termoplastu pomocí dvou hlav
7. Ballistic Particle Manufacturing - nástřik kapek termoplastu pomocí jedné hlavy
8. Multi-Jet Modelling - tisk vrstev pomocí termopolymeru [4]

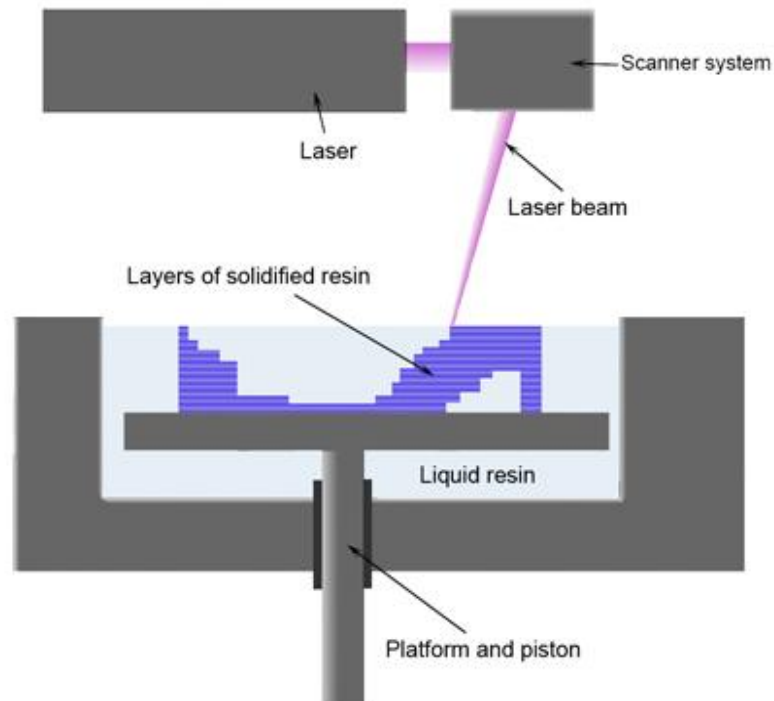
2.1.1 Stereo Lithography (SLA) – vytvrzování vrstev tekutého polymeru

Jedná se o nejstarší a nejpřesnější metodu RP, která byla v roce 1987 uvedena na trh firmou 3D Systems, Inc. SLA slouží k tvorbě 3D modelu z tenkého polymeru, který je velice citlivý na světlo. K vytvrzení jednotlivých vrstev polymeru dochází za pomoci ultrafialového záření.

Díky vysoké přesnosti, která se pohybuje okolo 0,05-0,2 mm/100 mm je tato metoda schopna vyrábět např. formy pro lití a vstřikování, výrobky s malými otvory atd.

Pomocí již dříve získaných informací o rozměrech a tvaru jsou vypočteny řídicí údaje. Tyto údaje vedou laserový paprsek pomocí skenovací hlavy nad nádobku s tekutým polymerem. Finální součást je vytvářena na pracovní (nosné) desce, která je na počátku výroby uložena pod tekutým polymerem.

Po výrobě jedné vrstvy dojde k jejímu vytvrzení. Následuje ponoření pracovní desky hlouběji do tekutého polymeru, kde vzniká tvorba další vrstvy. Protože při nanášení polymeru dochází ke vzniku nepřesností, je potřeba před vytvrzením jednotlivých vrstev přejet hladinu tzv. stěračem. Tento postup se nadále opakuje, následuje sejmutí výrobku z pracovní desky a vzniká tak výsledný 3D model. [4]



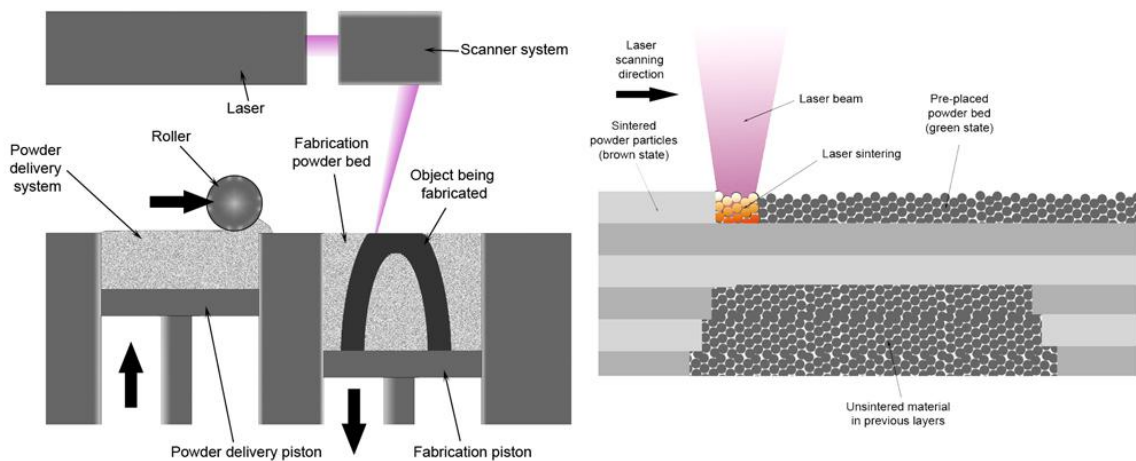
Obr. 1. Schéma zobrazení metody SLA [W1]

2.1.2 Selective Laser Sintering (SLS) – spékání práškového materiálu pomocí laseru

Další metodou RP je metoda SLS, která je charakteristická spékáním práškového materiálu pomocí laseru. K jejímu zrodu došlo na texaské univerzitě v Austinu. Pokud by došlo k porovnání modelu vyrobeného metodou SLA s modelem vyrobeným metodou SLS, tak hlavní rozdíl by byl v pevnosti součásti. Metoda SLA je charakteristická tím, že je schopna vyrobit modely velmi pevné. U SLS je prášek spékán do požadovaného tvaru pomocí CO₂ laseru.

Při výrobě součásti metodou SLS je práškový materiál nanášen po vrstvách na pracovní desku, která se nachází v interní atmosféře, jako je například dusík nebo argon. Podobně jako u metody SLA laserový paprsek řídí skenovací hlava, která se pohybuje podle vypočtených souřadnic nad práškovým materiálem, který je nasypán ve vaně.

V místě, kde laser působí na prášek, dochází k jeho spečení nebo roztavení a následnému ztuhnutí. Podobně jako u předcházející technologie součást vzniká vrstvu po vrstvě, které mohou mít tloušťku od 0,02 mm až několik desetin milimetru. Po výrobě jedné vrstvy se pracovní deska sníží o požadovanou hloubku jedné vrstvy. [4]



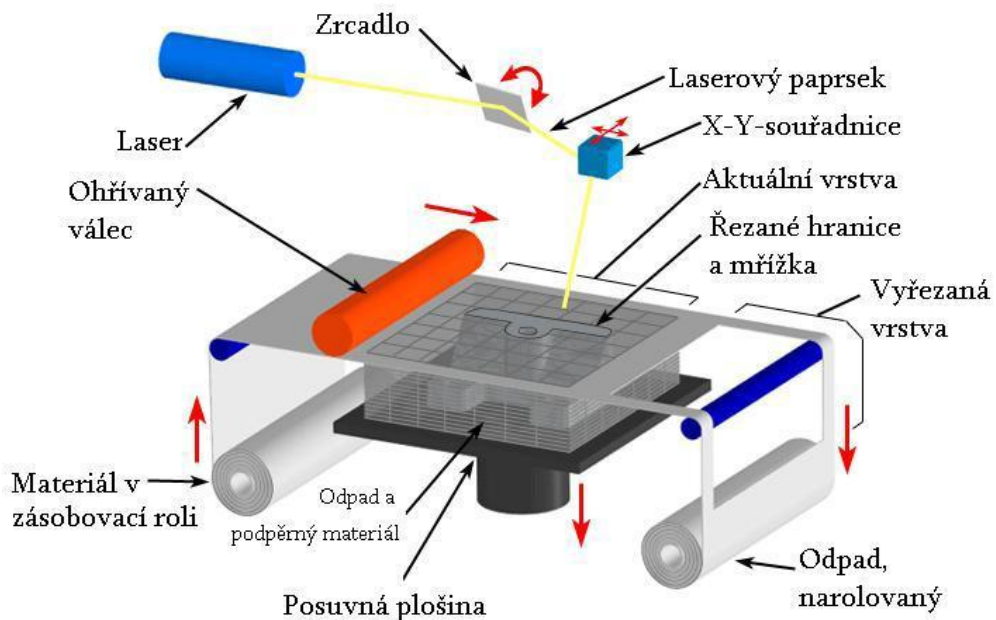
Obr. 2. Schéma zobrazení metody SLS [W1]

2.1.3 Laminated Object Manufacture (LM, LOM) - vrstvení lepidivého materiálu

Jedná se o metodu, která byla vyvinuta americkou firmou Helysis. Základem je vrstvení lepidivého materiálu. K výrobě předmětu se používá speciální plastová folie nebo papír, který je napuštěný speciální zpevňující hmotou. Jak folie, tak papír se na sebe postupně vrství a požadovaný tvar je vytvořen pomocí CO₂ laseru.

Samotná výroba probíhá tak, že se na nanesenou vrstvu natáhne papírová folie, která obsahuje složku polyetylenu. Tato folie je přitlačena vyhřátými válci, čímž dojde ke spojení obou vrstev. Výsledného tvaru docílíme pomocí již zmíněného laseru. Zbylá folie je laserem rozřezána na čtverce a posléze odstraněna. Tímto způsobem dochází k vytváření jednotlivých vrstev, až vznikne celá součást.

Předmět vytvořený touto metodou má podobné vlastnosti jako předmět ze dřeva. U této metody je velkou nevýhodou velké množství odpadu a jako výhodou je považována schopnost vytvářet součásti velkých rozměrů.

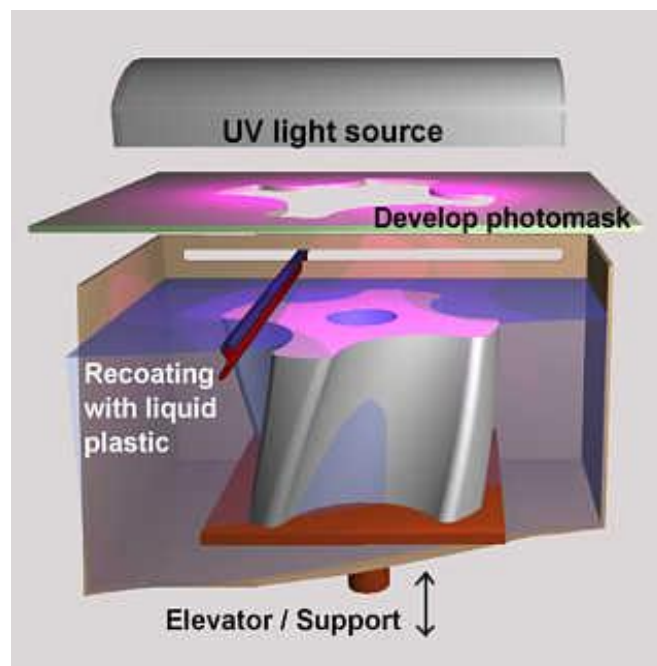


Obr. 3. Ukázka výroby součásti metodou LOM [W1]

2.1.4 Solid Ground Curing (SGC) – vytvrzování fotocitlivého polymeru

Technologii SGC poskytuje firma Cubital Ltd. Tato firma nabízí zařízení Solid 4600 a Solid 5600. Zásadní rozdíl mezi těmito zařízeními je v objemu výroby, který umožňuje vyrobit. Solid 4600 je charakteristický svými základními vlastnostmi a nastavením pro SGC. Na rozdíl typ Solid 5600 má rozšířené nastavení a díky kterému je možno vyrobit složité součásti.

Samotná výroba probíhá tak, že fotocitlivý polymer je osvětlen UV lampou skrz negativní masku. Na této masce je tvar jednotlivé vrstvy. Následuje odsátí neosvícené vrstvy. Následně se použije vosk, který slouží k vyplnění volného prostoru mezi osvětleným materiálem a prostorem, kde se nachází neosvícený polymer. V posledním kroku dochází k odfrézování vrstvy na požadovanou tloušťku. Tento postup se neustále opakuje, dokud nedojde k vytvoření kompletní součásti. [28]



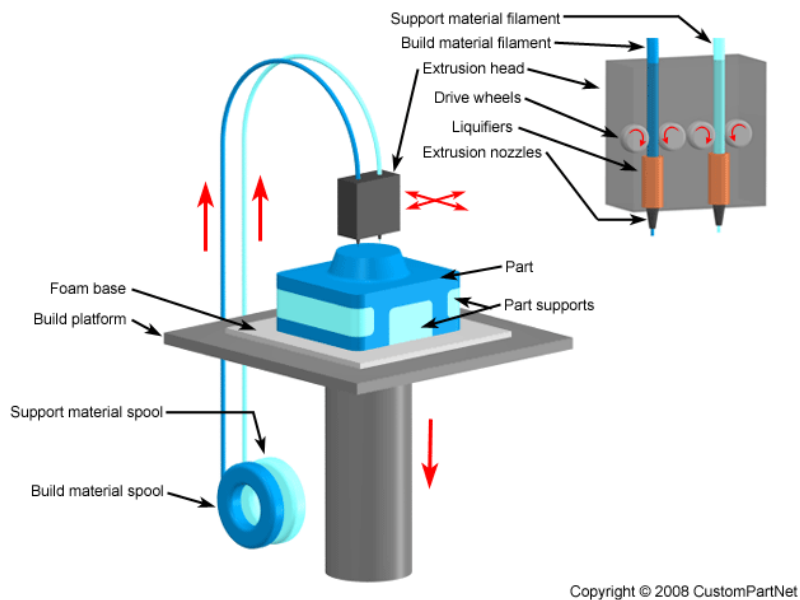
Obr. 4. Ukázka výroby součásti metodou SGC [W2]

2.1.5 Fused Deposition Modeling (FDM) – nanášení vlákna z termoplastu

FDM technologie byla vyvinuta více než před 20 ti lety firmou Stratasys, která byla založena v roce 1989. Od té doby docházelo v 3D tisku k výrobní revoluci. FDM patří po stereolitografii mezi jednu z nejpoužívanějších metod. Velkým plusem je, že je schopna vyrábět více než jen tradiční design. Výrobek je stavěn po malých vrstvách, jedna po druhé, od zdola nahoru.

Princip této metody spočívá ve vytlačování plastu nebo voskového materiálu z trysky. Na cívkách je navinut materiál modelu a materiál podpory modelu. Odtud se drát přesouvá do trysky, kde následně zkapalní a je vytlačen na požadované místo. Materiál je nanášen v tenké vrstvě a po jeho ztuhnutí je na něj nanesena vrstva další.

Takto popsaná výroba se provádí v komoře, kde je teplota o něco nižší, než je teplota roztaveného materiálu. Samotný model je vyráběn s materiálem podpor, které jsou následně vylamovány z modelu. Výrobek je tvořen na pěnové podložce, která je umístěna na základní desce. [2], [6]

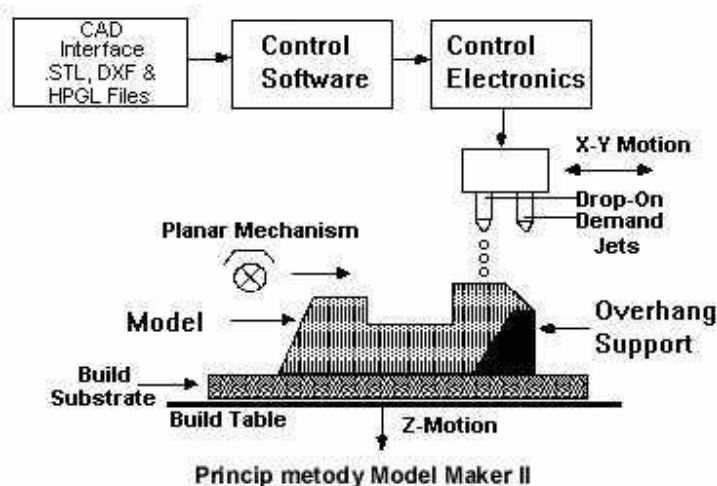


Obr. 5. Ukázka výroby součásti metodou FDM [W3]

2.1.6 Model Maker 3D Plotting – nástřik kapek termoplastu pomocí dvou hlav

Tato metoda je založena na podobném principu, jako používají klasické inkoustové tiskárny. Na pracovní plochu jsou nanášeny malé kapky termoplastu, které jsou vystřikovány z tlakové hlavy. Kapky mají průměr přibližně 0,076 mm a okamžitě tuhnou. Tím je možno vytvořit velice přesný model. Postupným nanášením začíná vznikat trojrozměrná součást. V tomto případě se pracuje se dvěma tiskovými hlavami.

První tisková hlava nanáší modelovací materiál a druhá materiál podpurný, který je po dokončení rozpuštěn v olejové lázni. Tisková hlava je schopna vystřelit 6000 – 12000 kapek za sekundu. Metoda Model Maker 3D Plotting je vhodná spíše pro menší modely, protože pracovní prostor má velikost maximálně 302 x 152 x 101 mm. Malé modely je po dokončení možno lepit lakem na nehty, větší modely lepidlem pro větší celky. Velké uplatnění mají výrobky u klenotníků a zubařů. [1]



Obr. 6. Ukázka výroby součásti metodou Model Maker 3D Plotting [W4]

2.1.7 Ballistic Particle Manufacturing – nástřik kapek termoplastu pomocí jedné hlavy

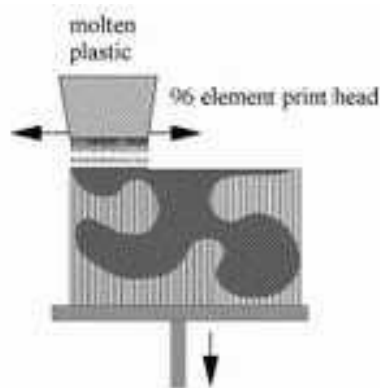
Technologie BPM byla vynalezena Billem Masterem, který si ji v roce 1987 patentoval. V roce 1988 založil společnost Perception Systems, Inc., kterou následně přejmenovanou na BPM Technology, Inc. Tato firma se zabývala vývojem BPM systému.

BMP pracuje na rozdíl od metody Model Maker 3D Plotting s jednou tiskovou hlavou. Tato hlava má 5 stupňů volnosti. Tryska míří kolmo k pracovní ploše, což vede ke vzniku součástí, které nepotřebují podpůrnou konstrukci. [1], [4]

2.1.8 Multi-Jet Modelling - tisk vrstev pomocí termopolymeru

U této metody, pomocí speciální tiskové pracovní hlavy, je termopolymer nanášen po tenkých vrstvách na pracovní plochu. Pracovní hlava má 96 trysek, které jsou uspořádány rovnoběžně vedle sebe. Velký počet trysek umožňuje rychlé a hlavně rovnoměrné nanášení materiálu. Průtok materiálu je pro každou trysku řízen pomocí programu.

Součást je vyráběna na nosné desce, nad kterou se pracovní hlava pohybuje ve směru osy X. Pokud je součást větší než pracovní hlava, posouvá se i v ose Y, aby byla vytvořena celá. Výhodou této metody je rychlé tuhnutí materiálu. [7]



Obr. 7. Ukázka výroby součástí metodou Multi-Jet Modelling [W4]

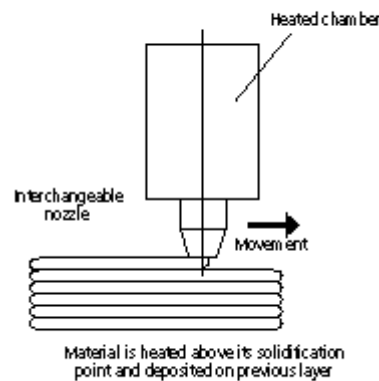
2.2 Metody výroby RP pro nepolymerní materiály

1. Multiphase Jet Solidification (MJS) – nanášení pomocí tryšky
2. Direct Shell Production Casting (DSPC) – selektivní spojování pojivem
3. ProMetal 3D Printing – slinování kovového prášku
4. Direct Laser Forming (DLF) – nanášení kovového prášku

2.2.1 Multiphase Jet Solidification (MJS) – nanášení pomocí trysky

Princip této metody spočívá v zahřívání materiálu, ze kterého bude součást vyráběna a jeho následného nanášení na pracovní desku. Materiál je uložen v zásobníku, obvykle ve formě prášku, buď čistého, keramiky nebo směsi kovu, případně keramiky s vhodným pojivem a následně je zahříván na teplotu, při které dosáhne požadované viskozity. Takto upravený materiál je vytlačován skrz ohřátou trysku pístovým systémem. Dochází tak k vytváření jednotlivých vrstev, které tuhnou a postupně tvoří celou součást. Pracovní cyklus je hodně podobný jako u technologie FDM. Metoda MJS umožňuje vyrábět součásti z ušlechtilých ocelí, titanu atd. [8]

Figure 2 Working principle of the MJS process



Obr. 8. Ukázka výroby součásti metodou MJS [W5]

2.2.2 Direct Shell Production Casting (DSPC) – selektivní spojování pojivem

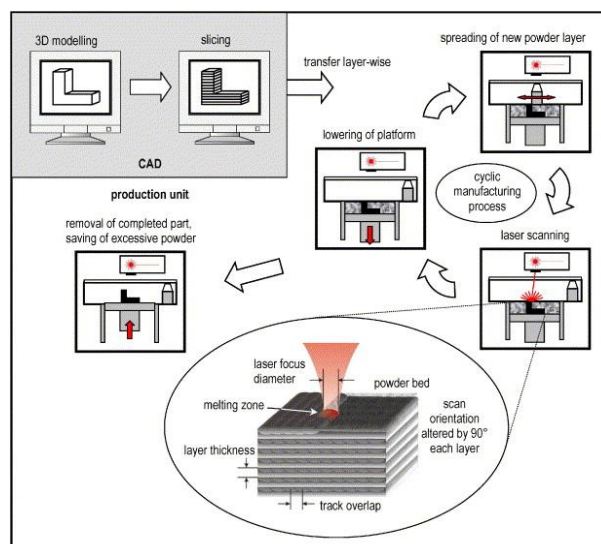
Technologie Direct Shell Production Casting (DSPC) se používá pro výrobu součástí z keramického prášku. Princip této technologie je hodně podobný technologii SLS. Jako výchozí materiál je používán keramický prášek, který je spojován s tekutým pojivem. U metody DSPC jsou jednotlivé vrstvy modelu vytvářeny z vrstev již zmíněného keramického prášku spojovaného tekutým pojivem, které jsou následně slinovány paprskem laseru. Nanášení pojiva se provádí pomocí Ink-Jet-tryskové hlavy, jejíž pohyb je řízen počítačem. [9]

2.2.3 ProMetal 3D Printing – slinování kovového prášku

Tuto metodu vyvinul institut MIT (Massachusetts Institute of Technology), který v roce 1997 prodal licenci této technologie společnosti Extrude Hone, známou vývojem povrchových úprav Abrasive Flow. Technologie ProMetal 3D printing je založena na postupném vrstveném inkoustovém tisku 3D předmětů. Jako materiály se používají ultra jemné kovové, keramické, cermetové a kompozitní prášky se speciálními pojivy. Technologie používá principu Ink-Jet počítačových tiskáren a tiskových hlav s vysokým rozlišením. Součástí technologie je slinování výrobku a jeho infiltrace kovem, čímž dosáhneme vysoké pevnosti a téměř 100 % hustoty. Při tepelném zpracování dochází k vyhoření pojiva a slnutí kovových prášků na porézní strukturu. Výhodou procesu je téměř jeho neomezená flexibilita, rychlost a schopnost přímé výroby funkčních dílů z CAD podkladů při vysoké přesnosti a reprodukovatelnosti výroby.

2.2.4 Direct Laser Forming (DLF) – nanášení kovového prášku

Technologie Direct Laser Forming (DLF) slouží k přímé výrobě kovových součástí z práškového materiálu. Princip metody spočívá v postupném nanášení kovového prášku, který je přiváděn do stopy paprsku laseru, kde je taven. Pohybem laseru v osách dochází k výrobě součásti po jednotlivých vrstvách.



Obr. 9 Ukázka výroby součásti metodou DLF [W6]

2.3 Ostatní metody RP

Technologie Rapid Prototyping má velké spektrum použití, proto nelze popisovat všechny metody podrobně. Je však řada dalších metod, které se liší použitým materiálem, technikou zařízení či způsobem stavby modelu apod. Ve své podstatě většina z nich pracuje podobně jako výše zmíněné. Proto bude jen stručně uveden seznam dalších metod.

2.3.1 Hot Plot

Princip metody je podobný jako u technologie LOM, ale k odřezávání se používá žhavá řezací elektroda.

2.3.2 Shape Melting

Jako stavební materiál jsou používány slitiny niklu. Tento roztavený kov je taven elektrickým obloukem a nanášen na příslušné místo. V podstatě se jedná o jakési postupné navařování součástí.

2.3.3 Printed Computer Tomography (PCT)

Jedná se o obdobu BMP, ale tato metoda je podstatně rychlejší.

3 Přehled výrobních zařízení pro stavbu kovových součástí a jejich možností se zaměřením především na kvalitu a produktivitu

3D tiskárna je zařízení, které vyrábí z digitálního modelu model reálný. Prvním krokem je vytvořit model v grafickém programu. Princip samotného tisku spočívá v rozložení digitálního modelu na jednotlivé vrstvy (vrstvy o tloušťce přibližně 0,15 mm), které jsou následně sestaveny ve fyzický model. Takto zhotovené modely je možné dále povrchově upravovat (například barvit atd.), opracovávat (například brousit, vrtat atd.) atd.

Pro 3D tisk se používají 3D tiskárny nebo 3D výrobní systémy. Hlavní rozdíl je ve velikosti modelů, které jsou schopny vyrobit a v technologiích, které je možno použít. 3D tiskárny jsou charakteristické tím, že se používají pro výrobu modelů a to o velikosti až 40 x 40 x 40 cm. Dají se použít například technologie FDM, SLA apod. Na rozdíl od 3D tiskáren se 3D výrobní systémy používají pro vysoce produktivní výrobu. Tato zařízení používají převážně technologii FDM a mohou vyrobit modely o velikosti 1x1x1 m. [3], [9]

3.1 3D tiskárny

Pro popis a zhodnocení 3D tiskáren pro výrobu kovových součástí byly vybrány, tři firmy, od kterých bylo čepáno. Jedná se o 3DSystems, Arcam a EOS.

3.1.1 3DSystems

3DSystems je předním světovým dodavatel 3D tiskáren, včetně osobních, profesionálních, výrobních 3D tiskáren a integrovaných tiskových materiálů. Dále poskytuje 3D CAD softwaru. 3D Systems již dlouho zaměřuje na poskytování vynikající technologie. Hlavním cílem této firmy je nahradit, doplnit a vytlačit tradiční vývoj a výrobní metody a snížit čas i náklady při navrhování nových výrobků tím, že tisknou skutečné díly přímo z digitálního vstupu. 3DSystems vyrábí tiskárny jak pro plast, tak pro kov. Následující částí bude zaměřena pouze na tiskárny, které vyrábějí kovové součásti.

Direct Metal Selective Laser Melting (SLM) je výrobní technologie, jejíž přítomnost roste ve zdravotnictví, letectví i elektrotechnice. Proces SLM využívá vysoce

výkonný laser k fixaci jemných kovových prášků, vytváří tak vrstvu po vrstvě přímo z CAD dat až vznikne celý model. Po každé vrstvě prášku systém uloží novou vrstvu prášku v rozmezí tloušťky 20 - 100 mikronů. Systém SLM využívá komerčně dostupný inertní plyn, který rozpráší kovový prášek do požadovaného tvaru součásti za použití materiálu jako je například titan, nerezová ocel a nástrojová ocel.

Společnost 3DSystems poskytuje pro výrobu kovových součástí dva typy tiskáren. sPro™ 125 Direct Metal a sPro™ 250 Direct Metal.

3.1.1.1 sPro™ 125 Direct Metal, sPro™ 250 Direct Metal

Tiskárny sPro™ 125 Direct Metal slouží pro výrobu kovových dílů až do délky 125 mm, mají vynikající povrchovou úpravu a velkým důrazem na detail a tolerance. Tato tiskárna je schopna pracovat s velkým množstvím slitin, včetně titanu či hliníku.



Obr. 10. Tiskárna sPro™ 125 Direct Metal[W7]

Výrobky mají uplatnění ve zdravotnictví (například zubní korunky, lékařské implantáty), lehké letecké díly, efektivní chladiče atd. Vlastnosti a výhody této tiskárny jsou spolehlivý práškový re-nátěrový systém, snadné odstranění podpůrné struktury, pokročilý digitální systém, vynikající povrchová úprava a snížení dokončovacích časů, jemná geometrie, vynikající mechanické vlastnosti, částí z různých ocelí, hliníku a slitin titanu.

Tiskárna sPro™ 250 Direct Metal slouží pro výrobu kovových dílů až do délky 320 mm. Svými vlastnosti je velice shodná s tiskárnou sPro™ 125 Direct Metal.



Obr. 11. Tiskárna sPro™ 250 Direct Metal[W8]

3.1.2 Arcam

Firma Arcam byla založena v roce 1997 a je uvedena na burze NASDAQ OMX Stockholm, Švédsko. Arcam nabízí jednoznačnou aditivní výrobní technologii EBM® pro výrobu kovových dílů. EBM® technologie staví kovové díly vrstvu po vrstvě z kovového prášku pomocí silného elektronového paprsku. EBM® proces probíhá ve vakuu za zvýšené teploty, která umožňuje dosažení prvotřídních materiálových, mechanických a chemických vlastností.

Od založení firmy Arcam zůstává vize stejná: schopnost vytvářet složité díly. Výrobní technologie je výsledkem intenzivního výzkumu a je využívána na lékařské implantáty, v leteckém a vojenském průmyslu. Kromě průmyslové aplikace EBM® technologie je také platforma používaná pro velmi aktivní akademický výzkum.

3.1.2.1 Arcam - A1, Arcam - A2

Zařízení Arcam-A1 je ideálním řešením pro tvorbu ortopedických implantátů. Je navržen tak, aby poskytoval maximální svobodu při návrhu a vysokou produktivitu. Implantáty jsou standardně vyráběny z titanu nebo chromových slitin. Arcam-A1 je nenovějším výrobním zařízením firmy. Proto na něj byl kladen vysoký důraz na již tak vysokou produktivitu EBM technologie a na zlepšení kvality povrchu. To bylo provedeno přes několik technických inovací, jako je například aktivní chlazení, nový vylepšený software atd. Při výrobě součásti dochází k roztavení kovů pomocí svazku elektronů a následně sestavení vrstvu po vrstvě do finálního tvaru.

Tvar součásti vychází z předem definovaného 3D CAD modelu. EBM technologie umožňuje vysoké využití energie, poskytuje vysokou kapacitu tavby a vysokou produktivitu. Arcam-A1 je schopen poskytovat paprsku výkon do 3500 W při zachování skenovací rychlosti, která umožňuje tavení z několika bodů současně.



Obr. 12. Tiskárna Arcam-A1[W9]

Arcam-A2 je zařízením, které se používá pro výrobu součástí v leteckém a obranném průmyslu. Je určen speciálně pro výrobu velkých složitých kovových dílů z řady různých materiálů. Arcam-A2 je robustní výrobní platforma, která se dodává se dvěma výměnnými tanky, jeden pro široké sestavení a druhý pro vysoké sestavení. Arcam-A2 je dodáván s nejnovějším a nejmodernějším softwarem EBM 3,2. Postup výroby je v podstatě shodný s již zmíněným zařízením Arcam-A1.

Materiály dodávané ARCAM jsou rozsáhle testovány před uvolněním pro zákazníky a konfigurace prášku je optimalizována pro bezpečný a spolehlivý provoz EBM procesu.



Obr. 13. Tiskárna Arcam-A2 [W10]

3.1.3 EOS

Společnost EOS sídlící v Německu byla založena v roce 1989. EOS má vedoucí postavení na trhu pro své designové řízení a integrované výrobní řešení pro průmyslové aplikace. Nabízí modulární portfolio řešení, včetně materiálů, softwaru, procesních parametrů atd. Portfolio je také doplněno o služby, jako je například údržba, poradenství a školení. Cílem firmy je rozvíjet své technologie a vyrábět co nejefektivnější a nejkvalitnější výrobky. Pro výrobu kovových součástí poskytuje firma 3D tiskárnu EOSINT M 280.

3.1.3.1 EOSINT M 280

EOSINT M 280 je od roku 1995 již třetím výrobním zařízením, kdy firma EOS poprvé vyrobila svou 3D tiskárnu. EOSINT M 280 je aktualizovaná a dále vylepšená verze EOSINT M 270, vedoucí systém na trhu pro výrobu doplňkové vrstvy kovových částí. Tato tiskárna byla vyvinuta díky připomínkám a vyšším požadavkům firem, které se zabývají výrobou kovových součástí metodou RP na 3D tiskárnách. Velkou výhodou oproti staršímu typu je podstatně vyšší výkon laseru 400 W, vyšší stavební výška 325 mm atd. Tato vylepšení přinášejí vyšší kvalitu povrchu, produktivitu a lepší ekonomickou efektivnost procesu.

EOSINT M 280 vyrábí vysoce kvalitní kovové díly na základě trojrozměrných dat CAD - plně automaticky, během několika hodin, a to bez nutnosti použití nářadí. Systém je volitelně vybaven polovodičovým laserem, buď 200 W nebo 400 W. Tento laser poskytuje mimořádně vysokou kvalitu záření a stabilní výkon. Laser Power Monitoring (LPM) umožňuje ovládat vše během stavebního procesu. Spolu s optimalizovaným Gas systémem řízení to zaručuje optimální a konzistentní podmínky zpracování nejvyšší a konstantní kvality stavební části.

Systém pracuje v ochranných atmosférách dusíku a argonu. To umožňuje zpracovávat široké spektrum materiálů: od lehkých neželezných kovů po nerezové oceli atd. Software byl v průběhu mnoha let dále rozvíjen a obsahuje řadu inteligentních expozičních strategií a funkcí, které umožňují optimalizaci a přizpůsobení procesu sestavení pro různé typy materiálů a aplikací. Pro EOSINT M 280 EOS nabízí řadu práškových kovových materiálů s odpovídajícími parametry, které byly optimalizovány v závislosti na aplikaci. Kromě toho, EOS zajišťuje maximální spolehlivost, intenzivní řízení procesu vývoje a neustálé zajišťování kvality. Charakteristické vlastnosti EOSINT M 280 systému jsou kvalita vyráběných dílů a ergonomické navržení. Systém je proto velmi vhodný pro průmyslové prostředí.



Obr. 14. Tiskárna EOSINT M 280[W10]

3.2 Shrnutí 3D tiskáren

Jak bylo řečeno, zmíněné tiskárny mají široké spektrum použití. Konkrétně tiskárny sProTM 125 Direct Metal a sProTM 250 Direct Metal produkují výrobky převážně do zdravotnického a leteckého průmyslu. Podobně je tomu i u tiskáren Arcam-A1 a Arcam-A2. Tiskárna EOSINT M 280 se specializuje převážně na průmyslové prostředí. U všech zmíněných tiskáren je kladen vysoký důraz na kvalitu a vysokou produktivitu.

3.4 Porovnání tiskáren

Porovnávané tiskárny byly již zmíněné: SPro™ 125, SPro™ 250, Arcam A1, Arcam A2 a Eosint M280. Tato zařízení byla porovnávána z hlediska pracovního prostoru, váhy výrobního zařízení, rychlosti skenování, stavební rychlosti atd.

	SPro™ 125	SPro™ 250	Arcam A1	Arcam A2	Eosint M280
Pracovní prostor	125 x 125 x 125 mm	250 x 250 x 320 mm	200x200x180 mm	200x200x350 mm	250x250x325 mm
Váha zařízení	1125 kg	1225 kg	1420 kg	1420 kg	1250 kg
Rychlost skenování	až 1000 mm / s	až 1000 mm / s	až 8000 mm / s	až 8000 mm / s	až 7000 mm/s
Stavební rychlost	5 - 20 cm ³ za hod	5 - 20 cm ³ za hod	55 - 80 cm ³ za hod	55 - 80 cm ³ za hod	/
Laserové možnosti	100 nebo 200 W	200 nebo 400 W	50-3000 W	50-3000 W	200 nebo 400 W
Napájení	208V 3PH, 30A, 60Hz	208V 3PH, 30A, 60Hz	3 x 400 V, 32 A, 7kW	3 x 400 V, 32 A, 7kW	32 A, max 8,5kW
Počet paprsků v místě	/	/	1-100	1-100	/
Velikost paprsku v bodu	/	/	0.2 mm - 1.0 mm	0.2 mm - 1.0 mm	/
Tloušťka vrstvy	20 - 100 μm	20 - 100 μm	/	/	/
CAD rozhraní	/	/	STL	STL	STL
Průměr laserového paprsku	35 μm	70 μm	/	/	/
Povrchová úprava	/	/	Ra25/Ra35	Ra25/Ra35	/

4 Podrobný rozbor stavby kovových součástí

Pro rozbor stavby kovových součástí byly zvoleny následující metody Rapid prototyping:

1. Selective Laser Sintering (SLS)
2. Direct Metal Laser Sintering (DMLS)
3. Laser Engineered Net Shaping (LENS)

4.1 SLS – Selective Laser Sintering

Obecně při spékání vznikají vysoké teploty a tlaky, tímto se technologie SLS liší. Metoda SLS je charakteristická tím, že dochází ke spékání materiálu bez jakéhokoli tlaku. Doba spékání bývá poměrně dlouhá. Aby došlo ke spečení sousedních částic, postačí působit potřebnou teplotou krátkou dobu. Kovové částice jsou uloženy v práškové nádobce, které jsou pomocí laserového paprsku na povrchu natavovány. Po natavení jsou částice spečeny a následně ochlazeny do tuhé fáze. V molekulární struktuře mezi sebou reaguje povrchové napětí a viskozita tavené částice, neprobíhá zde difúze. Tyto reakce jsou závislé pouze na teplotě a použitém materiálu.

Pro výrobu součástí metodou SLS jsou nejpoužívanější částice o velikosti 50-100 mikrometrů. Částice jsou uloženy v práškové nádobce, kde jsou zlehka stlačeny, protože správné stlačení je velice důležité pro vhodný průběh celého výrobního procesu. Částice jsou vystavovány tepelné energii, která způsobuje jejich roztavení. Dále následuje ochlazení, které je seskupuje dohromady do jedné vrstvy. Tímto postupem vznikne jedna vrstva. Po tomto procesu dojde ke snížení vrstvy částic v nádobce. Vrstva je doplněna dalším materiálem a dochází k opakování první kroku výroby – je taven další materiál a posléze chlazen, čímž vzniká na první vrstvě vrstva další. Tento postup se několikrát opakuje. Jakou bude mít vznikající výrobek polohu v práškové nádobce, je možno částečně zvolit. Pokud bude vyráběná součást při výrobě orientována do horizontální polohy, jednotlivé vrstvy budou horizontální. Pokud bude výrobek umístěn ve svislé poloze, vrstvy budou mít svislý směr. [10], [11]

4.1.1 Pracovní prostor

Pracovní prostor neboli pracovní komora je jednou z nejdůležitějších částí stroje. V tomto místě se odehrává celý výrobní proces. Postupem času byly vyvinuty dva typy pracovních prostor. První typ pracuje bez vnitřního předehřevu a druhý typ pracuje s předehřevem. Typ bez tepelného předehřevu se postupem času přestal vyrábět, jelikož z ekonomického hlediska je pro metodu SLS vhodnější pracovní komora s předehřevem. V komoře bez předehřevu se veškerá energie potřebná k výrobě dodává laserovým paprskem. V komoře s předehřevem je vestavěný vyhřívací systém s přesnou regulací teploty. Většina tepelné energie se dodá k předehřátí pracovního prostoru a konstrukčního materiálu.

Komora se vyhřívá na teplotu, která je o několik stupňů nižší než teplota tavení spékaného materiálu. Zbytek energie, potřebný k výrobě se dodává laserem s menším výkonem. Výhodou systému s předehřevem jsou menší provozní náklady.

K dosažení kvalitních výstupních parametrů výrobku je nutná přesná regulace teploty v pracovní komoře během celého výrobního procesu. Inertní atmosféra v pracovní komoře přístroje zabraňuje během výroby nežádoucí reakci zpracovávaného kovu s kyslíkem.

Jednou z velkých výhod metody SLS je, že není třeba používat pod modelem podpor, jak tomu bývá u některých metod rapid prototyping. Této výhody je docíleno díky nespékanému prášku, který je pod modelem v nádobce. Materiál zcela zajistí plnou funkci podpor během celého spékajícího procesu.

Pracovní systém nepracuje ihned na plný pracovní výkon, ale postupně se zvyšuje. Laser je ze začátku nastaven na poloviční výkon a dvojnásobnou posuvovou rychlost. K úplné synchronizaci dojde až po vytvoření několika vrstev. Tyto vrstvy jsou mírně pokrouceny, kvůli počátečním podmínkám, ale zároveň jsou použity jako podpory modelu. Výsledný tvar součásti je závislý hlavně na dodržení požadovaných teplot v pracovním prostoru, dodávání dusíku a propočtu výrobních dat příslušným softwarem.

4.1.2 Výrobní parametry

Je poměrně logické, že výrobní čas součástí se odvíjí od její geometrické složitosti. Výrobní čas součásti v rovině X-Y je kratší, než v ose Z. Bylo vyzorováno, že u středně kvalitních zařízení výroba 10 mm³ trvá přibližně jednu hodinu. Čím modernější je výrobní zařízení, tím doba výroby součásti klesá. Výsledná přesnost součásti vyplývá z průměru paprsku laseru. Přesnost se pohybuje v desetinách až setinách milimetru. [11]

4.1.3 Materiály vhodné pro SLS

Pro spékání mohou být použity v zásadě všechny materiály, které je možno roztavit a které po ochlazení zkrystalizují. Nejčastěji se používají zrna o velikosti 20-100 mikrometrů. Protože se zrna přesívají, z devadesáti procent se zaručí již zmíněná velikost zrn. Vyskytují se zde rozdíly mezi látkami krystalickými a amorfními. Látky krystalické mají po roztavení větší tendenci se smršťovat, což může způsobovat kroucení. Tento jev může být kontrolován pomocí smršťovacího faktoru. Smršťovací faktor může být uvažován při tvorbě výrobních dat, protože jde o empirickou hodnotu, nemůže zaručit dostatečnou dosahující přesnost.

Příklad: Vícesložkový prášek: kov- kov, plast – kov

Jednosložkový prášek: plast, kov

4.1.3.1 Vícesložkový materiál

4.1.3.1.1 Kov-plastový prášek

Jde o směs drobných částic kovu a plastu, které jsou spékáním spojeny dohromady. Tento postup je z technologického hlediska téměř shodný se spékáním samotného plastu. Prvním krokem je spečení směsi pomocí tepelné energie do tzv. „skořápky“. Tento výsledek se nazývá „mladým produktem“. Jako pojivo je zde používán plastový materiál, protože jeho teplota tavení je menší než u kovového materiálu. Tato vlastnost materiálu se využívá i v následujícím kroku výroby. „Skořápka“, která obsahuje i kovový materiál je v peci ohřívána na teplotu, při které dochází k tavení plastového materiálu.

lu. Dojde k roztavení plastu, kovu však nikoli. Protože se pracuje více s plastem, tato metoda se řadí do plastového spékání. [11]

4.1.3.1.2 Kov – kovový prášek

Výrobní proces je hodně podobný předcházejícímu procesu. Hlavním rozdílem je zde fakt, že místo plastových částic jsou zde použity částice kovové. Tyto částice mají menší teplotu tavení než hlavní kovové částice, zároveň mají vaznou funkci. Finální výrobek je vytvořen z hlavních kovových částic. „Mladý“ výrobek je vložen do pece, kde jsou vazné částice vytaveny. Mechanické vlastnosti výrobku se odvíjejí od použitého hlavního materiálu. [11]

4.1.3.2 Jednosložkový materiál

4.1.3.2.1 Kovový prášek

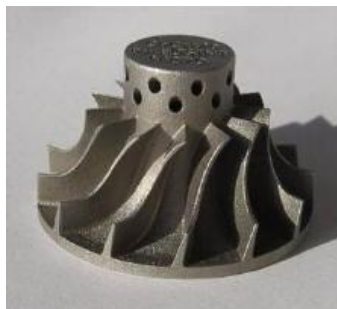
Jako první materiál při pokusech o spékání byl použit plastový materiál, hlavně pro své vlastnosti (teplotě tavení, tepelnému vedení atd.). Postupem času se začal používat i kovový materiál a upravil se tak celý řídicí proces výroby. Hlavní výhodou kovových materiálů je jejich menší viskozita v nataveném stavu a jejich vysoké povrchové napětí. Jako nevýhoda je považována jejich vyšší teplota tavení. [11]

4.2 DMLS – Direct Metal Laser Sintering

DMLS je metoda, která vyrábí plně funkční kovové díly a byla vyvinuta v roce 1995 německou firmou EOS. V tu dobu se jednalo o jedinou komerční metodu RP, která byla schopna vyrobit součást v jednom procesu. Protože se používá pouze jedna technologie výroby, dochází k šetření peněz i času. Čím je součást složitější, tím se stává technologie DMLS ekonomicky efektivnější. Tato technologie je založena na postupném tavení jednotlivých velice jemných vrstev kovového prášku. K tavení dochází díky laserovému paprsku, jenž natavuje prášek jen v konturách řezu, který je určený průmětem konkrétní roviny 3D CAD modelem vyráběné součásti. Protože laser prášek

dokonale natavuje, je zajištěno, že spojení jednotlivých vrstev bude stoprocentní. Během stavby součásti je velice nutné, aby byla správně zafixována poloha výrobku. Tyto podpůrné prvky jsou vyráběny zároveň se součástí vrstvu po vrstvě. Tloušťka jednotlivé vrstvy je minimálně 20 mikronů. Mechanické vlastnosti součásti, která byla vyrobena metodou DMLS, se dají srovnávat se součástí vyráběnou obráběním nebo odléváním. Metoda DMLS se dá aplikovat i v malosériové výrobě. Po dokončení výroby součásti se provádějí dokončovací operace. Při těchto operacích dochází k odstraňování podpor od výrobku. Výrobek je možno obrábět, leštit, brousit atd. Zbylý prášek, který nebyl při výrobě součásti spotřebován, se vrací zpět z 98 % do výroby. Již zmíněná metoda je tedy velice ekonomická i ekologická.

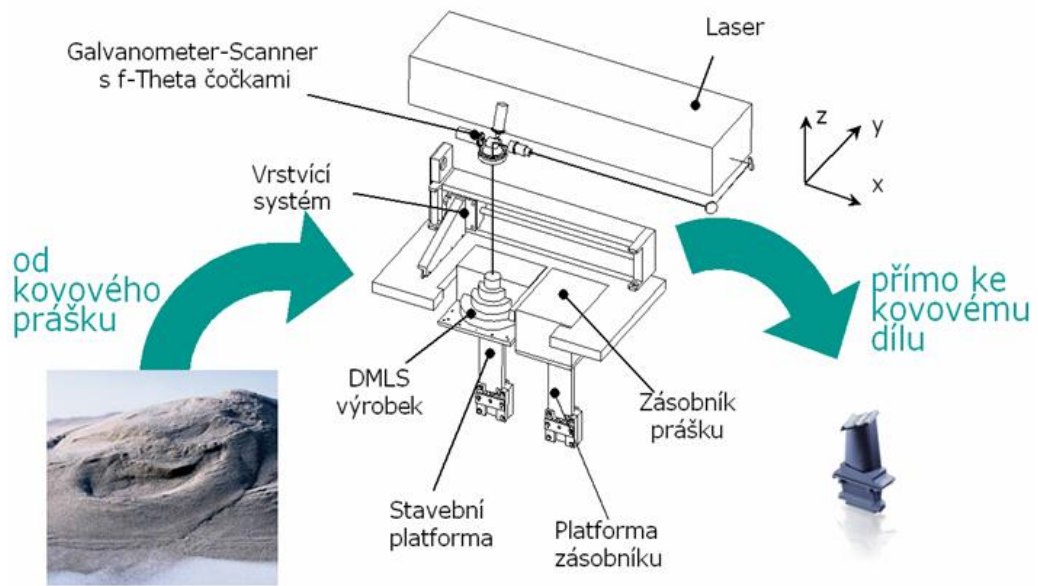
Je velká škála výrobních materiálů, které je možno použít. Může to být ocel, lehké slitiny, dokonce i kompozity a superslitiny. Tato metoda je na trhu přibližně 15 let, a protože jde o rychlou výrobní metodu, vytváří součásti s dobrými mechanickými vlastnostmi, má velké uplatnění v různých odvětvích průmyslu (například letectví, lékařství, automobilový průmysl atd.) [11], [12]



Obr. 15. Ukázka součástí vyráběných metodou DMLS [W12]



Obr. 16. Ukázka součástí vyráběných metodou DMLS [W12]



Obr. 17. Schéma metody DMLS [W12]

4.2.1 Výhody, nevýhody

Výhody

- Redukce výrobních nákladů a výrobních časů
- Stavební čas se více odvíjí od objemu dílů než od geometrické složitosti
- Vysoká houževnatost a pevnost dílů
- Automatický provoz
- Možnost výroby dílů přímo z 3D CAD dat poskytnutých od zákazníka
- Nízká spotřeba materiálu – možnost dalšího použití neroztaveného prášku

Nevýhody

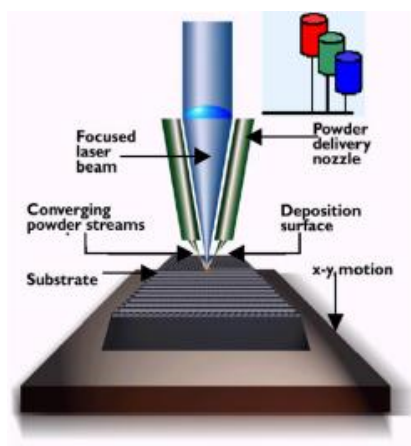
- Vysoké náklady na pořízení
- Prostorová a energetická náročnost
- Potřeba dokončovacích operací [11]

4.3 LENS – Laser Engineered Net Shaping

Metoda LENS byla vynalezena v Sandia National Laboratory (SNL) v USA Davidem Keicherem. Pracovní materiál, zde kovový prášek, je uložen v zásobníku, kde na něj působí v horní části stlačený plyn. Kovový prášek je pomocí několika trysek dodáván do tavicí hlavy, kde je taven. Následně z tavicí hlavy pokračuje do pracovního prostoru, kde dochází díky tepelné kondukcii k vytvoření finální součásti. I zde je součást vyráběna vrstvu po vrstvě. Po vytvoření jedné vrstvy se postup opakuje však s malým rozdílem. Následující vrstva je vytvářena do kříže, to znamená, že je otočena o 90°. Tloušťka vrstvy je definovaná pomocí tavicí hlavy, která se pohybuje v ose Z. V ose X-Y se pohybuje YAG Laser, který zjemňuje zrna v konečné struktuře součásti. To způsobuje, že výsledná součást má vyšší odolnost v tahu a je více tvárná.

Výroba celé součásti probíhá v utěsněné komoře, která obsahuje ochranný plyn. Tento plyn se volí podle druhu používaného materiálu a je částečně přiváděn do tavicí trysky. V komoře je stejná teplota jako teplota v okolí a tlak je atmosférický.

Metoda LENS je charakteristická velkou rychlostí výroby součásti a také vysokou kvalitou výrobků. Rychlost výroby se obvíjí od složitosti a velikosti součásti. V ose X-Y se dá součást zhotovit s přesností 125 mikrometrů a v ose Z s přesností 225 mikrometrů. Po dokončení výroby součásti je možno ji následně upravovat, například brousit. Metoda LENS je vhodná pro plně funkční výrobky. Používá se hlavně v lékařství, ale i v letectví. [10], [11], [13]



Obr. 18. Ukázka technologie LENS

5 Porovnání materiálových vlastností s tvářenými a odlévanými materiály

Pro následující kapitolu byly vybrány dva materiály, u kterých se budou řešeny jejich vlastnosti při odlévání, tváření anebo metodě rapid prototyping. Jedná se o titan a inconel.

5.1 Titan

5.1.1 Vlastnosti titanu

Titan je charakterizován jako nemagnetický a polymorfní kov, jehož hlavními výhodami jsou jeho nízká hmotnost a vysoká pevnost. Při nízkých teplotách má dobrou odolnost proti korozi a dobrou vrubovou houževnatost. Samozřejmě i tento kov má své nevýhody, například složité zpracování, které je způsobeno při teplotách nad 700 ° C jeho vysokou reaktivitou. Hůře se obrábí, slévá i svařuje. Dále má menší modul pružnosti, nižší hustotu než ocel, je více náchylný k odírání a je více citlivý na nečistoty při svařování.

5.1.1.1 Tváření titanu

Titan i jeho slitiny se vyznačují snadnou tvářitelností a to i za pokojových teplot díky technologiím a zařízením, které jsou vhodné pro ocele. Po tváření se většinou povrch titanu dá srovnat s povrchem, který by vznikl válcováním. Povrchové vady, které mohou vzniknout například manipulací, je možné odstranit pískováním. Pokud se má materiál táhnout, je nutné očistit výchozí polotovary od otřepů a okraje vyhladit. Povrch materiálu by měl být bez nečistot a nejlépe vyleštěný. Protože titan je materiál, který má velké odpružení, je v některých případech třeba poupravit tvar tažníku. Následné tažení by mělo probíhat pomalu.

Při tváření samotného titanu nebo jeho slitin za studena dochází ke značnému zpevnění materiálu. Proto je potřeba po každé takovéto operaci materiál žíhat, a to při teplotě 700° C. Tím se docílí toho, že materiál získá prvotní vlastnosti k tváření. Se zvyšující se teplotou roste i tvárnost titanu, to znamená, že operace, které není možno provést při pokojových teplotách, je možno provést při teplotách zvýšených. K ohřevu může dojít v peci, pomocí sálavého topení nebo přímým plamenem.

Pokud má být titan tažen, je důležité nezapomenout na jeho tendenci k zadírání. Tato náchylnost je větší než například u nerezové oceli. Protože částičky titanu zůstávají na povrchu přidržovače a tažnice, tím dochází k zhoršení povrchu ploch tažidla. Výtažky se po několika tazích zadírají a dojde k trhání kovu. Proto je velice nutné nezapomenout na mazání při tváření, kdy je materiál ve styku s tvářecím zařízením.

Titan má modul pružnosti přibližně poloviční než ocel. Tento fakt zapříčiňuje větší odpružení po tváření a to o 15° až 25°. S větší pevností slitiny se předpokládá i větší hodnota odpružení. [14]

5.1.1.2 Lití titanu

Odlévání patří mezi základní tvarovací techniky, při kterých vzniká požadovaný tvar součásti. Principem je lití roztaveného kovu do formy. Velkou nevýhodou odlévání je to, že na povrchu odlitu dochází k tvorbě tzv. alfa fáze, která se vyznačuje svou velkou tvrdostí, obtížnou obrobiteľností a může způsobovat vznik trhlin a jejich následné šíření. S tímto nepříznivým jevem musí být počítáno již při samotném návrhu součásti a musí se následně odstranit například chemickým luhováním. Kvalita odlitků ze slitin titanu je srovnatelná s tvářeným titanem a často i kvalitnější. Nevýhodou odlitků je, že se vyznačují horšími plastickými vlastnostmi. Mez pevnosti je mezi 850 až 950 MPa.

Některé slitiny titanu mají uspokojivou slévatelnost díky tomu, že teplotní interval mezi solidem a likvidem je malý, což má dobrý vliv na segregaci nečistot, zabíhavost taveniny atd. Slitiny titanu se vyznačují také tím, že jsou minimálně náchylné ke vzniku trhlin a mají dobré smrštění (1%). Protože je tavenina vysoce chemicky aktivní musí se tavit a odlévat v neutrálním ochranném prostředí nebo ve vakuu. Odlitky z titanu nebo jeho slitin se vyrábějí tvarovým litím do ocelových, litinových nebo speciálních forem. Nově se používá izostatické lisování při vysokých teplotách, které vede ke zlepšení mechanických vlastností výrobku. [15], [16]

5.1.1.3 Titan a rapid prototyping

Titan a jeho slitiny, například Ti6Al4V je materiál, který je velice vhodný pro součásti vyráběné metodou rapid prototyping. Je znám svou odolností proti korozi, vynikajícími mechanickými vlastnostmi, biokompatibilitou a nízkou specifickou hmotností. Při tisku tohoto materiálu se doporučuje minimální tloušťka vrstvy 30 μm a při tisku

stěny se doporučuje minimální tloušťka 0,3 - 0,4 mm. Z tohoto materiálu se vyrábějí jak díly pro letecký a automobilový průmysl, ale také biomedicínské implantáty. [25]

Součásti z titanu mohou být vyráběny například metodou DMLS. Tato technologie, stejně i jako jiné metody rapid prototyping, snižuje plýtvání materiálů ve srovnání s tradičními metodami. Například lití titanu je velmi obtížné a často má vysokou zmetkovitost. V současné době je mnoho součástí v letectví vyráběno právě z titanu. Tyto prvky jsou mnohdy vyráběny z plného materiálů, ze kterého je často odříznuto 90% nebo i více původního materiálu. Technologie DMLS vyloučí časově náročné, nákladné operace a výsledkem jsou mnohem nižší náklady na pracovní sílu. Při stavbě z titanového prášku se dosahuje drsnosti povrchu postaveného, očištěného Ra 9 - 12 μm . Součást dosahuje 1150 ± 60 MPa pevnosti v tahu, tažnosti 11 ± 2 %, meze kluzu 1030 ± 70 MPa a tvrdosti cca. 400 do 430 HV (41 až 44 HRC). Mechanická odolnost se odvíjí od geometrie, to znamená výšky stěny, použití atd. [24], [26]

5.2 Inconel

5.2.1 Vlastnosti inconelu

Inconel patří do kategorie superslitin, u kterých se požaduje mechanická odolnost, stálost za vysokých teplot, odolnost proti korozi atd. Tyto slitiny byly vyvinuty hlavně pro strojírenský a vesmírný průmysl. Součástky vyráběné ze superslitin jsou používány například jako lopatky turbín v proudových motorech nebo v plynových turbínách.

Inconel je austenitisko nikl-chromová superslitina, která se používá pro výrobu součástí, u kterých potřebujeme dobrou odolnost proti vysokým teplotám. Jak již bylo zmíněno, inconel a inconelové slitiny patří mezi korozivzdorné materiály, které se používají převážně v extrémních prostředích, kde by jiné materiály nemohly být použity. Pokud dojde k ohřátí materiálu na vysokou teplotu, na povrchu se vytvoří tlustá oxidační vrstva. Tato vrstva má za úkol chránit materiál před nepříznivými vlivy. Při vysokých teplotách dosahuje neměnných vlastností a to díky malému množství niobu. Ten společně s niklem vytvoří Ni_3Nb sloučeninu, která zabraňuje zdeformování při vyšších teplotách. [17]

5.2.1.1 Tváření inconelu

Slitiny inconelu se vyznačují vynikajícími tvářecími a svařovacími vlastnostmi. Tato slitina má dobrou tažnost a může být snadno tvářena všemi běžnými metodami. Vzhledem k tomu, že slitina je pevnější, než běžné oceli, vyžaduje výkonnější zařízení. Obyčejné uhlíkové a nástrojové oceli nejsou vhodné pro tváření, protože mají tendenci k zadírání. Měkké materiály, jako je například bronz, zinek atd., minimalizují odírání a zaručují vynikající úpravy povrchu. Jejich životnost je ale krátká. Protože během zpracování se slitina zpevňuje, je potřeba součásti tvářené za tepla i za studena rekrystalizačně žíhat v zájmu obnovení materiálových vlastností

Je známo, že během tváření za tepla je tento materiál odolnější proti deformaci než ostatní materiály. Tváření za tepla je prováděno v teplotním rozsahu 1650°-2050 ° F (900°-1120°C) a při dokončování musí být materiál zpracováván při rovnoměrně klesající teplotě 1650 ° -1750 ° F (900°-955°C). [29]

5.2.1.2 Odlévání inconelu

Pro následující bod byla vybrána konkrétní slitina inconelu a to INC 713, která je určena pro přesné lití vytavitelného modelu. INC 713 patří k nejkomplicovanější niklovým slitinám jak podle chemického složení, tak i podle technologie výroby. Řadí se mezi první lité slitiny neboli do I. generace, na které je při výrobě aplikována vakuová metalurgie. Tato žárovečná slitina je určena pro součásti, které jsou jak teplotně, tak napětově velice zatěžovány. Dá se používat do 900 °C a do 850 °C si je schopna udržet vysokou pevnost. Pokud dojde k překročení této mezní teploty, dojde k rychlému poklesu pevnosti. Jestliže se součást vyrobená z tohoto materiálu vyskytuje ve velmi korozně agresivním prostředí, je potřeba opatřit povrch odlitku o žáruvzdorný nástřík. Protože je tento materiál těžko obrobiteľný, je nutné tuto slitinu odlévat s minimálními přísávkami na opracování. Proto se pro výrobu odlitků používá přesné lití metodou vytavitelného modelu v kombinaci s vakuovou metalurgií.

V této slitině se vyskytují prvky, které mají velikou afinitu ke kyslíku jako například Ti, Al atd. Z toho důvodu není možno tento materiál odlévat ani tavit na vzduchu, ale je nutné využít vakuového lití a vakuové metalurgie. Protože tato slitina obsahuje velké množství hliníku a titanu, nedá se svařovat klasickým tavným svařováním. Je

zde možnost výskytu trhlin v blízkosti svarové oblasti. Velice dobře se osvědčilo svařování třením, difúzní svařování nebo pájení ve vakuu pájkami typu Ni-Cr-B-Si. [27]

5.2.1.3 Inconel a rapid prototyping

Výroba součástí z inconelu pomocí technologie DMLS je schopna vyrobit geometricky složité díly a do značné míry odstraní nutnost použití dalších strojů. To znamená, že komponenty mohou být vyráběny rychleji a za nižší cenu. Při porovnání výrobků z inconelu (konkrétně inconelu 718) stavěného metodou rapid prototyping a kovaného, bylo zjištěno, že mnohem větší pevnosti v tahu dosahuje součást kovaná. Dále bylo zjištěno, že ve výrobku metodou rapid prototyping docházelo k většímu pnutí. Proto následovalo tepelné zpracování, čímž se tvrdost vzorku se zvýšila o 30% na přijatelnou úroveň. Mikrostruktura součásti vyrobené DMLS technologií se velice podobala kované mikrostruktúře.

Jak je známo, drsnost povrchu má nemalý vliv na pevnost tvářeného materiálu. Drsnost vytváří oblasti s vysokou koncentrací napětí, která slouží jako místa vzniku fraktury a následně předčasnému selhání materiálu. Proto se požaduje, aby součásti stavěné technologií DMLS měly maximální drsnost povrchu 125 μm .

DMLS technologie je podstatný pokrok směrem k hromadné výrobě součástí z materiálu inconel metodou rapid prototyping. Nicméně, prvky jako např. drsnost povrchu, tepelné zpracování atd. je stále představují určité překážky, které je potřeba ještě nadále zkoumat. DMLS patří k metodám, které výrazně snižují náklady u výroby dílů s komplexní geometrií.

6 Porovnání provozních a výrobních nákladů s náklady u obráběných součástí

Tato kapitola je zaměřena na srovnání dvou možností výroby součástí. K porovnání dojde mezi metodou rapid prototyping a technologií CNC obrábění.

Rapid prototyping používá k výrobě prototypů data z 3D CAD systémů. Samotný tisk součástí nemusí být až tak rychlý, i když to název metody naznačuje. Pokud se jedná o rychlost, je tím myšlena spíše rychlost přípravy zhotovení součásti, protože u této metody je možno vyloučit některé kroky, které se u klasických metod vyloučit nedají. Tato metoda je zatím ještě mladá a její použití se počítá na roky.

Protikladem k metodě rapid prototyping je číslicově řízený proces obrábění. Tato technologie je vyvíjena a stále zdokonalována již desítky let. Základem je 3D, někdy ještě 2D počítačový návrh vyráběného výrobku. CNC obrábění se dá použít od kusové až po sérovou výrobu. Velkou výhodou jsou velice nízké náklady na výrobu prvních sérií. Při samotné výrobě je možno měnit variabilně vzhled vyráběných součástí, to je v nynější době velmi důležité. [18]

6.1 Příklady srovnání obou technologií

- Z hlediska tvarů je použití metody RP skoro neomezené. Touto metodou je možno vyrábět například dutá tělesa v jednom kroku nebo celé sestavy. Při obrábění dochází k omezení díky nutnosti zajistit, aby byl přístup nástroje k místu, kde dochází k vytváření požadovaného tvaru.
- Mezi další nevýhody obrábění je nutnost upnutí materiálu. Upnutí často omezuje nástroji přístup k obráběným plochám. Tento nedostatek vyvolává nutnost následného upínání obrobku v jiné vyhovující poloze.
- U CNC frézování je jistá závislost nákladů na složitosti tvaru součásti. Je logické, že složité tvary vyžadují mnohem delší čas na tvorbu programu, malé detaily potřebují malé nástroje. Toto vše prodlužuje čas výroby součásti a dochází tak ke zvýšení nákladů.
- Při metodě RP je cena výrobku většinou stanovena podle množství použitého materiálu nebo podle času, který je třeba k vyrobení výrobku.

- Výhodou RP je to, že není potřeba polotovary o potřebných rozměrech a následně ho upínat do pracovního prostoru. U některých metod je třeba po dokončení, výrobek očistit od ostatních podpůrných materiálů.
- Pro tvorbu NC programu je třeba využít dalších softwarů (CAM). Pro RP jsou softwary jeho součástí.
- Na většině CNC strojích je možno obrábět všechny konstrukční materiály. Možnost výběru obráběných materiálů je tedy podstatně větší než u zařízení pro metodu RP, která je většinou vázána pouze na jeden materiál (kov, plast, keramika atd.)
- Co se týče velikosti strojů, tak CNC stroje je možno sehnat v různých velikostech, kdežto velké stroje pro RP zatím nejsou. To má za následek, že při výrobě velkých dílů metodou RP se výrobek vyrábí na menší části a následně dojde ke spojení do jednoho celku.
- Ceny high-end RP strojů jsou vysoké a ceny strojů, které jsou určeny pro výrobu koncepčních modelů jsou menší, ale i tak docela vysoké. Hodně podobně je tomu i u CNC strojů. CNC stroje a softwary jsou drahé, ale často se objevují menší stroje, které mají cenu velmi přijatelnou. Nevýhodou těchto strojů je sortiment použitelných materiálů, který je značně omezen. Výhodou je však například nenáročnost na umístění.
- Při metodě RP dochází k nanášení materiálu o konstantní tloušťce. Tím je dána přesnost výrobku. U CNC frézování je možnost volit vzdálenost mezi drahami nástroje. Tato možnost znamená upřednostnění rychlosti nebo přesnosti výroby součástí. [18]

6.2 Porovnání nákladů při obrábění a RP

Na velikost provozních a výrobních nákladů má vliv nespočet faktorů. Jedním z faktorů je typ stroje, který se používá pro výrobu součástí. Ceny těchto zařízení jsou velice rozdílné vzhledem k jejich schopnostem a možnostem. U výrobních zařízení má na náklady vliv i jejich spotřeba energie, která při dlouhých provozech může být poměrně velká. Dalším vlivem je typ součásti, který je potřeba vyrobit a typ materiálu, ze kterého má součást být vyrobena. Bude-li jednoduchá součást vyráběna metodou RP a například obráběna na CNC stroji, bude jistě součást vyráběna obráběním několikaná-

sobně levnější než stejná součást vyrobena metodou RP.

Jak již bylo řečeno, velký vliv na cenu má i materiál. Pokud by byla součást vyráběna například z titanu, tak už od začátku je jasné, že cena bude astronomická. Samotný titan je velice drahý materiál a výroba jednoduché či složité součásti bude velice finančně náročná. Metoda RP se hodí převážně na složité tvary a proto výroba výrobků touto metodou je někdy jedinou možností, jak tyto tvary získat i když se bude jednat o vyšší výrobní cenu.

6.3 Výpočet nákladů pro provoz stroje

Náklady na provoz výrobního zařízení (CNC stroj, 3D tiskárna) patří do režijních nákladů, s ohledem na relativně vysoké pořizovací náklady výrobních zařízení je poměrně výhodné náklady na provoz vyčlenit z celkových režijních nákladů a přiřadit k jednotlivému stroji. Provozní náklady výrobních zařízení se udávají na jednu hodinu provozu. [19]

Nákladové položky provozu

- Cena stroje C_s [Kč]
(Cena od výrobce nebo dodavatele)
- Náklady na instalaci stroje N_i [Kč]
(Dovoz, montáž, přívod elektřiny apod.)
- Náklady na demontáž N_d [Kč]
(Po skončení životnosti stroje)
- Likvidační hodnota L [Kč]
(Odprodej, případně cena kovového odpadu)
- Doba životnosti Z [r]
(Souvisí s dobou odepisování stroje)
- Efektivní časový fond stroje za rok E_{ef} [hod]
(údržba, opravy apod..)

- Fixní hodinová sazba S_f [Kč/hod]

(Mzda obsluhy, spotřeba náradí, energie)

$$N_{hS} = S_f + \frac{Cs + Ni + Nd - L}{Z * Eef} \quad [\text{Kč/h}]$$

- C_s - Cena stroje [Kč]
- N_i - Náklady na instalace stroje [Kč]
- N_d - Náklady na demontáž [Kč]
- L - Likvidační hodnota [Kč]
- Z - Doba životnosti Z [r]
- Eef - Efektivní časový fond stroje za rok [hod]
- S_f - Fixní hodinová sazba S_f [Kč/hod] [19]

6.4 Příklady cen

6.4.1 Rapid prototyping

Pro zhodnocení 3D tisku bylo čerpáno od firmy Shapeways. Tato firma se zabývá 3D tiskem a to jak z kovového, tak i nekovového materiálu.

6.4.1.1 Alumide

Alumide je nylon naplněný práškem hliníku. Dojde k smíchání obou prášků a následuje slinování prášku pomocí laseru a to vrstvu po vrstvě. Pevnost a hladkost je u tohoto materiálu střední a lesk, průhlednost a pružnost je nízká. Manipulační poplatek za model je \$1.50. Cena leštěné součásti je \$2.00 na cm^3 a u neleštěné součásti \$1.75 za cm^3 . [20]

6.4.1.2 Nerezová ocel

3D tištěná nerezová ocel je materiál, který může být leštěn na hladké šperky, konstrukční součásti a cokoli mezi tím. Firma Shapeways tiskne nerez ocel, která je vel-

mi silná a tuhá a obsahuje až 30 % bronzu. Ten dává některým nerezovým ocelím lehce bronzový vzhled. Pevnost a lesk je vysoký, hladkost materiálu je střední, ohebnost je nízká.

Manipulační poplatek za model je \$6.00, za pobronzovanou součást je \$7.50 a za pozlacenou součást \$9.00. Cena za tisk cm^3 je \$8.00. [20]

6.4.1.3 Stříbro

V případě speciálních výrobků ze stříbra je dosahováno nejlepších výsledků tzv. třístupňovým procesem výroby:

1. 3D tiskárnou s vysokým rozlišením se vyrobí přesný voskový model výrobku.
2. Vytvoří se negativní sádrová forma a voskový model se roztaví.
3. Do formy se nalije roztavený kov. Hotový odlitek se následně povrchově upravuje např. pískováním nebo leštěním.

Součásti vyráběné ze stříbra mají velkou pevnost, lesk a jsou hladké. Jsou charakteristické nízkou ohebností.

Manipulační poplatek za model je \$30 za regulérní součást a \$35 za leštěnou součást. Cena tisku na cm^3 je \$20. [20]

6.4.1.4 Ceny výrobních zařízení pro RP

Jak již bylo v předcházejících kapitolách zmíněno, výrobou a prodejem 3D tiskáren pro kovové součásti se zabývá firma Arcam, 3D Systems a EOS. Firma EOS poskytuje pro výrobu kovových součástí jednu tiskárnu a to EOSINT M280. Cena této tiskárny je \$850 000. Firma Arcam poskytuje pro kovový tisk tiskárny Arcam A1 a Arcam A2. Cena těchto zařízení je \$1 300 000. A jako poslední zmíněná společnost je firma 3D Systems, která poskytuje tiskárny sProTM 125 a sProTM 250. Obě tyto tiskárny se cenově pohybují pod \$1 000 000. [21]

6.4.2 CNC obrábění

Firma Obrábění-CNC byla založena v roce 1995 a specializuje se převážně na strojírenskou činnost. Jako příklad budou uvedeny dvě frézky, které poskytují. Jako první se jedná o CNC frézku MAHO MHO MH 600E, jejíž hodinová sazba je 600 Kč. A jako druhá je frézka vlastní výroby, jejíž hodinová sazba je 250 Kč. [22]

6.4.2.1 Možnosti snížení nákladů u CNC obrábění

Protože CNC obrábění je poměrně nákladná věc, je snaha tyto náklady snižovat. Postupnými výzkumy bylo zjištěno, že jednou z možností, jak zvětšit produktivitu a přitom snížit výrobní náklady, je obrábět součásti bez použití řezné kapaliny. Výhodou této metody (DM) je i to, že je šetrná k životnímu prostředí. Bylo zjištěno, že za rok například v Německu je ve strojírenské výrobě spotřebováno přes 75 000 tun různých řezných kapalin.

Je logické, že ne vždy je možno řeznou kapalinu z výrobního procesu vyřadit. Bylo však odhadnuto, že vyřazením řezné kapaliny z výrobního procesu se výrobní náklady sníží cca o 10 - 15 %. Použitím DM metody se sníží náklady spojené s nákupem řezné kapaliny a její následná likvidace. Dalším plusem je i to, že odpadnou náklady potřebné pro zařízení sloužící k manipulaci, čištění a skladování řezné kapaliny. Tyto procesy jsou velice náročné a je u nich riziko úniku kapaliny, proto přechod na DM metodu zapříčiní čistější a zdravější pracovní prostředí. Díky tomu se zlepší bezpečnost práce, protože nedochází ke vzniku nepořádku na pracovišti, k rozprašování řezné kapaliny atd.

Používáním řezné kapaliny, převážně u CNC obráběcích strojů není jednoduchý a bezproblémový proces. Nepoužíváním ŘK bude při obrábění teplota větší, ale to znamená, že bude i stálější. Tento jev znamená snadnější tvorbu třísky, lepší výkon stroje a také dlouhodobější trvanlivost bříty nástroje.

Velký vliv na obrábění má i materiál řezného nástroje. I jeho správná volba sníží náklady na obrábění a tím i celkové náklady. [23]

7 Závěr

Účelem této bakalářské práce bylo popsat technologii rapid prototyping pro stavbu kovových součástí. Při zpracování této práce bylo čerpáno z dostupných internetových zdrojů a od firem, které se zabývají 3D tiskem. Na základě shromážděných informací byla popsána historie této technologie, vysvětlen význam pojmu rapid prototyping a její výhody a nevýhody. Následně byly popsány principy některých technologií výroby pro polymerní i nepolymerní materiály.

V následující části bakalářské práce byl splněn první i druhý zvolený cíl (zjistit výrobu 3D tiskáren pro výrobu kovových součástí a zmapovat, kam jsou výrobky převážně dodávány). V tomto bodě bylo čerpáno od tří firem a to firmy 3D Systems, Eos a Arcam. Všechny tyto firmy se zabývají výrobou tiskáren jak pro kovové, tak i nekovové součásti. Firma 3D Systems poskytuje pro tisk kovových součástí dvě tiskárny a to sProTM 125 Direct Metal a sProTM 250 Direct Metal. Zásadní rozdíl mezi oběma výše popsanými tiskárnami je velikost výrobku, které jsou schopny vyrobit. Výrobky, které jsou tyto tiskárny schopny vyrobit, jsou převážně lékařského charakteru a jedná se například o implantáty. Dále to mohou být například letecké díly, součástky pro strojí průmysl atd. Další firmou je firma Arcam, která poskytuje také dvě tiskárny pro stavbu kovových součástí a to Arcam-A1 a Arcam A2. Tyto tiskárny se liší stejně jako tiskárny u 3D Systems velikostí součástí, které jsou schopny vyrobit. Tato zařízení tisknou výrobky převážně pro letecký a vojenský průmysl. Poslední firmou, od které bylo čerpáno, je firma EOS, která poskytuje pro kovový tisk jednu tiskárnu a to EOSINT M 280, jejíž výrobky směřují převážně do průmyslového prostředí.

V dalším bodě této práce byly popsány tři technologie stavby kovových součástí metodou rapid prototyping. Pro tuto část byla vybrána technologie SLS, DMLS a LENS. U všech zmíněných metod byly podrobně popsány principy a bylo zmíněno, kde se tyto technologie používají, čímž byl splněn třetí zvolený cíl.

V předposledním bodě této bakalářské práce byly u materiálů inconel a titan porovnány jejich materiálové vlastnosti. Konkrétně se jednalo o vlastnosti při výrobě součástí technologií rapid prototyping a tváření a odlévání.

Na závěr došlo k porovnání provozních a výrobních nákladů technologie rapid prototyping s CNC obráběním. Například byly zmíněny hodinové sazby konkrétních

CNC strojů a cena tisku cm^3 u konkrétních materiálů. Dále bylo zmíněno, jaké faktory mají hlavní vliv na provozní a výrobní náklady.

8 Seznam použité literatury

- [1] Ing. Pavel Hájek. *Příručka pro výuku, Rapid Prototyping (RP)*. VOŠ a SPŠ Žďár nad Sázavou.
- [2] OHUA, C. K. *Rapid prototyping: Principles and applications*, 2nd ed. Hackensack: World Scientific, 2005. 420 s. ISBN 981-238-120-1
- [3] Bc. Lukáš Procházka. *Rapid prototyping*. SPŠ na Proseku
- [4] ŘASA, J.; KEREČANINOVÁ, Z.: Nekonenční metody obrábění 10. díl: Rapid Prototyping. *Nekonenční technologie: inovace*. 17. prosince 2008, 081207, str.38. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil>>.
- [5] 3D tisk. *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk
- [6] *FDM Technology* [online]. 2012 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technology/fdm-technology>
- [7] *Multi JET Modelling* [online]. 2011 [cit. 2013-02-03]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/main11.html>
- [8] Nekonenční metody obrábění 10. díl. *Mmspektrum* [online]. 2008 [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>
- [9] *3D printer* [online]. 2006 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://www.pkmodel.cz/3Dprinter.html>
- [10] *Rapid Prototyping* [online]. USA: Hanser Gardner Publications, Inc., 2003 [cit. 2013-05-02]. ISBN 1-56990-281-X.
- [11] GEBHARDT, A. *Rapid Prototyping*. 1st edition. [s.l.] : Hanser Gardner Publications, 2003. 379 s. ISBN ISBN 3-446-21259-0.
- [12] *DMLS* [online]. 2007 [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: <http://www.dmls.cz/>
- [13] *LENS Technology* [online]. 2006 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/>
- [14] *Bibus: Titan a slitiny titanu* [online]. [cit. 2009-05-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.bibus.cz/cz/?pg=vypis-produktu&id=276>>.
- [15] MACEK, Karel. *Kovové materiály*. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006, 164 s. ISBN 80-010-3513-1.

- [16] SUNG, Si-Yuong, KIM Young-Jig. Melting and casting titanium alloys. *Materials Science Forum*, 2007, vol. 539-543, s. 3601-3606
- [17] *US Patent 6902633 - Nickel-base-alloy* [online], 2005 [cit. 2008-03-24], dostupný z WWW: <http://www.patentstorm.us/patents/6902633-description.html>
- [18] Rapid prototyping versus CNC frézování. *CAD.cz* [online]. 2009 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/1909-rapid-prototyping-versus-cnc>
- [19] PROKOP, J. Přednáška 11.2.2010 Vybrané statě z obrábění, VUT-FSI.
- [20] *3D printing materials on Shapeways* [online]. 2013 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.shapeways.com/materials>
- [21] *Rapidproductdevelopment.biz* [online]. 2011 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://rapidproductdevelopment.biz/2011/11/28/3d-printers-for-shopaholics-and-santas-helpers/>
- [22] *Obrabeni-cnc* [online]. 2013 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.obrabeni-cnc.cz>
- [23] *Suché obrábění snižuje výrobní náklady* [online]. 2003 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/suche-obrabeni-snizuje-vyrobní-naklady.html>
- [24] PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1.vyd. 246s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [25] *3D printing materials* [online]. 2013 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://www.kraftwurx.com/3d-printing-materials/item/titanium-ti64?category_id=18
- [26] *DMLS Titanium* [online]. 2013 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.gpiprototype.com/blog/dmls-in-aluminum-inconel-or-titanium-is-it-worth-it.html>
- [27] PODHORNÁ, B. a KUDRMAN, J. Výzkum materiálových vlastností a vývoj nových technologií přesného lití spojených s náhradou kovaných žárovevých slitin za lité struktury. [Zpráva UJP1047]. Praha. 2003, 48 s.
- [28] *SGC proces* [online]. 2000 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: http://rpdrc.ic.polyu.edu.hk/images/images/sgc_process.gif.
- [29] Mega Mex. *INCONEL® Alloy 625* [online]. 2010 [cit. 2013-06-21]. Dostupné z: http://www.megamex.com/inconel_625.html

9 Seznam obrázků

- [W1] Easy CNC. *http://www.easycnc.cz* [online]. 2013 [cit. 2013-06-20]. Dostupné z: <http://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiech-3d-tisku>
- [W2] ww.designinsite.dk. *http://www.designinsite.dk* [online]. 2012 [cit. 2013-06-15]. Dostupné z: <http://www.designinsite.dk/htmsider/pb0056.htm>
- [W3] <http://www.custompartnet.com>. *Custompart.net* [online]. 2013 [cit. 2013-04-08]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [W4] Robo.hyperlink.cz. *Robo.hyperlink.cz* [online]. 2012 [cit. 2013-04-08]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/main10.html>
- [W5] <http://www.emeraldinsight.com>. *http://www.emeraldinsight.com* [online]. 2011 [cit. 2013-06-20]. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=877332&show=html>
- [W6] www.sciencedirect.com. *http://www.sciencedirect.com* [online]. 2006 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961205006290>
- [W7] 3DSystems. *http://production3dprinters.com* [online]. 2012 [cit. 2013-06-20]. Dostupné z: <http://production3dprinters.com/slm/spro125-direct-metal-slm-production-printer>
- [W8] 3DSystems. *Http://production3dprinters.com* [online]. 2012 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: <http://production3dprinters.com/slm/spro250-direct-metal-slm-production-printer>
- [W9] Arcam.com. *Arcam.com* [online]. 2013 [cit. 2013-06-20]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/technology/products/arcam-a1/>
- [W10] Arcam.com. *Arcam.com* [online]. 2013 [cit. 2013-06-20]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/technology/products/arcam-a2/>
- [W11] Eos.com. *Eos.com* [online]. 2013 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.eos.info/en/products/systems-equipment/metall-laser-sinter-systeme-kopie-1.html>
- [W12] Dmls.cz. *Dmls.cz* [online]. 2007 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: <http://www.dmls.cz>
- [W13] <http://www.rpmandassociates.com>. *http://www.rpmandassociates.com* [online]. 2013 [cit. 2013-06-03]. Dostupné z: <http://www.rpmandassociates.com/LaserDepositionTechnologyAdvancesAdditiveManufacturingAndRepair.aspx>

10 Seznam příloh

Tab.1.: Technické parametry tiskárny SPro™ 125

Tab.2.: Technické parametry tiskárny SPro™ 250

Tab.3.: Technické parametry tiskárny Arcam - 1

Tab.4.: Technické parametry tiskárny Arcam - 2

Tab.5.: Technické parametry tiskárny EOSINT M 280

11 Přílohy

Tab.1. : Technické parametry tiskárny **SPro™ 125**

SPro™ 125	
Max.pracovní prostor	125 x 125 x 125 mm (x, y, z)
Stavební rychlost	5 cm ³ - 20 cm ³ za hodinu
Rychlost skenování	až 1000 mm / s
Tloušťka vrstvy	20 - 100 μm
Průměr laserového paprsku	35 μm
Laserové možnosti	100 nebo 200 W
Vnější rozměry	1350L x 800W x 1900H mm
Váha	1125 kg hrubá, 900 kg netto
Napájení	208V 3PH, 30A, 60Hz nebo přes transformátor

Tab.2.: Technické parametry tiskárny **SPro™ 250**

SPro™ 250	
Max. pracovní prostor	250 x 250 x 320 mm (x, y, z)
Stavební rychlost	5 cm ³ - 20 cm ³ za hodinu
Rychlost skenování	až 1000 mm / s
Tloušťka vrstvy	20 - 100 μm
Průměr laser. paprsku	70 μm
Laserové možnosti	200 nebo 400 W
Vnější rozměry	1700L x 800W x 2025H mm
Váha	1225 kg hrubá, 1100 kg netto
Napájení	208V 3PH, 30A, 60Hz nebo přes transformátor

Tab.3.: Technické parametry tiskárny Arcam - 1

Arcam - 1	
Maximální stavěcí velikost	200x200x180 mm (W x D x H)
Povrchová úprava (vertikální a horizontální)	Ra25/Ra35
Výkon paprsku	50-3000 W (plynule měnitelný)
Velikost paprsku v bodu	0.2 mm - 1.0 mm (plynule měnitelný)
Rychlost skenování	až 8000 m / s
Stavební rychlost	55/80 cm ³ /h (Ti6Al4V)
Počet paprsků v místě	1-100
Vakuový základní tlak	<1x10 ⁻⁴ mBar
Napájení	3 x 400 V, 32 A, 7kW
Velikost a váha	1850 x 900 x 2200 mm (W x D x H), 1420 kg
Procesní počítač CAD rozhraní	PC
CAD rozhraní	Standardní: STL
Síť	Ethernet 10/100/1000
Osvědčení	CE

Tab.4.: Technické parametry tiskárny Arcam - 1

Arcam - 2	
Maximální stavěcí velikost	200x200x350 mm a Ø 300x200 mm (Wx D x H)
Povrchová úprava (vertikální a horizontální)	Ra25/Ra35
Výkon paprsku	50-3500 W (plynule měnitelný)
Velikost paprsku v bodu	0.2 mm - 1.0 mm (plynule měnitelný)
Rychlost skenování	až 8000 m / s
Stavební rychlost	55/80 cm ³ /h (Ti6Al4V)
Počet paprsků v místě	1-100
Vakuový základní tlak	<1x10 ⁻⁴ mBar
Napájení	3 x 400 V, 32 A, 7kW
Velikost a váha	1850 x 900 x 2200 mm (W x D x H), 1420 kg
Procesní počítač CAD rozhraní	PC
CAD rozhraní	Standardní: STL
Síť	Ethernet 10/100/1000
Osvědčení	CE

Tab.5.: Technické parametry tiskárny EOSINT M 280

EOSINT M 280	
Velikost stavební komory	250x250x325 mm
Druh a výkon laseru	Ytterbium, 200 nebo 400 W
Přesnost optiky	F-theta-čočky, vysokorychlostní skener
Rychlost skenování	7 m/s
Variabilní průměr ohniska čočky	100-500 μm
Generátor dusíku	integrovaný
Používaný software	EOSTATE Magics RP (Materialise)
Formát vstupních dat	primárně formát STL
Příkon	32 A
Spotřeba	max 8,5 kW
Hmotnost zařízení	1250 kg