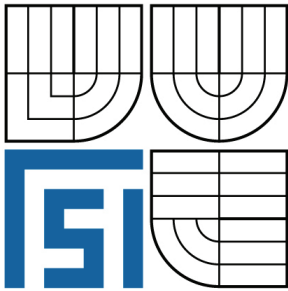


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# PŘEHLED TECHNOLOGIÍ PRO RAPID PROTOTYPING PRO VÝROBU KOVOVÝCH POTOTYPŮ

OVERVIEW OF RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGY FOR METALLIC PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ ŽABA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DAVID PALOUŠEK, Ph.D.

BRNO 2009



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2008/2009

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Tomáš Žaba

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

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

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

### **Přehled technologií pro rapid prototyping pro výrobu kovových pototypů**

v anglickém jazyce:

### **Overview of rapid prototyping technology for metallic parts**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je podat přehled současného stavu poznání v oblasti technologií pro rapid prototyping doplněný vymezením trendů budoucího vývoje.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat:

1. Definici základních pojmů.
2. Přehled a rozbor existující literatury v dané oblasti.
3. Analýzu a zhodnocení získaných poznatků.
4. Vymezení trendů budoucího vývoje.
5. Souhrnnou bibliografii.

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva.

Účel zadání: edukační

Typ BP: řešeršní

Seznam odborné literatury:

Rapid Prototyping Journal Vol:12, Num:4, 2006

Kai, Fai, Chu-Sing: Rapid Prototyping - Principles and Applications, World Scientific 2003, ISBN: 9812381201, p 448.

Gebhardt, A. Rapid Prototyping, Hanser, 2003. ISBN: 1-56990-281-X. ISBN: 3-446-21259-0.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. David Paloušek, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 21.10.2008

L.S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Cílem této bakalářské práce je podat přehled metod rapid prototyping, které umožňují zpracovávat kovové materiály. Vysvětluje principy starších i nejmodernějších metod, které jsou: selective laser sintering, direct metal laser sintering, laser engineered net shaping, direct metal deposition a elektron beam melting. V práci se nachází ukázky reálných aplikací na součástech. Ke konci jednotlivých metod jsou uvedena nejnovější zařízení dostupná na současném trhu a jejich technické specifikace. Celá práce je doplněna obrázkovou dokumentací. V závěrečné pasáži je analýza získaných poznatků a nastíněn možný budoucí vývoj.

## **KLÍČOVÁ SLOVA:**

Rapid prototyping, kovy, STL, selective laser sintering, direct metal laser sintering, laser engineered net shaping, direct metal deposition, elektron beam melting

## **ABSTRACT**

The aim of this bachelor paper is to make a survey of Rapid Prototyping methods which enable workability of metal materials. It explains the principles of older methods as well as the latest ones including Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, and Laser Engineered Net Shaping, Direct Metal Deposition and Electron Beam Melting. The paper presents the examples of practical applications on component parts. The latest equipment and machinery available on present market and their technical specification are listed at the end of the description of individual methods. The paper is completed with visual documentation. The final part of the paper contains the analysis of gained pieces of knowledge and future possible development is outlined.

## **KEYWORDS:**

Rapid Prototyping, metals, STL, Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Laser Engineered Net Shaping, Direct Metal Deposition, Electron Beam Melting

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:**

ŽABA, Tomáš. *Přehled technologií pro rapid prototyping pro výrobu kovových prototypů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Paloušek, Ph.D.



## **PROHLÁŠENÍ**

---

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně za pomoci uvedené literatury a konzultací s Ing. Davidem Palouškem, Ph.D.

V Brně dne 16.5.2009

.....  
Tomáš Žaba



## **PODĚKOVÁNÍ**

---

Děkuji Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce a dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu při studiu na vysoké škole.

---

**OBSAH**

<b>OBSAH</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>11</b>
<b>1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ</b>	<b>12</b>
<b>2 PŘEHLED A ROZBOR EXISTUJÍCÍ LITERATURY V DANÉ OBLASTI</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Tvorba geometrických informací</b>	<b>13</b>
2.1.1 STL - formát	13
2.1.2 Redukce objemu dat	14
<b>2.2 Selective Laser Sintering (SLS)</b>	<b>15</b>
2.2.1 Systém výroby vrstev	15
2.2.2 Pracovní komora	16
2.2.3 Výrobní parametry	17
2.2.4 Post-processing	17
2.2.5 Materiály pro SLS	18
2.2.6 Zařízení pro SLS	20
<b>2.3 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)</b>	<b>23</b>
2.3.1 Electro Optical Systems (EOS)	23
2.3.2 Konstrukce stavěcí komory	25
2.3.3 Materiály pro DMLS	25
2.3.4 Využití	26
<b>2.4 Laser Engineered Net Shaping ( LENS )</b>	<b>27</b>
2.4.1 Princip	28
2.4.2 Zařízení pro LENS	29
<b>2.5 Direct Metal deposition (DMD)</b>	<b>30</b>
2.5.1 Princip DMD	31
2.5.2 Closed Loop System	32
2.5.4 Využití	32
2.5.5 Zařízení pro DMD	32
<b>2.6 Electron Beam Melting (EBM)</b>	<b>35</b>
2.6.1 Princip EBM	35
2.6.2 Aplikace v medicíně	36
2.6.3 Aplikace v letectví	37
2.6.4 Materiály	38
2.6.5 Zařízení od firmy Arcam s EBM	42
<b>3 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ</b>	<b>44</b>
<b>4 VYMEZENÍ TRENDŮ BUDOUCÍHO VÝVOJE</b>	<b>45</b>
<b>5 SOUHRNNÁ BIBLIOGRAFIE</b>	<b>46</b>
<b>6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK</b>	<b>48</b>
<b>7 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ</b>	<b>49</b>

## ÚVOD

---

Při použití konvenčních metod obrábění se z kovového polotovaru odebírají vrstvy materiálu. Vznikají tak materiálové odpady, které většinou nemohou být dále zpracovány. Je zde vysoká časová náročnost, protože bývá používáno více technologií k vyrobení jediné součásti. Proto za účelem zrychlení výroby a snížení finančních nákladů byla vynalezena technologie rapid prototyping, která umožňuje zpracování i kovových materiálů. Komponenta vyrobená technologií rapid prototyping může představovat prototyp nebo přímo funkční součást.

Podstata této metody spočívá v návrhu 3D digitální součásti, která je rozkrájena na virtuální tenké vrstvy a podle těchto digitálních vrstev je tvořena reálná geometrie výrobku. Součást je stavěna vrstvu za vrstvou postupným přidáváním materiálu a nevzniká zde žádný odpad. Bez problémů může být vyroben jakýkoliv tvar součástky, která může být tvořena například vnitřními nesymetrickými dutinami, zkosenými žebry nebo osazením. Výrobní čas oproti konvenčním metodám se zkrátí ze dnů na hodiny.

Pořizovací cena výrobních zařízení RP je vysoká. Koupit zařízení se vyplatí pouze v případě výroby řádově stovek a více součástí. Trh s RP lze rozdělit na dva segmenty. V prvním segmentu jsou firmy, které mají RP zařízení a využívají ho zcela pro svoji potřebu. Ve druhém segmentu jsou firmy, které vlastní RP zařízení, ale sami ho plně nevyužívají, proto jeho volnou kapacitu nabízejí dalším potenciálním RP zákazníkům. Mezi české firmy nabízející kovové součásti vyrobené technologií RP patří například firma Hacker, která k výrobě kovových součástí využívá zařízení od firmy EOS pracující na principu direct metal laser sintering.

## 1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

Closed Loop System - systém tří kamer, které snímají výrobní parametry

Direct Metal Deposition - technologie využívající vysokovýkonný laser, ochranný plyn, systém senzorů a kovový prášek pro výrobu 3D fyzického objektu z kovového prášku.

Direct Metal Laser Sintering- technologie využívající laser ke spékání kovového prášku do 3D fyzického objektu.

Electron Beam Melting - technologie, která elektronovým paprskem spéká kovový prášek ve vakuovém prostředí do 3D fyzického objektu.

Laser Engineered Net Shaping - technologie využívající vysokovýkonný laser k roztavení kovového prášku, který je dále díky stlačenému plynu dodáván přímo na vyráběný 3D fyzický objekt.

Rapid Prototyping - rychlé zhotovení součásti postupným přidáváním materiálu

Selective Laser Sintering - technologie využívající laser ke spékání práškového materiálu do 3D fyzického objektu

3D digitální data - informace o 3D geometrickém tvaru modelu v počítači

## 2 PŘEHLED A ROZBOR EXISTUJÍCÍ LITERATURY V DANÉ OBLASTI

2

### 2.1 Tvorba geometrických informací

2.1

Prvním krokem k vytvoření geometrických informací pro výrobní proces je vymodelovat danou součást určitým softwarem. Na trhu se jich nachází mnoho, ale mezi nejpokrokovější a nepoužívanější patří například: Pro/Engineer, SolidWorks, Catia nebo Autodesk Inventor. Daná součást je digitálně vymodelována v softwaru. Model musí být virtuálně rozřezán na tenké vrstvy, podle kterých se bude vyrábět. Celý princip spočívá v nahrazení povrchových ploch trojúhelníky. Ty tvoří prvkovou síť. Informace získané z trojúhelníkové sítě jsou již vhodné pro virtuální řezání na výrobní vrstvy a nazývají se STL data. [2, 3]

#### 2.1.1 STL - formát

2.1.1

Jak už bylo uvedeno výše, celý povrch je nahrazen rovinnými trojúhelníky, které jsou přesně geometricky definovány. Množství a hustota sítě záleží na detailech vyráběného modelu. Čím je hustější síť, tím se exponenciálně zvětšuje objem dat a čas potřebný pro jejich vytvoření. Toto byl problém především minulých let, kdy nebyl na trhu k dispozici výkonný hardware.

Polohování trojúhelníku je popsáno analytickou geometrií. Trojúhelník patří mezi jednoduchý tvar a není těžké jej matematicky popsat. K popisu stačí pouze souřadnice bodů náležících v jeho vrcholech a úhel jeho normálového vektoru. Pouze těmito jednoduchými informacemi je možné absolutně popsat natočení a polohu jednoho trojúhelníku. [2]

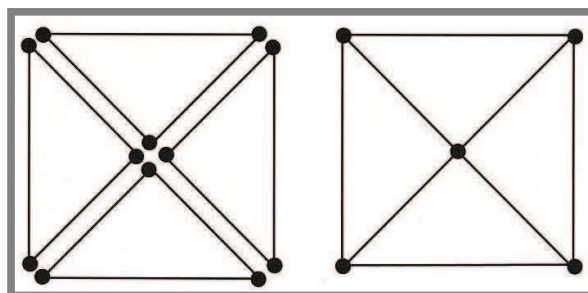
V dřívější době, při tvorbě STL dat, musela být CAD data transformována do příslušného programu, který převedl objemová data na STL. V dnešní době je tento převod integrován přímo v modelovacích programech.

Po takovémto vytvoření 3D dat STL se přechází k virtuálnímu krájení modelu na vrstvy (2D data). STL data jsou načtena do příslušných softwarů, které bývají dodávány k zakoupeným RP zařízením. Tyto softwary mají za úkol z dodaných dat vytvořit informace o výrobních vrstvách. Výsledkem jsou 2D data, která již mohou být načtena do výrobního zařízení. [3]

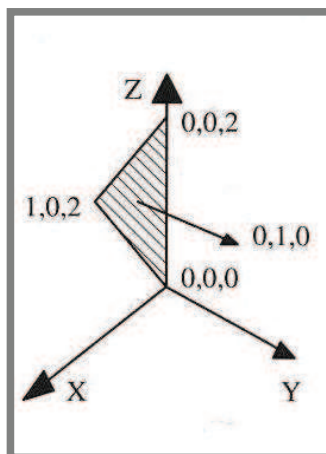
Na trhu se v současnosti vyskytuje více formátů podle použitého výrobce RP systémů.

Nejznámější celosvětové třídy jsou: CLI (EOS), HPGL (HP), SLC (Stratasys), BIN (Sanders), SLS (3D – Systems). [2, 3]

Velikost objemu STL dat záleží na tvarové složitosti modelu a na zvoleném stupni přesnosti převodu dat. Při tvarově složitějším modelu a vysokém zvoleném stupni přesnosti převodu, mohou STL data mít větší objem než data vymodelované součásti v CAD programu. Je to způsobeno tím, že při nahrazení povrchu trojúhelníkovou sítí dochází k duplikaci některých bodů. Vyskytují se v místech dotyku vrcholů sousedních trojúhelníků. Tedy náleží-li jeden bod na vrcholu čtyř trojúhelníků, musí být jeho souřadnice 4krát poznamenány pro každý trojúhelník zvlášť. Ovšem i takovéto duplikace jsou nezbytné pro výrobní proces. [1]



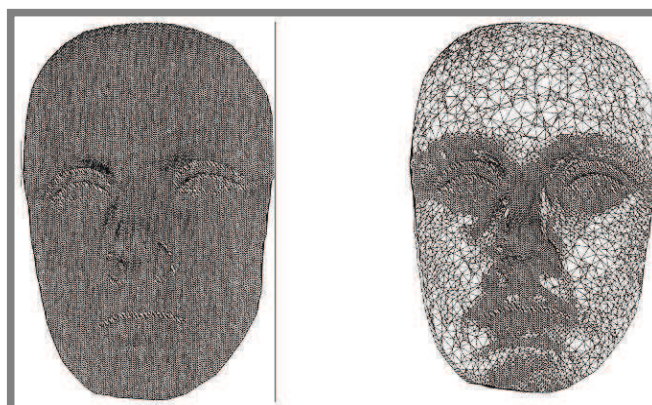
Obr. 1 Duplikace bodů [1]



Obr. 2 Geometrický popis trojúhelníku [1]

### 2.1.2 Redukce objemu dat

U tvarově složitějších součástí může být velikost dat opravdu velká, stejně jako čas potřebný pro jejich vytvoření. Čím větší jsou detaily, tím více je zapotřebí z hustit trojúhelníkovou síť. Pokud by měl být model pokryt stejnou hustotou trojúhelníkové sítě, tak jako u nejdrobnějších detailů, prodlužoval by se návrhový i výrobní proces (pokud se používá méně výkonný hardware). Protože ne všechna místa vyráběné součásti jsou stejně detailní, může zde být použita menší hustota sítě. Výsledná prvková síť není proložena konstantně velkými trojúhelníky. Na určitých částech hustotu elementů volí zkušený pracovník.

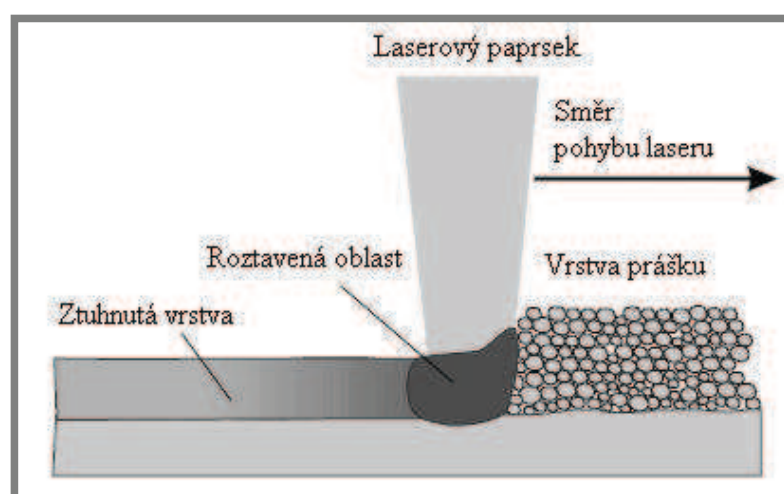


Obr. 3 Redukce dat 50% [4]

## 2.2 Selective Laser Sintering (SLS)

Obecné spékání je doprovázeno vysokým tlakem a vysokou teplotou. Mezi dvěma blízkými částicemi probíhá difúze. Doba spékání bývá všeobecně dlouhá.

Při spékání pomocí laser sintering není vůbec používán tlak. Ke spečení dvou sousedních částic stačí působit určitou tepelnou aktivitou po krátkou dobu. V práškové nádobce jsou kovové částice a je zde lokálně zaměřována tepelná energie z laserového paprsku, která díky vysoké teplotě natavuje povrch kovových částic. Po jejich natavení jsou spečeny a opět ochlazeny do tuhého stavu. Difúze zde neprobíhá. Princip spočívá v molekulární struktuře, kde mezi sebou reaguje viskozita natavené částice a povrchové napětí. Tyto reakce záleží jedině na vlastnostech použitého materiálu a teplotě. [2]

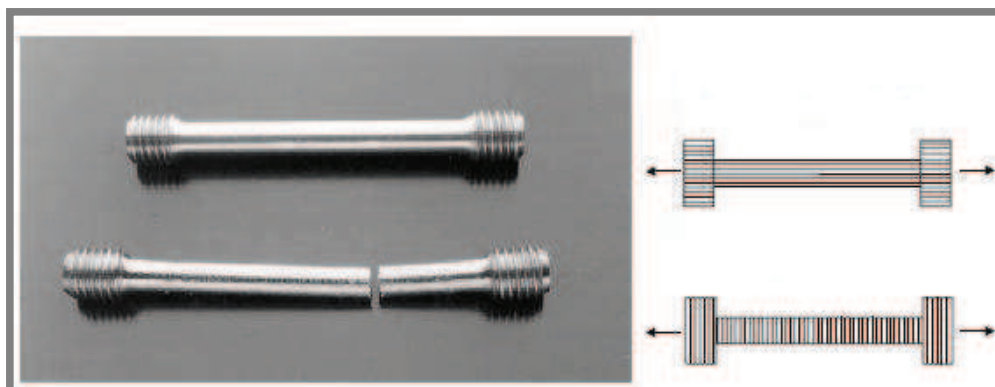


Obr. 4 Princip SLS [4]

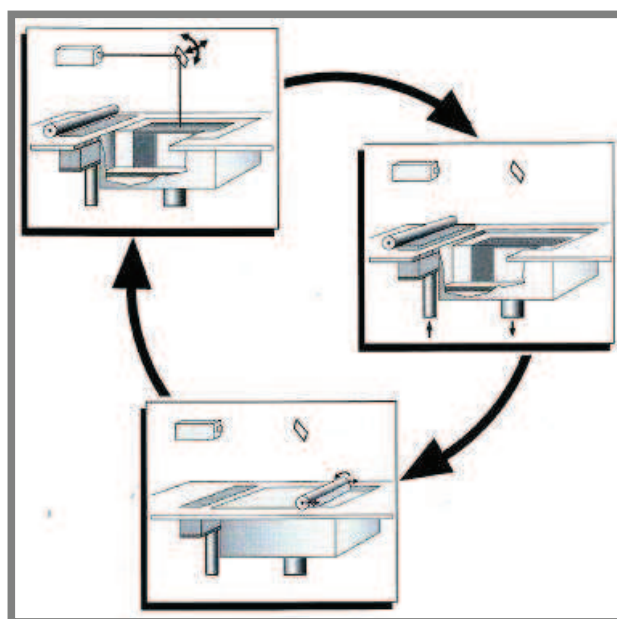
### 2.2.1 Systém výroby vrstev

Nejvhodnější velikost používaných částic je v rozmezí 50-100 mikrometrů. Tyto částice se umísťují do práškové nádobky, kde jsou lehce stlačeny. Jejich správné stlačení je důležité pro příznivý průběh celého procesu. Na částice potom dopadá zaměřená tepelná energie laseru, která způsobuje jejich místní roztavení. Následně probíhá jejich ochlazování, které je ztuhuje dohromady do vrstvy. Tento postup vytvoří jednu vrstvu. Po této operaci dochází ke snížení původní vrstvy částic v nádobce. Chybějící vrstva je doplněna dalším materiálem a dále se opakuje první krok výroby, kde je opět pomocí řízeného ochlazování zhutňována další vrstva k předešlé. Tento postup je dále několikrát opakován. [2] Výroba vrstev je precizně řízena elektrotechnikou, což umožňuje spékání materiálu do potřebných přesných tvarů.

Polohu budoucího výrobku v práškové nádobce je možné do jisté míry zvolit. Bude-li vyráběná součást při výrobě orientována horizontálně, průběh vrstev bude taky horizontální. V umístění svislém mají vrstvy svislý směr. Díky ovlivnění geometrie výroby, lze částečně zlepšit mechanické vlastnosti zjištěné například tahovou zkouškou. [2]



Obr. 5 Průběh vláken [2]



Obr. 6 Princip výroby vrstev [2]

### 2.2.2 Pracovní komora

Pracovní komora patří mezi nejdůležitější části stroje, protože se v ní odehrává celý výrobní děj. Původně byly sestrojeny 2 základní typy pracovních komor. Jeden typ pracuje bez vnitřního předehřevu a druhý typ s předehřevem. Komora bez teplotního předehřátí se však pomalu přestala vyrábět, jelikož je z ekonomického hlediska výhodnější při této metodě používat předehřátou pracovní komoru. Její výhodou jsou menší náklady na výrobu než při dodávání celé tepelné energie pomocí laseru. V současné době se proto již využívá pouze komora s předehřevem. Ta se vyhřívá na teplotu pohybující se pár stupňů pod teplotou tavení spékaného materiálu. Laser potom dodává pouze chybějící teplo k tavení. Komora musí být zařízena tak, aby byla schopna regulovat vnitřní teplotu podle potřeby a to v rozmezí pár stupňů. Jinak se zhoršují výstupní parametry vyráběné součásti. Vestavěná regulovatelná klimatizace dodává neustále do pracovní komory dusík, aby bylo zabráněno negativní reakci kovu s kyslíkem - oxidaci. [2]

Velkou výhodou je to, že není nutné používání podpor pod modelem, jak tomu bývá u většiny rapid prototyping metod. To je umožněno díky nespečenému prášku, nacházejícímu se pod samotným modelem v nádobce. Ten zcela zajistí plně funkční podporu během celého spékajícího procesu. [2]

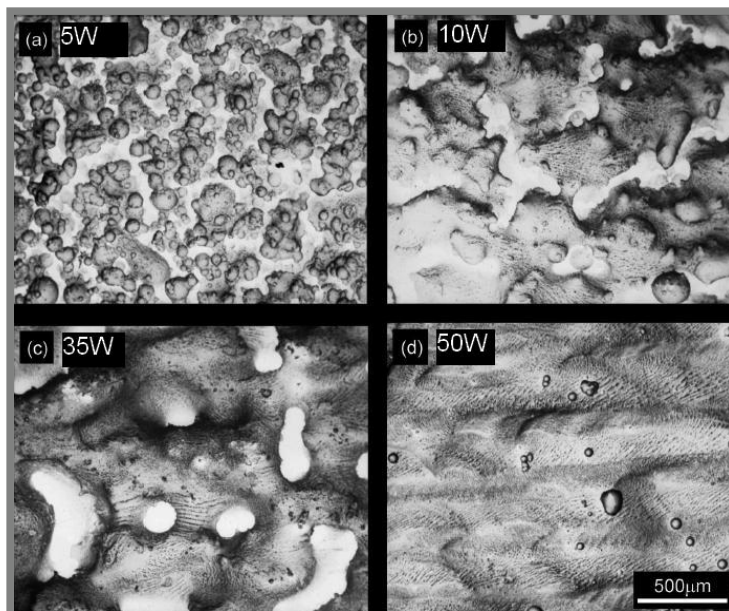
Systém nenajíždí hned na plný pracovní výkon, ale postupně se „rozjíždí“. Laser je nejprve nastaven na dvojnásobnou posuvovou rychlost a zároveň na poloviční výkon. K úplné synchronizaci laserového výkonu a posuvové rychlosti dochází až po vytvoření několika prvních vrstev. Ty jsou díky „neperfektním“ podmínkám mírně zkrouceny a zároveň využity jako podpory modelu. [2]

Výrobní geometrie a celkové výstupní výsledky jsou především závislé na dodržení dané bilance teplotního pole v pracovní komoře, dodávání dusíkatého plynu a propočtu výrobních dat příslušným softwarem.

### 2.2.3

#### 2.2.3 Výrobní parametry

Od geometrického tvaru požadovaného výrobku je odvozen také potřebný výrobní čas. Výroba součásti v rovině X-Y je rychlejší než v ose Z. U středně kvalitních strojních zařízení byla vyzorována potřeba přibližně 1h práce k vytvoření 10 mm<sup>3</sup> modelu. U modernějších zařízení výrobní doba klesá. Z průměru paprsku laseru vyplývá výsledná přesnost, která bývá v desetínách až setinách. Nejjemnější detaily jsou v rozmezí od 0,02mm do 0,5mm, opět v závislosti na modernosti pracovního zařízení. Struktura materiálu záleží na výkonu laseru a posuvové rychlosti laseru. [2]



Obr. 7 Použití rozdílných výkonů laseru [6]

#### 2.2.4 Post-processing

### 2.2.4

Prvek je vyráběn v práškové nádobce a je tedy celý obklopen drobnými částicemi. Po vytvoření poslední vrstvy vyráběného prvku, je tento ještě převrstven několika centimetry používaného prášku a ponechán tak někdy i několik hodin, aby proběhla postupná tepelná kondukce a materiál byl dokonale ztužen. Zároveň je tímto

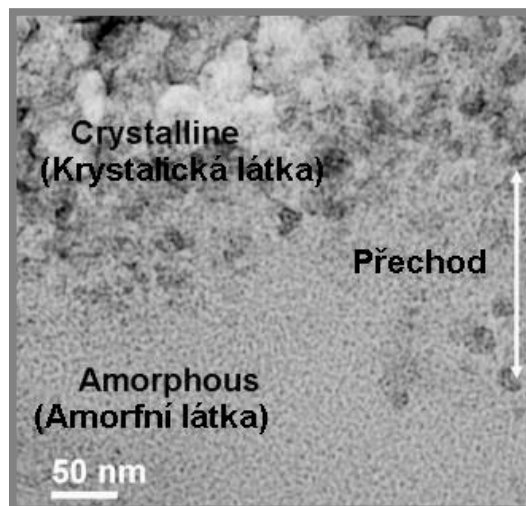
zabráněno popálení obsluhy. Díky vysoké použité teplotě je ovlivněno i blízké okolí součástí. To se projevuje místními spečeninami k vyráběnému modelu. Model je vyjmut ze stavěcí komory a umístěn na čistící stůl. Zde je opatrně zbaven vzniklých nežádoucích spečenin. Jsou k tomu použity různé nástroje. Především kartáče, škrabky a pneumatické pistole. Je zde předpokládána určitá časová náročnost a hlavně drobná práce v místech s jemnými detaily. Dále následují operace podle potřeby zadavatele a úprava výrobku. Mezi povrchovou úpravu vyrobeného prvku můžeme zařadit: pískování, ruční broušení, finišování, barvení a lakování. [1, 2]  
Jsou-li nějaké části poškozeny a ulomeny, mohou se slepit dohromady pomocí vhodných lepidel.

---

### 2.2.5 Materiály pro SLS

V principu všechny materiály, které mohou být roztaveny a dále po ochlazení zkrystalizovat do tuhé fáze, mohou být použity pro proces spékání. Obvykle jsou používány částice o průměru 20-100 mikrometrů. Zrna se přesívají a tím je zaručen jejich výskyt v daném rozměru až devadesátiprocentní. Jsou zde rozdíly mezi amorfními a krystalickými látkami. Krystalické materiály mají po řízeném roztavovacím procesu větší snahu se smršťovat, což vede obvykle ke kroucení. Tato tendence může být kontrolována smršťovacími faktory, které mohou být uvažovány při tvorbě výrobních dat. Tyto hodnoty jsou empirické a nemohou zaručit dostatečnou dosahující přesnost. [2]

Například: jednosložkový prášek: plast, kov  
vícesložkový prášek: plast-kov, kov-kov



Obr. 8 Struktura amorfní a krystalické látky [5]

### Vícesložkový materiál: kov-plastový prášek

V podstatě se nejedná o nic jiného, než o směs drobných částic kovu a plastu, které jsou spečeny dohromady. Z technologického hlediska je tento postup považován za základní, jelikož je téměř shodný se spékáním samostatného plastu. Nejprve je směs pomocí tepelné energie spečena do tzv. „skořápky“. Pro tento produkt je používán

název „mladý produkt“. Plastový materiál je zde používán jako pojivo, protože má menší tavicí teplotu než kovový materiál. Této vlastnosti je využito v dalším kroku výrobní procedury. „Skořápka“ obsahující i kov je v peci ohřívána na teplotu tavení plastového materiálu. Při této teplotě je plast roztaven, ale kov nikoliv - ten drží svůj tvar modelu. [2]

Protože je zde z pohledu technologického pracováno více s plastem, je také tato metoda řazena do plastového spékání. V zařízení pro plastové spékání mohou být teoreticky spékány skoro všechny materiály. Za pomoci plastového materiálu lze provádět i spékání písku nebo keramiky. [2]

### **Vícesložkový materiál: kov-kovový prášek**

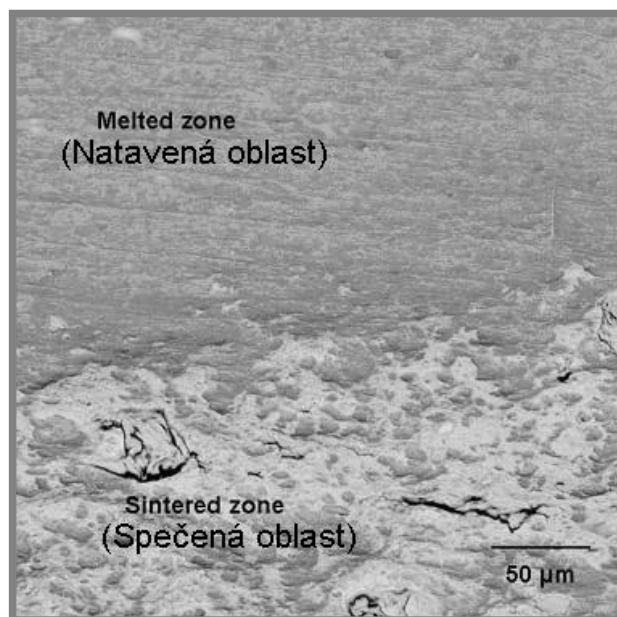
Postup výrobního procesu je velmi podobný jako při použití kov-plastového prášku. S tím rozdílem, že plastové částice jsou nahrazeny kovovými, které mají menší teplotu tavení než hlavní kov a zároveň zastupují vaznou funkci. Z hlavních kovových částic bude vytvořen konečný výrobek. „Mladý“ produkt je vložen do pece, kde je vedlejší vazný prášek vytaven díky jeho tavicí teplotě. Podle použitého hlavního materiálu se odvíjí i jeho mechanické vlastnosti. Vhodné jsou pouze materiály s určitými vlastnostmi. [2]

### **Jednosložkový materiál: kovový prášek**

Při spékacích pokusech byl jako první použit plastový materiál a to především kvůli svým vlastnostem, jako jsou nízká teplota tavení a nízké tepelné vedení. Nyní lze použít i kovové materiály a upravit tak celý řídicí proces výroby. Výhodou kovových materiálů je jejich vysoké povrchové napětí a menší viskozita v nataveném stavu. To je především zajištěno jejich molekulární strukturou. Jejich nevýhodou je ale naopak vyšší teplota tavení. [2]

Použití jednosložkového materiálu: kovový prášek se projevuje jako velmi výhodné řešení z hlediska časové náročnosti, materiálových charakteristik výrobku a vybavy pracoviště. Právě proto je zaměřeno mnoho výzkumů po celém světě na problematiku této oblasti. Těmito výzkumy se zabývají především University of Texas (Austin), Institute of Lasertechnology (Aachen-Německo) a Institute of Material and Beam Processing Technology (Dresden-Německo). Hlavním řešeným problémem je přesnost výrobku, snížení ekonomických parametrů při splnění požadavků zákazníka a další. Během vývoje šla každá výzkumná instituce svou cestou, ale nakonec se celý výzkum zúžil do 2 oblastí, které vystoupily do popředí celosvětových trendů výzkumu. Touto oblastí je řízení procesu selective laser sintering pro spékání kovových materiálů a použití laseru při sekundárním povlakování součástí. [2]

Evropská firma EOS vyrobila v roce 1998 stroj, který dovedl jako první na světě zpracovávat jednosložkový kovový materiál laserovým spékáním. Výrobek měl podobné mechanické vlastnosti jako odlitá ocel. [2]



Obr. 9 Rozdíl ve spečené a natavené struktuře [5]

---

### 2.2.6 Zařízení pro SLS

Firma 3D - System Corporation byla založena Charlesem W. Hullem a Raymondem S. Freedem v roce 1986. V roce 1987 byla ustanovena jako DTM corporation. S finanční dotací a využitím patentované technologie vynalezené na University of Texas at Austin sestrojila první komerční stroj v roce 1992. Později v roce 2001 byla koupena firmou 3D – System. [1]

Od výroby prvního stroje v roce 1992 uplynulo přibližně 17 let. Během těchto let se firmy a vědecké instituce po celém světě snažily o technický vývoj. Vývoj zařízení pro SLS lze rozdělit do 3 generací. V první byl vyvinut spékací stroj pod názvem Sinterstation 2000, do druhé generace patří Sinterstation 2500 a jeho modifikace 2500 plus. V poslední třetí generaci bylo vyvinuto nejlepší spékací zařízení pod názvem Vanguard. Pracuje na stejném principu jako předchozí zařízení, ale díky jeho modifikaci nabízí lepší výrobní parametry. Zaručuje větší rychlost výroby, hladší konečný povrch a celkově přesnější model. [1]

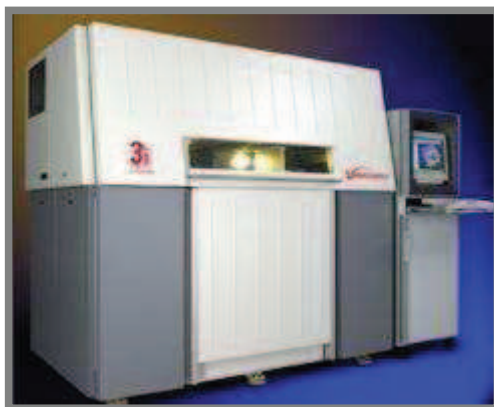
V posledních letech byly vyvinuty podobné zařízení firmou EOS a další přesnější zařízení pracující na jiném principu než SLS.



Obr. 2-10 Sinterstaion 2000 [2]



Obr. 11 Sinterstation 2500 plus [6]



Obr. 12 Vanguard [8]

### **Vanguard**

Jako materiál může používat kov, keramiku nebo nylon. Dokáže vyrábět složité křivky, mezi které patří i nelineární tvary. Výrobek má kvalitní povrch a je třeba jen minimální post-processing. Díky použitému materiálu a výrobnímu procesu, zvládá dělat přímo funkční části. Výrobek je tvořen v prostředí, které je plně automaticky kontrolované. Nevýhodou je potřeba vysokého výkonu pro funkci zařízení a potřeba většího prostoru pro umístění na pracovišti, protože k němu musí být připojena i zásobovací plynová nádrž. [1]

#### Technické parametry:

Použitý laser: CO<sub>2</sub>

Výkon: 25 až 100W

Maximální skenovací rychlost: 7500mm/s

Pracovní prostor: 370x 320x445mm

Minimální tloušťka vyrobené vrstvy: 0,076mm

Čas potřebný pro výrobu 1 vrstvy: 10s

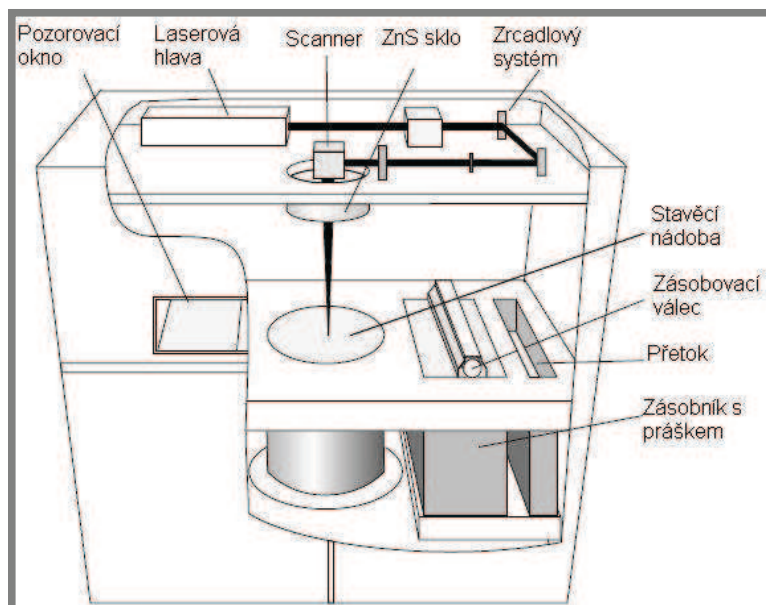
Operační systém: Windows 2000 [1]

Konstrukce a princip:

Nejdůležitějším místem celého stroje je pracovní komora, ve které se odehrává výrobní proces. Uprostřed pracovní komory je umístěna stavěcí nádoba s práškovým materiálem. Je podepřena nastavitelným pístem, který v průběhu výroby zajišťuje její posuv směrem dolů. Po krajích pracovní komory se nachází 2 přetoky. Mezi přetoky a stavěcí nádobou se vyskytují 2 zásobníky s práškem. Potřebu převrstvení novým materiálem zajišťuje zásobovací válec, který bývá drsný za účelem zvětšení tření mezi povrchem válce a materiálem. Ten „hrne“ prášek z jednoho zásobníku do stavěcí komory a s přebytečným materiálem pokračuje dál, kde je větší část zachycena do zásobníku na druhé straně. Práškový materiál, který nebyl pojmuto do stavěcí části, ani do druhého zásobníku, končí v přetoku. [2]

Díky použití 2 přetoků na obou stranách je šetřen čas, jelikož převrstvovaný proces může být prováděn oboustranně. Po spečení každé vrstvy výrobku laserem je snížen píst o tloušťku budoucí vrstvy. Následně dojde k doplnění chybějící vrstvy novým práškem. Stavěcí nádoba byla dříve kruhová, ale nyní bývá obdélníková. Celá pracovní komora je vyhřátá na teplotu přibližně 4°C pod tavicí teplotu použitého konstrukčního materiálu. Zařízení je vyplněno dusíkem. Spojitý dusíkový proud přes stavěcí oblast podporuje stálou teplotu, která se rozšiřuje v pracovním prostoru. Ten je zajištěn vestavěnou upravenou ventilací. [2]

V horní části pracovní komory je zvlášť oddělený prostor. Zde se nachází laserová hlavice, zrcadlový systém pro směřování laseru a zaostřovací scanner. Kruhový přechod mezi touto oddělenou částí a pracovní komorou je tvořen ZnS sklem, které je pro případ údržby vyjímatelné. Celý výrobní postup je sledovatelný zvenčí přes sklo, které je zabudované v krytu pracovní komory. To je vhodné pro prezentaci výrobního postupu a kontrolu výroby. [2]



Obr. 13 Schéma pracovní komory [2]

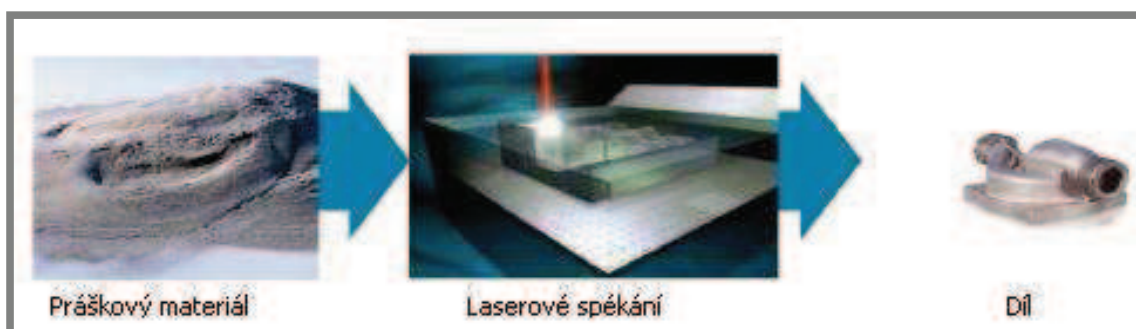
Pro dosažení perfektních výsledků je kvůli směru vrstevných vláken důležitá orientace modelu a důkladné prohřátí pracovní komory. Změní-li se pracovní teplota

okolí, může dojít k nežádoucím jevům, jako jsou: kroucení, spálení, špatné spečení nebo rozdílnost barev. Zařízení je tedy vybaveno tepelnými senzory, které monitorují teplotní pole v několika místech. Podle potřeby upravují teplotu na optimální. Regulovat teplo je možno v několika místech současně. Regulátory jsou umístěny ve zdech pracovní komory, v horních místech pracovní nádoby a v převrstvovacích válcích. [2]

Po skončení výroby je v pracovní komoře a na povrchu výrobku stále vyšší teplota. Před vyjmutím součásti musí proto vše zchladnout na takovou teplotu, aby nedošlo k popálení lidské ruky. Pak je možné dále manipulovat vevnitř pracovní komory. Jak je výrobek odstraňován ze zařízení, dochází k výměně vnitřního dusíkatého plynu s okolním kyslíkem. Protože kyslík je při spékání z hlediska oxidace nežádoucí, musí být pracovní komora před dalším výrobkem utěsněna a stabilizována. To je provedeno pomocí čerstvého dusíku ze zásobníku. [2]

### 2.3 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

DMLS umožňuje výrobu přímo plně funkčních kovových dílů. Díky použití jediné technologie výroby jsou ušetřeny investice a čas. Součásti, které byly vyrobeny metodou DMLS se z pohledu mechanických vlastností mohou přímo srovnávat s díly, které byly vyrobeny odléváním nebo klasickým obráběním. Vyrobený díl může být jak prototyp, tak finální výrobek. Není problém DMLS aplikovat i v malosériové výrobě. [9]



Obr. 14 Vznik dílu DMLS [9]

Po vyrobení součásti se provádí dokončovací operace, kterými se musí odstranit podpory od výrobku. Dále se výrobek může obrábět klasickými metodami, pískovat, leštit, brousit nebo tryskat. Prášek, který nebyl spotřebován, se vrací do výroby. DMLS je tedy jak ekonomická, tak ekologická technologie.

#### 2.3.1 Electro Optical Systems (EOS)

Firma GmbH- Electro Optical Systems byla založena v roce 1989. V roce 1994 představila své první spékací zařízení pro plasty s označením EOSINT P a v roce 1995 vyvinula zařízení pro přímé spékání kovů (DMLS) s označením EOSINT M250. Tímto strojem byla první firmou na světě a zajistila si tak dominantní postavení na světovém trhu. Ve stejném roce dále představila zařízení, které spéká písky pro výrobu slévárenských forem s označením EOSINT S700. V roce 1998 firma EOS sestrojila jejich první dvoulaserové spékací zařízení pro plasty

s označením EOSINT P700. Řady systémů bývají označovány písmenem podle zpracovávaného materiálu: P - plasty, M - kovy, S - písky. [1] Přehled zařízení od firmy EOS: EOSINT (P350/60, P350, P700/730 s 2 lasery, P800) - pro plasty, EOSINT (M160/prototyp, M250/250 extended, 270) - pro kovové slitiny a kovový prášek, EOSINT (S350, S700/750) - pro písky. [1, 11]



Obr. 15 EOSINT M270 [9]



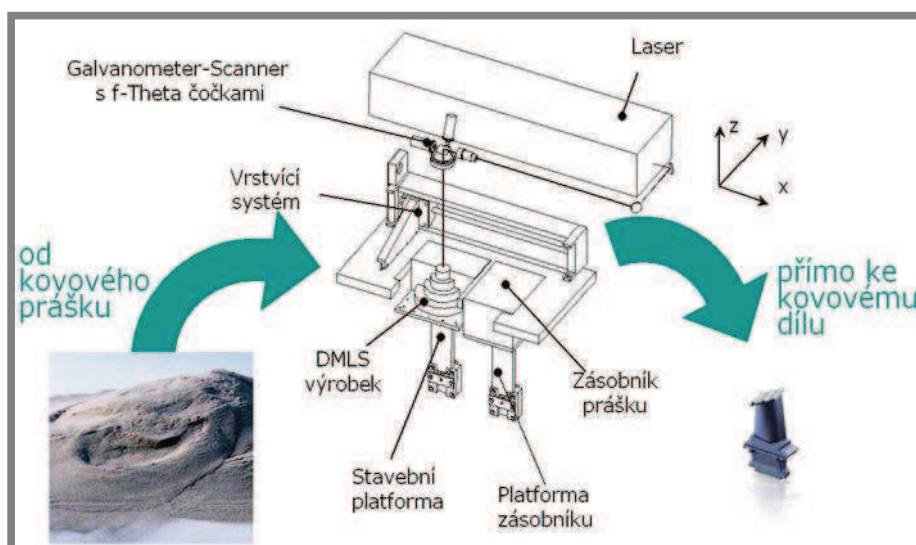
Obr. 16 EOSINT P800 [11]



Obr. 17 EOSINT S750 [11]

### 2.3.2 Konstrukce stavěcí komory

Stavěcí komora, ve které je součást vyráběna, má rozměry 250x250x(125-185) mm. Pohyblivá stavěcí platforma se pohybuje ve směru osy Z a vždy se sníží o tloušťku vrstvy, která bývá v rozmezí 0,02-0,1mm. Vedle je umístěn práškový zásobník ve stejné výšce. Na druhé straně se nachází přetékací kontejner. Nad těmito komorami je jednosměrný vrstvicí mechanismus s nesymetrickou lopatkou. Ta musí cestovat dvakrát za jedno nanesení vrstvy prášku. V horní části se vyskytují skenovací zrcátka, která jsou chlazena, aby na ně vlivem teploty nepůsobila tepelná dilatace. Ve stroji je zabudovaný vlastní generátor s dusíkem, který je řízeně dodáván do pracovní části a to podle monitorovaného obsahu kyslíku. [2]



Obr. 18 Konstrukce pracovní komory [12]

### 2.3.3 Materiály pro DMLS

Spektrum použitelných materiálů je opravdu široké. Mohou to být superslitiny, lehké slitiny, ocel a dokonce i kompozity. Firma EOS si pro EOSINT M vytvořila speciální materiály, které později také znormalizovala. [10] Těmito materiály jsou například:

Direct Metal 20 (DM 20) je velmi jemný multikomponentní prášek na bázi bronzu. Výsledné díly nabízí dobré mechanické vlastnosti s výborným rozlišením detailu a kvalitou povrchu. Povrch výrobku lze snadno dokončit tryskáním, nebo může být velmi snadno vyleštěn. Tento materiál je ideální pro výrobu funkčních kovových prototypů. Zároveň je vhodný pro výrobu prototypových, či malosériových vstřikovacích forem. [doslovná citace 10]

Direct Steel 20 (DS 20) je velmi jemný multikomponentní prášek na bázi oceli. Nabízí vysokou pevnost, tvrdost, ořezavost a hustotu povrchu. Rychlost výroby v porovnání s DM 20 je nižší a to vzhledem k nutnosti důkladného protavení povrchu dílu. Tento materiál nachází využití zejména při výrobě vstřikovacích forem a funkčních prototypů. [doslovná citace 10]

Nerezová ocel (EOS SS 17-4) je nerezová ocel ve formě jemného prášku. Její složení odpovídá US klasifikaci 17-4, evropské normě 1.4542 a splňuje požadavky AMS 5643 pro Mn, Mo, Ni, Si, C, Cr a Cu. Tento typ oceli je charakteristický vysokou korozní odolností a mechanickými parametry. Výrobky z této oceli mohou být dále opracovány tryskáním, obráběním, leštěním, mohou být svařovány či pokoveny. Tento materiál je ideální pro výrobu funkčních kovových prototypů, individualizovaných dílů či náhradních dílů. [doslovná citace 10]

Martenzitická ocel 1.2709 (EOS MS 1) je martenzitická ocel ve formě jemného prášku. Její složení odpovídá US klasifikaci 18 Maraging 300, evropské 1.2709 a německé X3NiCoMoTi 18-9-5. Tento typ oceli je charakteristický velmi vysokou pevností a tvrdostí povrchu. Je snadno obrobitelná a následně vytvrditelná až na 54 HRC. Materiál se běžně používá pro výrobu forem a nástrojů či vysoce zatěžovaných průmyslových součástí. [doslovná citace 10]

Kobalt Chrom (EOS CC MP1) je směs jemného prášku, ze kterého lze na zařízení EOSINT M270 získat díly z Cobalt Chrome Molybden superslitiny. Tato superslitina je charakteristická excelentními mechanickými parametry (pevnost, tvrdost, ...), korozní a teplotní odolností. Slitina se běžně používá pro medicínské aplikace (implantáty, zubní náhrady) a také pro výrobu vysoce tepelně zatěžovaných součástí (letecké motory). [doslovná citace 10]

Titan (EOS Ti 64 / Ti64ELI) je slitina ve formě jemného prášku. Pro tuto lehkou slitinu jsou charakteristické excelentní mechanické vlastnosti a korozní odolnost v kombinaci s nízkou specifickou hmotností a biokompatibilitou. Materiál se používá zejména v letectví, při výrobě závodních automobilů a v medicínských aplikacích (implantáty). [doslovná citace 10]

---

### 2.3.4 Využití

DMLS je na trhu přibližně 15 let a dostává se do popředí výrobních metod. Díky své rychlé výrobě a kvalitním mechanickým vlastnostem nachází uplatnění v širokém spektru průmyslu. Například v letectví, lékařství, energetickém průmyslu, automobilovém průmyslu a obecném průmyslu. S vývojem zařízení a vhodných materiálů se využití DMLS neustále rozšiřuje.



Obr. 19 Turbinová lopatka vyrobená DMLS [13]



Obr. 20 Kloubní implantát vyrobený DMLS [13]

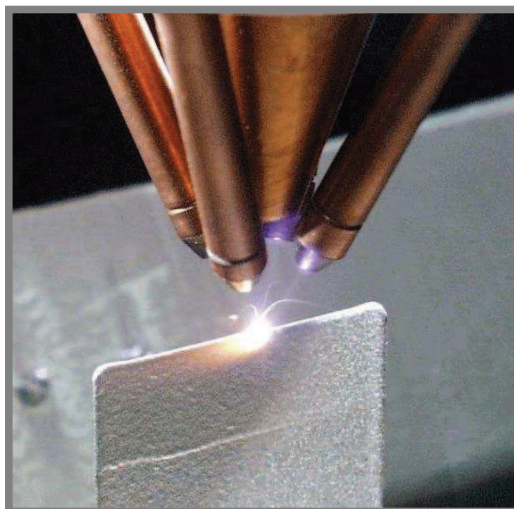


Obr. 21 Prototyp ozubeného kola vyrobený DMLS [12]

## 2.4 Laser Engineered Net Shaping ( LENS )

V roce 1963 byla Thomasem Swannem založena firma Optomec, která se zabývala především optomechanickými systémy a vybavením pro RP. V Sandia National Laboratory (SNL) v USA byla Davidem Keicherem vynalezena technologie LENS, která zde byla také patentována. Tento vynálezce uvedené technologie se v roce 1997 stal společníkem Optomecu a tato firma potom přebrala i licenci pro LENS proces. Firmy SNL a Optomec se staly společníky, jejichž plánem byl rozvoj této technologie, aby mohla být lépe použitelná v průmyslu. Hlavním cílem bylo vytvoření zařízení, které dokáže produkovat plně funkční kovový prototyp i v sériové výrobě a to za použití různých kovových materiálů. [2]

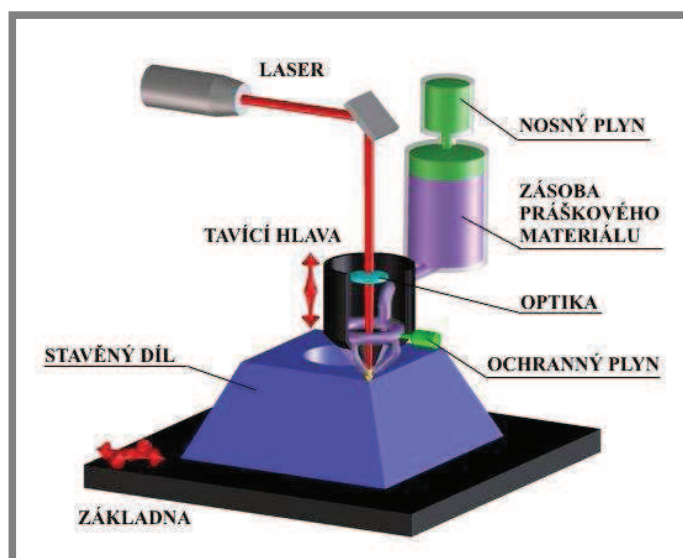
Systémy pracující s LENS technologií používají vstupní STL data. Optimální software je SolidWorks Rapid Prototyping. [2]



Obr. 22 Ukázka technologie LENS v praxi [14]

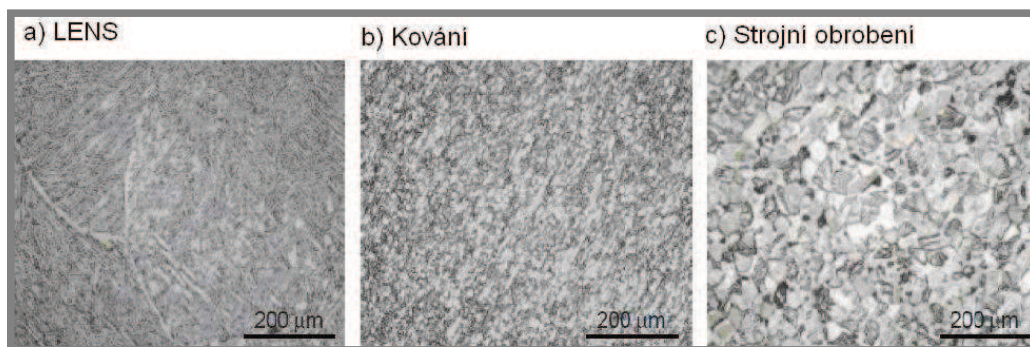
### 2.4.1 Princip

Prášek, ze kterého bude vyrobena součást, je vedle v zásobníku, kde v horní části působí stlačený plyn. Ten dodává prášek několika tryskami do místa, kde je zaostřován laser. Zde se taví a z tavící hlavy pokračuje do aplikovaného místa. Díky tepelné kondukcí tuhne na vyráběné součásti. [2, 3]



Obr. 23 Schéma technologie LENS [3]

Součást se vyrábí postupně vrstvu za vrstvou. Po vytvoření jedné vrstvy se celý proces opakuje s tím rozdílem, že další vrstva je nanášena do kříže (otočena o 90°). Tavící hlava se pohybuje vertikálně v ose Z a definuje tloušťku vrstvy. Pohyb v rovině X-Y vykonává stůl. Celý proces je plně automatizován. Pro tavení prášku se používá kontrolovatelný 700W Nd: YAG laser. Laserový proces v LENS technologii zjemňuje zrno v konečné struktuře součásti a díky tomu má vyráběná komponenta větší tvárnost a vyšší odolnost v tahu, než při použití jiných výrobních metod. [2, 3]



Obr. 24 Struktura materiálů při použití různých technologií výroby [15]

Celý výrobní proces je uzavřen v utěsněné komoře, která je vyplněna ochranným plynem. Ten je zvolen podle druhu použitého materiálu. Ochranný plyn je zároveň částečně přiváděn do tavicí trysky. V komoře se nachází atmosférický tlak a stejná teplota jako v okolí stroje. Dále je v komoře také zabudováno pozorovací okno pro sledování výroby, videokamera a trubky pro plyn. [2]

Technologie LENS se vyznačuje zejména vysokou kvalitou a velkou rychlostí výroby součástí. Tato rychlost je závislá především na složitosti a velikosti výrobku. Výrobek je možno zhotovit během několika hodin. V rovině X-Z se dá dosáhnout přesnosti 125 mikrometrů a v ose Z 225 mikrometrů. Po dokončení výroby je nutno odstranit podpory a dále je možno součástku upravovat, například broušením. Nejvhodnější využití LENS je pro plně funkční výrobky, nástroje a jejich opravu. Při použití této technologie jsou opravy velmi kvalitní a okolí opravované části tepelně skoro neovlivňují. Technologie LENS se využívá především v medicíně, letectví a vojenství. [2, 16]

#### 2.4.2 Zařízení pro LENS

V současnosti se na trhu vyskytují 4 zařízení od firmy Optomec, která pracují na principu LENS technologie. Nejstarším zařízením je LENS MR-7, dále LENS 750 a nejmodernějším je LENS 850-R. [16]

2.4.2

---

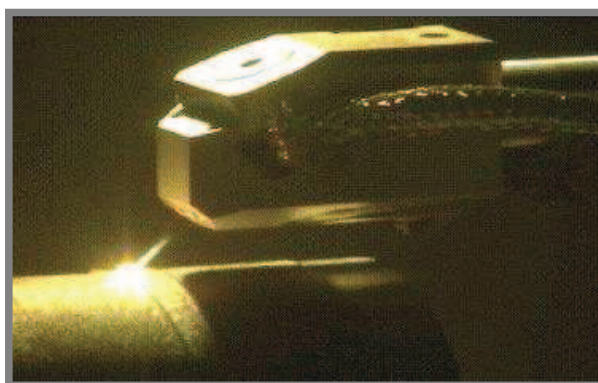


Obr. 25 Zařízení LENS 750 [17]



Obr. 26 Zařízení LENS 850-R [17]

Firma Optomec nyní nabízí svoji novinku Deeprepair Head (opravnou hlavu). U LENS systému je díky této opravovací hlavě rozšířené spektrum opravovaných součástí. Díky své konstrukci může dosáhnout do těsných prostorů a zde opravovat vady. Současným trendem v průmyslu je skládat komponenty do sestavy z menších součástí. Tyto sestavy jsou však nerozložitelné, což ztěžuje jejich možnou opravu. Vzhledem k rostoucí ceně komponentů je však výhodnější zařízení opravovat, než kupovat stále nové. Při použití obvyklých metod oprav, by se také mohlo stát, že nebude možno opravu provést v místech s omezeným přístupem. Právě zde je vhodné využít k opravě Deeprepair Head. [16]



Obr. 27 Deeprepair Head [16]

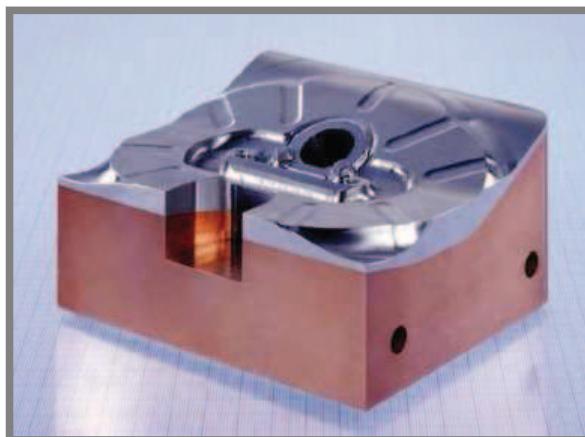
---

## 2.5 Direct Metal deposition (DMD)

Zakladatel technologie DMD je Dr. Jyoti Mazumder. Začal spolupracovat s americkou firmou Pomgroup a tak bylo umožněno rozšíření DMD do světa. V roce 2003 podepsala firma Pomgroup smlouvu o spolupráci s německou firmou Trumpf. To zpřístupnilo použití této metody i pro evropský trh. Princip metody DMD je podobný jako u technologie LENS. Rozdíl je v použitých konstrukcích, které jsou od dvou firem rozdílné. [3, 18]

DMD technologie dokáže z kovového prášku a zaostřeného laseru přímo vytvořit kovovou součást. Při použití uvedené technologie lze za extrémně krátký čas vytvořit

tuto součást vysoce přesnou. DMD lze použít jak pro výrobu nové součásti či opravu poškozených dílů, tak i pro navařování tvrdých povlaků. Tvrdý povlak ze super slitiny se navaří na již vytvořenou součást a tak zvýší její otěruvzdornost. [18]



Obr. 28 Ukázka navaření nástrojové oceli na měděnou slitinu [19]

### 2.5.1 Princip DMD

2.5.1

---

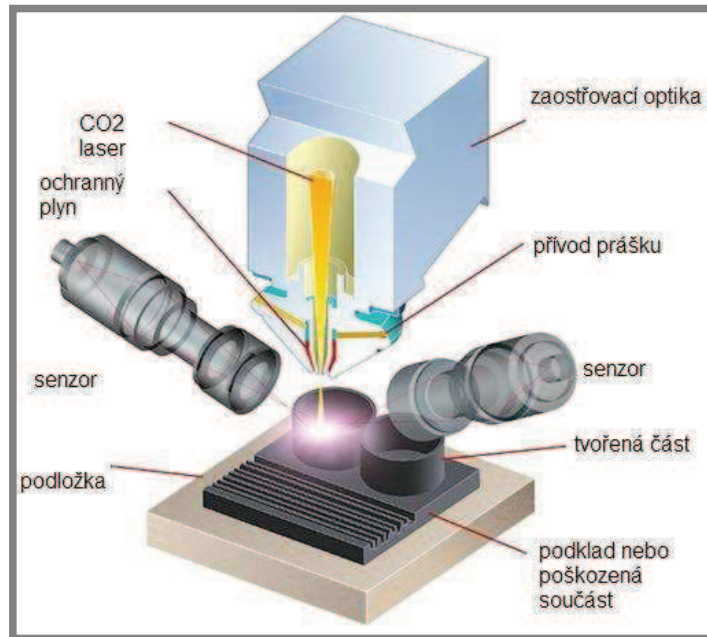
DMD systém přímo podle dat z počítače konstruuje komponentu plně automaticky. Jako u SLS, DMLS, LENS je 3D model z CADu rozkrájen na vrstvy a součást je postupně tvořena podle těchto vrstev na obdobném principu jako metoda LENS. Do místa, kde přijde nový materiál, je zaostřován laser. Díky tepelné energii laseru se roztavuje malá oblast a do této roztavené oblasti je přivedeno přesné množství stavěcího kovového prášku. Dochází zde ke spečení dodaného prášku a po jeho zchladnutí dostává pevný tvar. Dosahovaná přesnost Ra bývá 10-25 mikronů. [18]



Obr. 29 Ukázka DMD v praxi [19]

### 2.5.2 Closed Loop System

Je důležité se ujistit, že každá nová vytvořená vrstva má stejnou kvalitu jako vrstvy předešlé. Proto je aktivní proces při výrobě mírně korigován. Začne-li se vyrobená geometrie odlišovat od předem navržené, je to detekováno 3 senzory. Tento systém se nazývá Closed Loop System. Jsou to 3 optické kamery, které jsou vůči sobě umístěny po 120° a tak mohou dokonale snímat 3D obraz. Jedná se o optický systém, který neustále monitoruje výkon laseru, velikost roztavené oblasti, rychlost toku prášku a pohyb výstupní trysky. Closed Loop System zaručuje kvalitu produktu a rozměrovou stabilitu při výrobě. [18]



Obr. 30 Schéma technologie DMD [18]

### 2.5.4 Využití

DMD dokáže zpracovávat velké množství materiálu. Jsou vhodné i ty materiály, které jsou ve výsledku velmi tvrdé slitiny. Například nástrojová ocel (Fe, C, Cr, V), cermety, hliníkové slitiny (Al-Mg-Si), niklové slitiny, titanové slitiny (Ti6-4, Ti6242) a další. Díky rozsáhlému spektru použitelného materiálu, krátkým časům výroby a vysoké kvalitě výrobku, je DMD technologie používána skoro ve všech odvětvích průmyslu. Například ve vojenském průmyslu (plynové turbíny - lopatky, svodné stěny, kryty, hřídele, helmy...), konstrukce (kryty, lopaty buldozerů...), automobilový průmysl (ozubená kola, pístní kroužky, vačkové hřídele), letectví (oběžná kola, disky, jádra vrtulí, tryskové segmenty, ...), medicína (ortopedické implantáty, stehenní komponenty, zubařské kleště), nukleární průmysl (trubky, ventily, palivové tyče, ...) a další. [18]

### 2.5.5 Zařízení pro DMD

V současnosti se na trhu od firmy Pomgroup vyskytují zařízení DMD 105D a robot DMD-DMD 44R/66R. Velké uplatnění si tyto stroje našly v armádě, která je umísťuje na letadlové lodě. Pokud je poškozena nějaká kovová součást na lodi nebo v leteckém stroji, jsou informace o poškození posílány na pevninu do velitelství. To

obratem na loď přepošle výrobní nebo opravné informace pro DMD zařízení. Poté je součást znovu vyrobena nebo opravena přímo na lodi. [18]

DMD 105D je pětiosý systém, sestavený pro výrobu malých komponentů z kovového prášku nebo přímo pro opravu poškozených součástí v průmyslových aplikacích. Nejčastější využití se nachází v RP, navařování, opravě nástrojů, opravě plynových turbín a opravě hřídelů. [18]

Technické specifikace DMD 105D :

Pracovní prostor: 300x300x300mm

Rychlost posuvu: 7620mm/min

Nejmenší posuv v ose Z: 0,001mm

Počet zásobníků prášku: 1

Hmotnost stroje: 318kg

Rychlost výroby: 10-70cm<sup>3</sup>/h

Výkon laseru: 1000W [18]

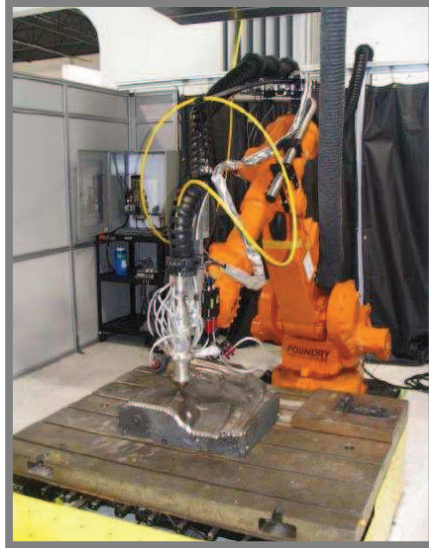


Obr. 31 Zařízení DMD 105D [18]

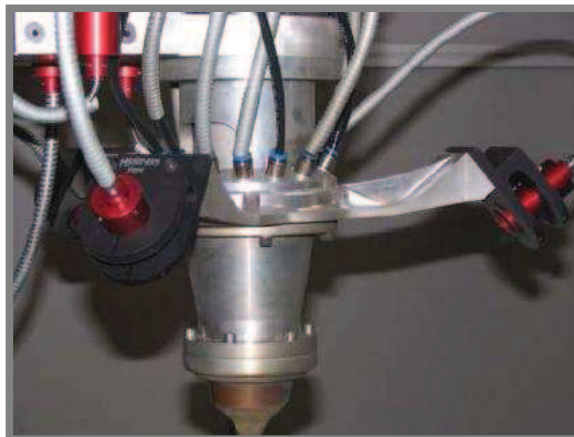


Obr. 32 Pracovní tryska s hlavou v DMD 105D [18]

Firma Pomgroup na trh také přivádí robota pracující s technologií DMD ve dvou provedeních: DMD 44R a DMD 66R. Své využití nachází především při vytváření velkých součástí přímo na potřebném místě, nebo opravě masivních komponentů. Prostor k práci nabízený tímto robotem je 1,95m x 2,14m x (330°-360°). [18]



Obr. 33 Robot DMD [18]



Obr. 34 Pracovní tryska s hlavou u robota DMD [18]

Partnerská firma Trumpf se sídlem v Německu nabízí zařízení pracující s technologií DMD pod názvem DMD 505. [3]

Technické specifikace DMD 505:

Pracovní prostor: 2000x1000x750mm

Rychlost výroby: 20-150cm<sup>3</sup>/h

Tloušťka vrstvy: 0,2-1,2mm

Velikost částic prášku: 40-120 mikrometrů

Typ laseru: CO<sub>2</sub>

Výkon laseru: 2000-6000W [19]



Obr. 35 Zařízení DMD 505 [19]



Obr. 36 Pracovní tryska s hlavou v DMD 505 [19]

## 2.6 Electron Beam Melting (EBM)

2.6

---

Jedná se o technologii vynalezenou švédskou firmou Acram. Firma byla založena v roce 1997 a za hlavní cíl si kladla produkci součástí, které by byly vyrobeny z kovového prášku podle digitálních dat. Vývoj technologie EBM firma začala už před svým založením v roce 1995 ve spolupráci s Chalmers University of Technology ve švédském městě Gotheburg. Firma Arcam postavila a prodala v roce 2002 své první zařízení pracující s technologií EBM. V dnešní době má už okolo 30 těchto zařízení instalovaných v celém světě. Jejich největší uplatnění se nachází v letectví, medicíně a částečně v automobilovém průmyslu. Arcam kromě prodeje svých zařízení poskytuje také kompletní nabídku služeb vztahujících se k EBM zařízením. Jedná se o prodej softwaru, kovového prášku, servis zařízení, konzultace a školení obsluhy. [1, 20]

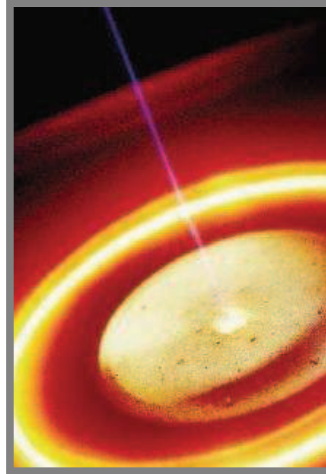
### 2.6.1 Princip EBM

2.6.1

---

Budoucí součást je nejprve navržena v 3D CAD softwaru a dále je virtuálně nakrájena na vrstvy o tloušťce kolem 0,1mm. Na posuvný povrch v zařízení je umístěna vrstva kovového prášku o stejné tloušťce jako předem navržená virtuální vrstva. Na tento povrch je vystřelen elektronový paprsek. Jedná se o proud rychle letících elektronů. Při dopadu na práškovou vrstvu se vysoká kinetická energie letících elektronů přemění na místní tepelnou energii. Ta roztaví prášek, který dále pomocí ochlazování tuhne do pevného stavu a připojuje se k předešlé vrstvě. Po

vytvoření jedné vrstvy je posuvný povrch snížen, opět je nanesena nová vrstva z kovového prášku a celý proces je opakován. Součást je stavěna vrstvu za vrstvou tak dlouho, dokud není celá součást kompletní. Celý proces je řízen automaticky počítačem podle výrobních dat. [1]



Obr. 37 Elektronový paprsek [20]

V zařízeních od firmy Arcam je umožněno vyrábět i více součástí najednou. To šetří čas i peníze. Ve vnitřním prostředí zařízení je vakuum, které podporuje průběh stavěcího procesu tím, že snižuje vnitřní napjatost a snižuje vnitrovazební reakce u reaktivních prvků. Reaktivním prvkem je například titan a jeho slitiny. Díky použití elektronového paprsku je zaručeno rovnoměrné rozložení teploty na povrchu součástí. Vakuové prostředí v kombinaci s elektronovým paprskem tvoří výborné podmínky k výrobě a zaručují exkluzivní mechanické vlastnosti vyrobených komponentů. Finální výrobek může být přímo funkční součást nebo pouze jako prototyp. [20]

---

### 2.6.2 Aplikace v medicíně

Velkou oblibu použití si technologie EBM našla v medicíně a to především díky rychlé a efektivní výrobě kvalitních komponentů z titanu a jeho slitin. Rychlá výroba je zajištěna výrobou více kusů najednou. Technologie EBM nabízí produkci malých dílů v rozumných poměrech ceny, kvality, času a stala se jedním z důležitých nástrojů pro implantátový průmysl. [20]

Při výrobě implantátů je někdy požadována povrchní pórovitost. Díky ní je zajištěno lepší vrůstání kostí a tkání k vloženému implantátu. S EBM není problém vyrobit implantát, který bude mít pevné hladké jádro a pórovitý povrch přesně podle předem navrženého geometrického tvaru. Při použití jiných výrobních technologiích se musí první vyrobit hladké pevné jádro a teprve v druhém produkčním kroku je dále zajištěna výroba pórovitosti a to nejčastěji vrstvením nebo povlakováním při stříkání. U EBM tyto kroky odpadají, součást s pórovitým povrchem je vyrobena najednou. [20]



Obr. 38 Implantát vyrobený EBM s hladkým jádrem a pórovitým povrchem [20]

Protože EBM pracuje na základě digitálních dat, je zde velkou výhodou použití CT pro získání prvotních tvarových informací. Kombinace technologie EBM s CT zajišťuje pacientovi implantát, který perfektně tvarově pasuje na jeho kosti. Kombinace EBM s CT se také používá pro výrobu ortopedických částí, které nahradí chybějící kostní část. Chybějící část kosti může být zapříčiněna například rakovinou nebo opotřebením. [20]



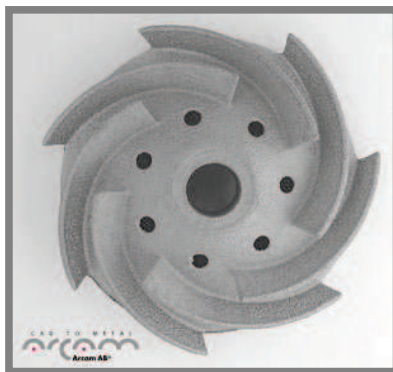
Obr. 39 Kyčelní implantát [20]

### 2.6.3 Aplikace v letectví

Rapid prototyping se začal využívat i v oblasti leteckého průmyslu. Protože je více výrobních technologií nahrazenou pouze jednou, tak jsou šetřeny finance. Je mnohem rychlejší vytvořit prototypy a modifikovat letecké dopravní prostředky. S využitím technologie EBM je nyní možno stavět i plně funkční součásti z materiálu Ti6Al4V. Tato titanová slitina má výhodnou kombinaci důležitých vlastností, které jsou v leteckém průmyslu žádány. Jedná se především o mez pevnosti v tahu, mez pevnosti při únavě, trhlinové charakteristiky, tuhost, vrubová houževnatost a odolnost proti korozi. [20]

2.6.3

---



Obr. 40 Oběžné kolo vyrobené EBM [20]



Obr. 41 Převodová skříň v přístávacím ústrojí vyrobená EBM [20]

Mezi nejznámější letecké společnosti využívající zařízení od firmy Arcam pracující s EBM je Boeing Phantom Works v St. Luis, která má zařízení Arcam EBM S12T konfigurované speciálně pro výrobu součástí z titanu a jeho slitin pro letecké aplikace. Dalším světově známým zákazníkem je NASA (National Aeronautics and Space Administration, Národní úřad pro letectví a kosmonautiku, v Americe). Tato organizace využívá zařízení Arcam EBM S12 v leteckém centru v Hunstvillu pro výrobu komponentů z titanu a jiných technických slitin. [21]

---

#### 2.6.4 Materiály

Technologie EBM zpracovává tyto materiály: titanovou slitinu Arcam Ti6Al4V, Arcam Ti6Al4V ELI, Arcam Grade 2 a Arcam ASTM F75 Cobalt-Chrom. Titanové slitiny jsou rozšířeny ve velkém spektru aplikací a to díky svým unikátním vlastnostem. Mají vysokou pevnost, nízkou hmotnost a výbornou odolnost proti korozi. Používají se hlavně tam, kde je požadována vysoká úroveň bezpečnostních vlastností. Jejich využití se nachází především při operacích v medicíně, v letectví, v automobilovém průmyslu, v chemickém průmyslu, v energetice, ve sportu a v dalších oblastech. Hlavním důvodem výměny jiných materiálu za titanové slitiny je snížit hmotnost, zvýšit odolnost a zlepšit ekonomickou efektivitu. Vlastnosti titanových slitin se dají upravit chemickým složením. Lze tedy určité mechanické vlastnosti zvýšit a naopak některé potlačit. [20]

### Titanová slitina Ti6Al4V

Tato titanová slitina se považuje za nejvíce rozšířenou. Zajišťuje excelentní mechanické vlastnosti při nízké hmotnosti. Toho je využito v letectví, v automobilovém průmyslu a při osobní výbavě vojáků. Její obrovský potenciál se uplatňuje v medicíně, a to především díky její vynikající biokompatibilitě při kontaktu s kostí nebo tkání. Požadovaná velikost základního výrobního prášku je zaručena díky přesívání a pohybuje se v rozmezí 45-100 mikrometrů. Její chemické složení se skládá z Al, V, C, Fe, O, N, H, Ti. [20]

Jak je komponenta vyrobena, je doporučeno její „odpočinutí“. To znamená proces, kdy je součást vystavena teplotě 920°C a tlaku 100MPa po dobu 120min. Tím se dosáhne zlepšení jejich vlastností. [20]



Obr. 42 Automobilová převodová skříň vyrobená EBM z Ti6Al4V [20]

### Mechanické vlastnosti Ti6Al4V při různých technologických zpracování:

*Ti6Al4V po výrobě EBM:*

Re = 950MPa

Rm = 1020Mpa

Prodloužení 14%

Zúžení 16%

Únavová mez pevnosti při 10 000 000 cyklech je 600MPa

Tvrдость podle Rockwella 33HRC[20]

*Ti6Al4V po odlití:*

Re = 758MPa

Rm = 860MPa

Prodloužení 8%

Zúžení 14% [20]

*Ti6Al4V po kování:*

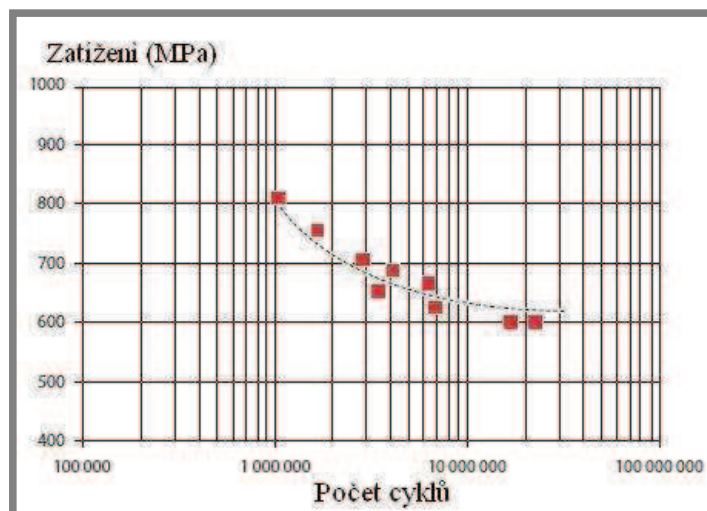
Re = 860MPa

Rm = 930MPa

Prodloužení 10%

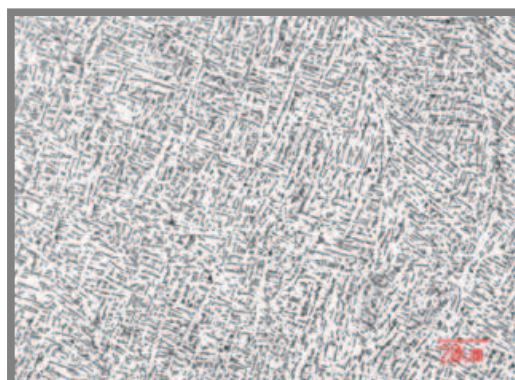
Zúžení 14% [20]

Pokud je součást vyrobena technologií EBM, má lepší vlastnosti než odlitá součást a současně srovnatelné vlastnosti s kovanou součástí.



Obr. 43 Únavová křivka pro Ti6Al4V zpracovanou EBM [20]

Titanová slitina Ti6Al4V má díky rychlému ochlazení roztavené oblasti dobrou mikrostrukturu. Strukturu podporuje také držení stálé teploty v pracovní komoře po celou dobu výrobního procesu. [20]



Obr. 44 Mikrostruktura Ti6Al4V při EBM  
zvětšena 500x [20]

### **Titanová slitina Ti6Al4V ELI**

Tato slitina je velmi podobná Ti6Al4V, liší se v procentuálním chemickém složení. Je opět tvořena prvky Al, V, C, Fe, O, N, H, Ti s tím rozdílem, že je sníženo množství O, N, C, Fe a zvýšené množství Ti. Touto chemickou úpravou se docílilo zlepšení struktury, která je méně intersticiální. To znamená, že méně atomů se nachází mimo mřížku. Taková struktura pak poskytuje zvýšenou tažnost i protilomovou odolnost než Ti6Al4V. [20]

Po vyrobení komponenty je pro zlepšení jejích vlastností opět doporučeno „odpočinutí“, které by mělo probíhat při teplotě 920°C a 100MPa po dobu 120min. [20]



Obr. 45 Mřížový lebeční plát vyrobený EBM z Ti6Al4V ELI [20]

Mechanické vlastnosti Ti6Al4V ELI po výrobě EBM:

Re = 930MPa

Rm = 970MPa

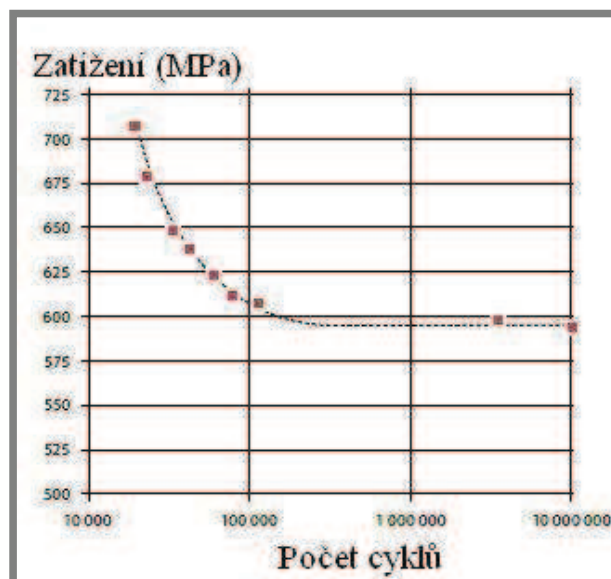
Prodloužení 16%

Zúžení 50%

Únavová mez pevnosti při 10 000 000 cyklech je 600MPa

Tvrдость podle Rockwella 32HRC

Elastický modul 120GPa [20]



Obr. 46 Únavová křivka pro Ti6Al4 ELI vyrobenou EBM [20]

Arcam AST FM75 Cobalt-Chrom

Kobalt-chromové slitiny jsou všeobecně nejvíce používány v medicíně. Vyznačují se zvýšenou tuhostí, odolností proti opotřebení a hladkým povrchem. Díky těmto vlastnostem jsou vhodné pro kolenní implantáty, kyčelní klouby a zubní protézy. Mimo medicínu se používají také do plynových turbín. [20]

Kovový prášek této slitiny pro EBM je vyráběn firmou Arcam. K výrobě prášku je používán atomizovaný plyn, velikost částic se pohybuje v rozmezí 45-100 mikronů. Výskyt drobných částic v tomto rozměru je zajištěn přesíváním. Arcam AST FM75 Cobalt-Chrom obsahuje tyto chemické prvky: Cr, Mo, Ni, Fe, C, Si, Mn, W, P, S, N, Al, Ti, B, Co. [20]

Mechanické vlastnosti Arcam AST FM75 Cobalt-Chrom po výrobě EBM:

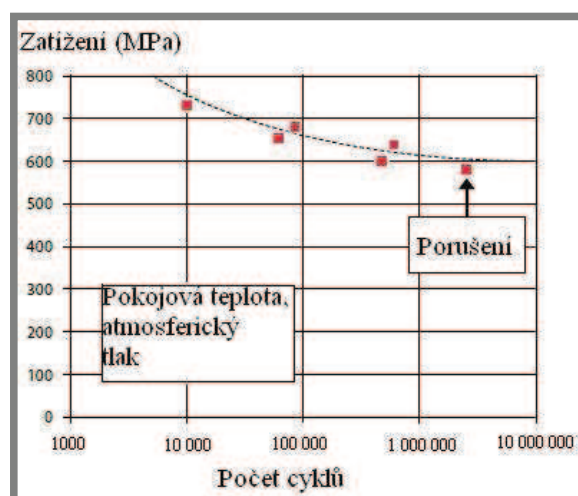
Re = 560MPa

Rm = 960MPa

Prodloužení 20%

Zúžení 20%

Únavová mez pevnosti při 10 000 000 cyklech je 610MPa [20]



Obr. 47 Únavová křivka pro Arcam AST FM75 Cobalt-Chrom [20]

Po vytvoření komponenty technologií EBM z Arcam AST FM75 Cobalt-Chrom se doporučuje její následné tepelné zpracování, tj. její ponechání po dobu 240min při teplotě 1200°C v argonové atmosféře při tlaku 100MPa. Druhým krokem je homogenizační žhání při teplotě 1220°C v argonové atmosféře o tlaku 0,7-0,9mbar po dobu 240min. Dále je možno komponentu zakalit z teploty 1220°C na 760°C maximálně do 8min. Tento postup je prováděn za účelem rozpuštění karbidů a dosažení rovnoměrné struktury. Komponenta po takovém tepelném zpracování je méně křehká. [20]

### 2.6.5 Zařízení od firmy Arcam s EBM

V současnosti jsou na trhu zřízení Arcam EBM S12 a novější model Arcam A2. Firma také poskytuje specifickou úpravu zařízení podle zákaznickových potřeb na požádání. [20]

Technické specifikace Arcam EBM S12

Maximální velikost komponenty: 200x200x180mm

Přesnost: +/- 0,4mm

Výrobní čas: 60cm<sup>3</sup>/h

Tloušťka vrstvy: 0,05-0,2mm  
Skenovací rychlost paprsku: >1000m/s  
Výkon paprsku: 3500W  
Příkon: 3x400V, 32A, 7000W  
Rozměry zařízení: 1850x900x2200mm  
Hmotnost zařízení: 1420kg  
Datový formát: STL [20]



Obr. 48 Zařízení Arcam EBM S12 [20]

#### Technické specifikace Arcam A2

Maximální velikost komponenty: 200x200x350mm  
Přesnost: +/- 0,3mm  
Tloušťka vrstvy: 0,05-0,2mm  
Výkon paprsku: 4000W  
Skenovací rychlost paprsku: >1000m/s  
Příkon: 3x400V, 32A, 7000W  
Rozměry zařízení: 1850x900x2200mm  
Datový formát: STL  
Automatická kalibrace  
Automatické chlazení



Obr. 49 Zařízení Arcam A2 [20]

### 3 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ

Na produkci výrobků jsou kladeny vysoké požadavky zákazníků. Většina firem se je snaží uspokojit z ekonomického i kvalitativního hlediska. Také jsou konkurencí nuceni být více flexibilnější a prosadit se na trhu jako nejlepší výrobci. Hledají nové progresivní metody, které by jim pomohly v ekonomickém růstu.

Díky pokroku techniky je spektrum jejich možností veliké. Většina výrobních firem používá výpočetní techniku a některé z nich začínají využívat moderní soubor technologií rapid prototyping. Tato pokroková technologie jim umožňuje vyrobit prototyp, zkušební vzorek, hotovou součást nebo pouze provést opravu dílu a to mnohem rychleji než při použití konvenčních metod. Prvním krokem je vytvoření 3D digitálních dat. Druhým krokem je samotná výroba. Stále však většina výrobků potřebuje ještě třetí krok a tím je finální úprava povrchu.

Rychlé vyrobení prototypu v sobě skrývá velký potenciál. Prototyp dává reálný obraz budoucího výrobku. Tvůrci mohou diskutovat o jeho případných nedostacích, které v digitální formě nebyly odhaleny. Dále také mohou být na vyrobeném zkušebním modelu zkoušeny mechanické charakteristiky a to přímo v jeho provozu.

Ranné technologie pracující na základu rapid prototyping byly vytvořeny pouze pro plasty. Nyní s moderní technikou je umožněno použít i kovy. Konstrukce novějších zařízení pracující s kovy jsou odlišné od zařízení pracující s plastem.

První technologií rapid prototyping umožňující zpracovávat kov byla metoda selective laser sintering v 90. letech. Nyní se jedná o nejstarší technologii s „nejhoršími“ výrobními parametry v porovnání s nejmodernějšími technologiemi. Výrobní časy jsou delší a drsnost povrchu je horší. Zařízení pracující na principu selective laser sintering mají menší výkony laserů oproti novějším. Po výrobě se používají finální úpravy jako čištění a tryskání.

O pár let později byla technologie SLS modifikována firmou EOS a pojmenována direct metal laser sintering. Firma upravila konstrukci zařízení. Tuto technologii je vhodné použít například v medicíně pro výrobu implantátů, ale také například pro výrobu lopatek do turbín.

Dosud technologie rapid prototyping zpracovávající kov používaly práškovou nádobu, kde byla součást vyráběna. Novější technologie laser engineered net shaping začala pracovat na jiném principu. Materiál je nanášen do daného místa v předem vypočteném množství. Celý proces byl tak zpřesněn, urychlen a vyrobená součást má lepší geometrické i pevnostní parametry. Výstupní součást má jemnější strukturu, než kdyby byla vyrobena například kováním nebo soustružením.

Modifikací předešlé metody pomocí systému snímacích kamer bylo umožněno sledovat průběh výroby a okamžitě korigovat výrobní parametry. Název této technologie je direct metal deposition. Opět byla posunuta hranice kvality vyrobených součástí a přidána nová možnost. Tou je navařování tvrdých slitin na již vyrobené součásti.

Nová technologie rapid prototyping nese název electron beam melting. Kombinuje původní práškové vany s elektronovým paprskem a vakuovým prostředím. Výrobky dosahují nejlepších kvalit. Lze použít vysoce odolné a lehké titanové slitiny. Tato technologie byla okamžitě rozšířena do leteckého průmyslu, medicíny a automobilového průmyslu. Nejčastěji jsou vyráběny implantáty a součásti leteckých strojů.

## 4 VYMEZENÍ TRENDŮ BUDOUCÍHO VÝVOJE

Rapid prototyping v oblasti kovových výrobků se stal používanou technologií po celém světě. Existuje několik celosvětových institucí zabývajících se pokrokovým výzkumem v této oblasti. Proto jsou světu představovány nové metody nebo jejich modifikace mnohem častěji než u konvenčních technologií. Ve strojírenském průmyslu je většina součástí vyrobena z kovů a jejich slitin, proto je během posledních 20 let zaměřován vývoj RP metod na kovy.

V současnosti mezi nejpokrokovější technologie rapid prototyping zpracovávající kovové materiály patří direct metal deposition a elektron beam melting. Jelikož tyto technologie dokážou zpracovávat i titanové materiály, není potřeba vyvíjet metody, které by dokázaly zpracovat pevnější materiál. V nejbližších letech budou probíhat pouze modifikace již prověřených metod. Například přínos by mohla mít kombinace výhod u DMD a EBM. Tedy využít elektronový paprsek, systém snímacích senzorů a vakuové prostředí. Byla by docílena vysoká tvarová přesnost a kvalitní materiálové charakteristiky.

Většina dosud vyrobených součástí z kovu pomocí rapid prototyping byla menších rozměrů. Limitním faktorem je velikost stavěcí komory. Pouze pár zařízení umožňuje vyrobit součásti větších rozměrů než 300x300x300mm. V budoucnu budou tedy konstrukce zařízení upravovány tak, aby se zvětšil stavěcí prostor, byla umožněna výroba větších součástí a zůstala zachována nebo vylepšena přesnost výroby.

Cena RP zařízení zpracovávající kovový materiál se v průměru pohybuje mezi 5 000 000 - 15 000 000Kč. Záleží na přesné modifikaci zařízení a jeho příslušenství. Predikuje se, že postupem doby se jejich cena bude snižovat.

## 5 SOUHRNNÁ BIBLIOGRAFIE

- [1] CHUA, C.K, LEONG, K.F, LIMC, S. *Rapid Prototyping : Principles and applications*. [s.l.] : World Scientific, 2005. 420 s. 2. ISBN 981-238-120-1.
- [2] GEBHARDT, A. *Rapid Prototyping*. 1st edition. [s.l.] : Hanser Gardner Publications, 2003. 379 s. ISBN ISBN 3-446-21259-0.
- [3] DRÁPELA, M. *Modul Rapid Prototyping*. Centrum vzdělávání a poradenství Vysokého učení technického v Brně, 44 s.
- [4] CHEN, Y.K, NG, C.T, WANG, Y.Z. Generation of an STL File from 3D Measurement Data with User-Controlled Data Reduction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 1999, no. 2 [cit. 2009-02-24], s. 127-131. Dostupný z WWW: <http://www.springerlink.com/content/w63y07apt405x6aq/?p=4c42f8fa6f564f0bb638ce2e490a2270&pi=4>. ISSN 0268-3768.
- [5] NIU, H.J., CHANG, T.H. Selective laser sintering of gas atomized M2 high speed steel powder. *Journal of Materials Science* [online]. 2004, no. 1 [cit. 2009-02-25], s. 31-38. Dostupný z WWW: <http://www.springerlink.com/content/t3126j23r4086p6p/?p=e832920439f04a5984b70d3520709112&pi=2>. ISSN 0022-2461.
- [6] SINGHA, S.S, ROYB, D, MITRAA, R. Studies on laser sintering of mechanically alloyed Al50Ti40Si10 composite. *Materials Science and Engineering* [online]. 2009, no. 1-2 [cit. 2009-02-25], s. 242-247. Dostupný z WWW: [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleListURL&\\_method=list&\\_ArticleListID=905922164&\\_sort=d&view=c&\\_acct=C000032308&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=640830&md5=0d30eeeba2ae565747e2cef27a4e9c98](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=905922164&_sort=d&view=c&_acct=C000032308&_version=1&_urlVersion=0&_userid=640830&md5=0d30eeeba2ae565747e2cef27a4e9c98).
- [7] Mizino [online]. [cit. 2009-2-26], Dostupný z WWW: [http://www.mizuho-go.co.jp/equipment/image/machine\\_photo\\_Sin.htm](http://www.mizuho-go.co.jp/equipment/image/machine_photo_Sin.htm)
- [8] Integra - firemní stránky [online]. 2009 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <http://www.integra-support.com/>.
- [9] Innomia - firemní stránky [online]. 2007 [cit. 2009-03-20]. Dostupný z WWW: <http://www.innomia.cz./dmlscz.htm>.
- [10] Jak vyrobit plně funkční kovové díly přímo z 3D CAD dat. *Technický týdeník* [online]. 2008, č. 2 [cit. 2009-03-20]. Dostupný z WWW: <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=3698&mark=>>.
- [11] *Electro Optical Systems - firemní stránky* [online]. [cit. 2009-03-25]. Dostupný z WWW: <http://www.eos.info/en/products.html>.
- [12] *Direct Metal Laser Sintering* [online]. 2007 [cit. 2009-03-25]. Dostupný z WWW: <http://www.dmls.cz/>.
- [13] *3T RPD Ltd. - firemní stránky* [online]. [cit. 2009-03-26]. Dostupný z WWW: <http://www.3trpd.co.uk/dmls/formula-1-aerospace.htm>.
- [14] *The Minerals, Metals and Materials society* [online]. 2009 [cit. 2009-03-18]. Dostupný z WWW: <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9907/Hofmeister/Hofmeister-9907.fig.1.lg.gif>.

- [15] *Norman - Center for Research-based Innovation* [online]. 2008 [cit. 2009-03-18]. Dostupný z WWW: <[http://www.sfinorman.com/files/CREAM/01042008\\_Seminar\\_AMT/martin\\_hedges\\_lens\\_technology.pdf](http://www.sfinorman.com/files/CREAM/01042008_Seminar_AMT/martin_hedges_lens_technology.pdf)>.
- [16] *Optomec - firemní stránky* [online]. 2006 [cit. 2009-03-18]. Dostupný z WWW: <[http://www.optomec.com/site/lens\\_home](http://www.optomec.com/site/lens_home)>.
- [17] *Innovative Technology - firemní stránky* [online]. [cit. 2009-03-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.gloveboxes.com/>>.
- [18] *Pomgroup - firemní stránky* [online]. 2008 [cit. 2009-03-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.pomgroup.com/>>.
- [19] *Trumpf - firemní stránky* [online]. 2009 [cit. 2009-03-18]. Dostupný z WWW: <[http://www.trumpf.com/3.direct-metal-deposition\\_DMD-505\\_v1.html](http://www.trumpf.com/3.direct-metal-deposition_DMD-505_v1.html)>.
- [20] *Arcam - firemní stránky* [online]. [cit. 2009-04-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.arcam.com/index.asp>>.
- [21] *Society of Manufacturing Engineers - Resource Center* [online]. 2009 [cit. 2009-03-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.sme.org/cgi-bin/getsmepg.pl?new-sme.html&&SME&>>.
- [22] FARKAŠOVÁ, B., KRČÁL, M. *Bibliografické citace : generátor citací* [online]. 2004 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.citace.com/moduly.php>>.
- [23] BOLDIŠ, B. *Bibliografické citace dokumentů podle ISO 690 a ISO 690-2* [online]. 2001 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.boldis.cz/>>.

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

---

BIN		datový formát
CAD	- Computer Aided Design	konstruování podporované počítačem
CLI		datový formát
CT	- Computed Tomography	počítačová tomografie
DMD	- Direct Metal Deposition	přímé nanášení kovu
DMLS	- Direct Metal Laser Sintering	přímé kovové spékání
EBM	- Electron Beam Melting	tavení elektronovým paprskem
EOS	- Electro Optical Systems	název firmy
HPGL		datový formát
LENS	- Laser Engineered Net Shaping	laserem zkonstruovaný tvar
NASA	- National Aeronautics and Space Administration	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
Nd: YAG	- Yttrium Aluminium Granátu	krystal ( $Y_3Al_5O_{12}$ )
RP	- Rapid Prototyping	rychlé zhotovení prototypu
SLC		datový formát
SLS	- Selective Laser Sintering	laserové spékání
SNL	- Sandia National Laboratory	Národní laboratoř v Sandii
STL		datový formát

**7 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ****7**

<b>Obr. 1</b> Duplikace bodů [1]	14
<b>Obr. 2</b> Geometrický popis trojúhelníku [1]	14
<b>Obr. 3</b> Redukce dat 50% [4]	14
<b>Obr. 4</b> Princip SLS [4]	15
<b>Obr. 5</b> Průběh vláken [2]	16
<b>Obr. 6</b> Princip výroby vrstev [2]	16
<b>Obr. 7</b> Použití rozdílných výkonů laseru [6]	17
<b>Obr. 8</b> Struktura amorfní a krystalické látky [5]	18
<b>Obr. 9</b> Rozdíl ve spečené a natavené struktuře [5]	20
<b>Obr. 10</b> Sinterstaion 2000 [2]	20
<b>Obr. 11</b> Sinterstation 2500 plus [6]	21
<b>Obr. 12</b> Vanguard [8]	21
<b>Obr. 13</b> Schéma pracovní komory [2]	22
<b>Obr. 14</b> Vznik dílu DMLS [9]	23
<b>Obr. 15</b> EOSINT M270 [9]	24
<b>Obr. 16</b> EOSINT P800 [11]	24
<b>Obr. 17</b> EOSINT S750 [11]	24
<b>Obr. 18</b> Konstrukce pracovní komory [12]	25
<b>Obr. 19</b> Turbínová lopatka vyrobená DMLS [13]	26
<b>Obr. 20</b> Kloubní implantát vyrobený DMLS [13]	27
<b>Obr. 21</b> Prototyp ozubeného kola vyrobeny DMLS [12]	27
<b>Obr. 22</b> Ukázka technologie LENS v praxi [14]	28
<b>Obr. 23</b> Schéma technologie LENS [3]	28
<b>Obr. 24</b> Struktura materiálů při použití různých technologií výroby [15]	29
<b>Obr. 25</b> Zařízení LENS 750 [17]	29
<b>Obr. 26</b> Zařízení LENS 850-R [17]	30
<b>Obr. 27</b> Deeprepair Head [16]	30
<b>Obr. 28</b> Ukázka navaření nástrojové oceli na měděnou slitinu [19]	31
<b>Obr. 29</b> Ukázka DMD v praxi [19]	31
<b>Obr. 30</b> Schéma technologie DMD [18]	32
<b>Obr. 31</b> Zařízení DMD 105D [18]	33
<b>Obr. 32</b> Pracovní tryska s hlavou v DMD 105D [18]	33
<b>Obr. 33</b> Robot DMD [18]	34
<b>Obr. 34</b> Pracovní tryska s hlavou u robota DMD [18]	34
<b>Obr. 35</b> Zařízení DMD 505 [19]	35
<b>Obr. 36</b> Pracovní tryska s hlavou v DMD 505 [19]	35
<b>Obr. 37</b> Elektronový paprsek [20]	36
<b>Obr. 38</b> Implantát vyrobený EBM s hladkým jádrem a pórovitým povrchem [20]	37
<b>Obr. 39</b> Kyčelní implantát [20]	37
<b>Obr. 40</b> Oběžné kolo vyrobené EBM [20]	38
<b>Obr. 41</b> Převodová skříň v přístávacím ústrojí vyrobená EBM [20]	38
<b>Obr. 42</b> Automobilová převodová skříň vyrobená EBM z Ti6Al4V [20]	39
<b>Obr. 43</b> Únavová křivka pro Ti6Al4V zpracovanou EBM [20]	40
<b>Obr. 44</b> Mikrostruktura Ti6Al4V při EBM zvětšena 500x [20]	40
<b>Obr. 45</b> Mřížový lebeční plát vyrobený EBM z Ti6Al4V ELI [20]	41
<b>Obr. 46</b> Únavová křivka pro Ti6Al4 ELI vyrobenou EBM [20]	41

<b>Obr. 47</b> Únavová křivka pro Arcam AST FM75 Cobalt-Chrom [20]	42
<b>Obr. 48</b> Zařízení Arcam EBM S12 [20]	43
<b>Obr. 49</b> Zařízení Arcam A2 [20]	43