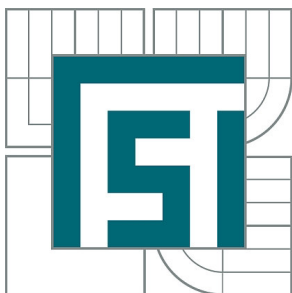


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

PŘEHLED MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH PRO VÝROBU TECHNOLOGIÍ SELECTIVE LASER MELTING

REVIEW OF MATERIALS USED FOR THE MANUFACTURING BY THE SELECTIVE LASER
MELTING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR SKALICKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ KOUKAL

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Skalický

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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 materiálů používaných pro výrobu technologií Selective Laser Melting

v anglickém jazyce:

Review of materials used for the manufacturing by the Selective Laser Melting technology

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je zpracování přehledu materiálů používaných při výrobě technologií SLM. Práce musí obsahovat přehled materiálů, jejich vlastnosti (přednosti i nedostatky vzhledem k procesu výroby) a také konkrétní aplikace výrobků z těchto materiálů.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Analýza problému a cíl práce
3. Přehled současného stavu poznání
4. Diskuze
5. Závěr
6. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva

Typ práce: rešeršní; Účel práce: výzkum a vývoj

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2015.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam odborné literatury:

YADROITSEV, Igor. Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Saarbrücken: LAP Lambert, c2009, iv, 266 s. ISBN 978-3-8383-1794-6.

YADROITSEV, I., P. KRAKHMALOV a I. YADROITSAVA. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy for biomedical applications: Temperature monitoring and microstructural evolution. Journal of Alloys and Compounds. 2014, vol. 583, s. 404-409. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.08.183.

PRASHANTH, K.G., S. SCUDINO, H.J. KLAUSS, K.B. SURREDDI, L. LÖBER, Z. WANG, A.K. CHAUBEY, U. KÜHN a J. ECKERT. Microstructure and mechanical properties of Al-12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment. Materials Science and Engineering: A. 2014, vol. 590, s. 153-160. DOI: 10.1016/j.msea.2013.10.023.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Koukal

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 21. 11. 2014



v.z. Hartl

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

v.z. Katolický

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce má za cíl podat přehled kovových materiálů (prášků) využívaných při výrobě součástí a modelů za pomoci výrobní metody Selective Laser Melting (SLM). Obsahuje základní informace o technologii výroby Rapid Prototyping (RP) a podrobnější popis základních metod RP, hlavně SLM metody. Následuje popis jednotlivých metod výroby prášků a jejich vlastností. Poslední kapitola obsahuje základní přehled práškových materiálů, jak prášků jednosložkových (jeden kovový materiál), tak prášků vyrobených z kovových slitin. Tento přehled se zaměřuje na nejdůležitější a nejpoužívanější materiály pro výrobu součástí metodou SLM.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rapid Prototyping, Selective Laser Melting, spékání, kovový prášek

ANOTATION

This bachelor thesis aims to provide an overview of metallic materials (powders), which are used in the manufacture of parts and models with SLM (Selective Laser Melting) technology. It contains basic information about Rapid Prototyping (RP) technology and more detailed description of basic methods of RP, especially SLM. Next is a description of manufacture powders methods and its properties. The last section contains an overview of powdery materials as powders made of pure metal (one kind of metal material) and powders produced from metal alloys. This review focuses on the most important and most widely used materials for the manufacture of parts using SLM.

KEYWORDS

Rapid Prototyping, Selective Laser Melting, melting, metal powder

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SKALICKÝ, P. *Přehled materiálů používaných pro výrobu technologií Selective Laser Melting*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Koukal.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi byli nápomocni, jak při vypracování této bakalářské práce, tak i v průběhu mého dosavadního studia. Zvláště bych chtěl poděkovat mému vedoucímu Ing. Ondřeji Koukalovi za cenné rady a odborné vedení mé bakalářské práce. Také bych rád poděkoval rodině za jejich trpělivost a podporu ve dnech strávených psaním této bakalářské práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci, *Přehled materiálů používaných pro výrobu technologií Selective Laser Melting*, vypracoval samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Koukala a za pomoci uvedené literatury.

V Brně dne 21. května 2015

.....
Petr Skalický

OBSAH

ÚVOD	12
1 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	13
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1 Rapid Prototyping	14
2.1.1 HISTORIE A POSTUPNÝ VÝVOJ	14
2.1.2 POSTUP VÝROBY MODELU	15
2.2 Metody Rapid Prototyping	18
2.2.1 Příklady metod RP pro nekovové materiály	18
2.2.2 Metody RP pro kovové materiály	21
2.3 Výroba práškových materiálů pro SLM technologii	25
2.3.1 Mechanické způsoby výroby	25
2.3.2 Fyzikálně-mechanické	27
2.3.3 Chemické	30
2.3.4 Fyzikálně-chemické (Elektro-chemické)	31
2.4 Vlastnosti a charakterizace kovového prášku	32
2.4.1 Základní vlastnosti	32
2.4.2 Technologické vlastnosti	35
2.5 Kovové práškové materiály pro SLM	35
2.5.1 Práškové kovové materiály – jednosložkové	36
2.5.2 Práškové kovové materiály - směsi prášků	38
3 DISKUZE	43
4 ZÁVĚR	44
5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
6 SEZNAM OBRÁZKŮ	54
7 SEZNAM TABULEK	55

ÚVOD

Průmysl v současnosti klade důraz na kvalitu výrobků stále vyšší nároky. Zároveň se snaží minimalizovat výrobní náklady. Konvenční výrobní technologie určují výslednou geometrii výrobku buď odebráním materiálu (obrábění), nebo přetvořením polotovaru (tváření). Principem aditivních výrobních technologií je postupné přidávání (vrstvení) materiálu. Při výrobě je tak docíleno minimálního odpadu. Další výhodou je schopnost výroby komplexních tvarů, odlehčených struktur, dutin a složitě tvarovaných vnitřních otvorů. Těchto prvků není obvykle možné dosáhnout pomocí konvenčních výrobních technologií. Zmíněné prvky snižují množství spotřebovaného materiálu a tak i výslednou hmotnost součásti. Jedním z hlavních předmětů výzkumu je aplikace aditivních technologií v kosmickém průmyslu, letectví, automobilním průmyslu a v neposlední řadě také medicíně. Jednou z progresivních aditivních metod výroby je Selective Laser Melting (SLM). Výchozím materiálem pro výrobu je v tomto případě jemný kovový prášek, který je spékán výkonným laserem. Vlastnosti prášku a jeho chování při procesu SLM má zásadní vliv na výslednou kvalitu výrobku.

1 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

1

V 80. letech dvacátého století, díky rozvoji počítačové techniky, byla vyvinuta nová metoda výroby modelů a prototypů tzv. Rapid Prototyping (RP). Hlavním důvodem bylo urychlení výrobního procesu a možnost lepší vizualizace. Pojmem Rapid prototyping je myšlen souhrn všech metod aditivní výroby modelů „3D-tiskem“ (postupné vrstvení materiálu). Mezi takové metody patří například: Stereolitografie, Electron Beam Melting, Selective Laser Sintering. Všeobecně lze tyto metody rozdělit dle použitého materiálu na metody RP pro nekovové a kovové materiály. V současnosti je vývoj RP zaměřen převážně na kovové materiály. Výrobky zhotovené těmito metodami mohou být použity jako modely, nebo jako plnohodnotné funkční součásti. Zhotovené díly mají geometricky složité tvary a konstrukci s členitými vnitřními otvory a dutinami. Těmito prvky se ušetří materiál a docílí se vysokého poměru pevnosti a hmotnosti.

Pozornost v oblasti RP se poslední dobou upírá na metody spékání kovového prášku laserem. Jednou z významných technologií je Selective Laser Melting (SLM). Prášek je po vrstvách taven a spojován s předchozími vrstvami, dokud není vytvořena celá jednolitá součást. Jednotlivé druhy prášků se od sebe liší chemickým složením a svou strukturou, která je ovlivněna technologií výroby prášku (mletí, rozprašování, chemická redukce, atd.). Výhodou je možnost vyrábět z velice tvrdých materiálů (např. wolfram, titan), které jsou konvenčními metodami obtížně zpracovatelné. Součásti zhotovené metodou SLM vykazují velmi dobré mechanické vlastnosti a jsou využívány hlavně v kosmonautice, letectví a lékařství.

Cílem práce je sestavení přehledu práškových materiálů používaných při výrobě součástí pomocí technologie Selective Laser Melting. Práce bude dále obsahovat hlavní informace o rapid prototypingu, základních metodách a principech výroby, rozdělení práškových materiálů a jejich vlastností.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1

2.1 Rapid Prototyping

- Doslovný překlad metody Rapid Prototyping: „rychlý vývoj prototypu, tedy rychlá výroba modelu součásti nebo celého sestavení.“

Prototyping, neboli výroba modelu, je jeden z důležitých kroků při výrobním procesu. Umožňuje výrobu prototypu součásti z počítačového modelu. Napomáhá tak rychlejšímu zavedení do hromadné výroby. Výrobní technologii RP lze využít i při kusové výrobě. Výrobek (model) je zhotoven za relativně velmi krátkou dobu a napomáhá lepší vizualizaci dané součásti. Následně se mohou odstranit nedostatky, které nebyly na výkrese patrné. [1]

Rapid prototyping (RP) je zásadně využíván k rychlému vytvoření prototypu. Tento prototyp může sloužit jako funkční díl, nebo jako model pro vizualizaci. Největším kladem RP technologie je výrazné zrychlení celého procesu vývoje výrobku ve srovnání s konvenčními technologiemi výroby modelů. Některé vyrobené modely se mohou podrobit určitým typům zkoušek (aerodynamika součásti, ergonomie, některé modely i zkoušky mechanických vlastností, atd.).

RP je soubor výrobních metod, které slouží k výrobě jak kovových, tak plastových prototypů a řadí se k aditivním technologiím výroby prototypů (aditivní technologie pracují na principu postupného skládání vrstev daného materiálu a tím vytváří finální tvar modelu podle počítačové předlohy). Tyto metody se odlišují různými fyzikálními principy tvorby jednotlivých vrstev. Při užití většiny metod RP je materiál ve formě prášku postupně nanášen po jednotlivých vrstvách o dané konstantní tloušťce na již dříve vytvořené vrstvy. Prototypy je možné vyrábět z papíru, plastu, spékáním pískových nebo keramických prášků a rovněž spékáním kovových prášků. [2], [3]

2.1.1

2.1.1 HISTORIE A POSTUPNÝ VÝVOJ

Ručně vyráběné modely byly zhotovovány řemeslníky po staletí. Toto se postupně začíná měnit kolem 70. let dvacátého století. Tehdy se začínají objevovat 3D modely ve virtuálním prostředí, tedy v počítačovém kreslicím programu. Tyto kreslicí programy byly schopny vymodelovaným součastem přiřadit daný materiál a tím částečně simulovat jejich vlastnosti. Posledním trendem prototypingu je tzv. Rapid Prototyping. RP se začal rozvíjet v 80. letech dvacátého století současně s rozmachem Computer Aided Design (počítačem podporované navrhování) a Computer Aided Manufacturing (počítačem podporovaná výroba) technologií (CAD/CAM). Tyto programy jsou podkladem pro výrobu na CNC (Computer Numeric Control - číslicové řízení počítačem) strojích. Historie RP technologie je znázorněna v Tab. 1. [1; 2]

Tab. 1 Historie technologie Rapid Prototyping [1]

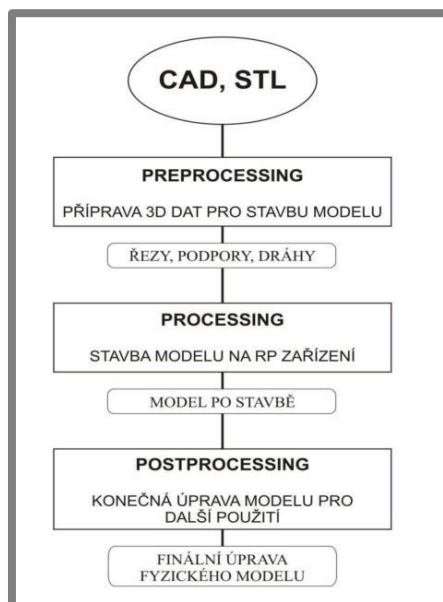
Rok zavedení	Technologie
1770	Mechanizace
1946	První počítač
1952	První číslicově řízený stroj (NC)
1960	První komerčně dostupný laser
1961	První komerčně dostupný robot
1963	První interaktivní grafický systém (prvotní verze programu CAM)
1988	První komerčně dostupný systém RP

V současnosti se metoda RP dostala na vysokou úroveň. Vyráběné modely mají velké uplatnění například ve slévárenství, nebo se přímo zhotovují komponenty pro kusovou výrobu například pro kosmonautiku (součásti raket, družic, atd.) a letecký průmysl.

2.1.2 POSTUP VÝROBY MODELU

2.1.2

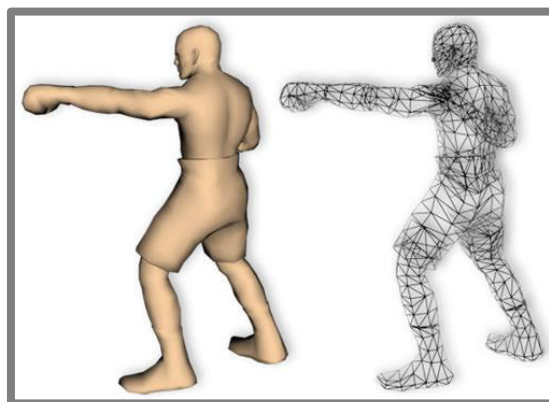
Výrobu modelu lze shrnout do tří základních kroků: Preprocessing, Processing a Postprocessing (viz Obr. 1). Do češtiny se jednotlivé operace zjednodušeně překládají jako příprava (preprocessing), zpracování (processing), dokončení nebo zhodnocení (postprocessing).



Obr. 1 Schéma postupu výroby modelu [1]

1) Preprocessing

Preprocessing zahrnuje operace, které připravují a zpracovávají data pro výrobní systémy RP. Pod tímto krokem přípravy si můžeme představit například transformace 3D dat z počítačových kreslicích systémů CAD (SolidWorks, Pro/ENGINEER, Inventor, atd.) do daného formátu kompatibilního s výrobním systémem RP. Pro RP je používán především formát STL (STereoLithography), který je standardním formátem (viz Obr. 2). Při převedení modelu do STL je jeho původní geometrie převedena na síť trojúhelníkových plošek a jsou zavedeny souřadnice XYZ potřebné pro výrobní zařízení. Čím více těchto trojúhelníkových plošek na nahrazené geometrii vznikne, tím přesnější a jemnější bude výsledný model. [3; 4]



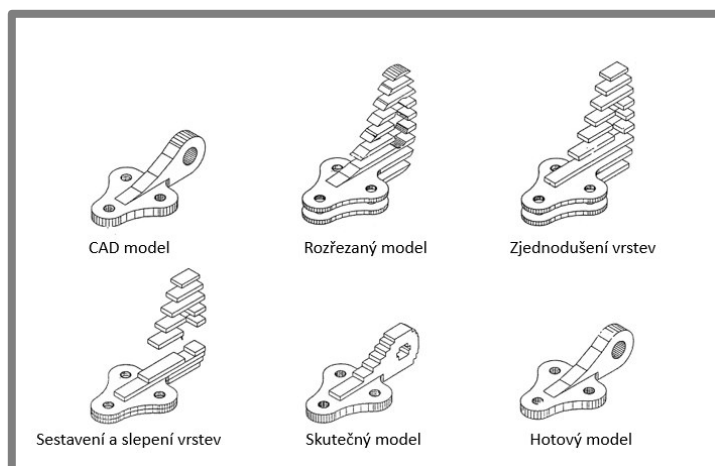
Obr. 2 Převod 3D modelu z CAD do STL [5]

Některé modely nemají tzv. samonosné vrstvy. Samonosná vrstva je taková, která je celá vyrobena na předchozí vrstvě. To znamená, že předcházející vrstva musí mít větší nebo stejně velkou plochu. Nesamosné vrstvy se nedají samostatně vyrobit, při výrobě dojde ke zhroucení nebo deformaci této vrstvy. Z tohoto důvodu se model doplňuje o podpurné konstrukce (viz Obr. 3). Použití těchto konstrukcí závisí na použité výrobní metodě. [3; 4]



Obr. 3 Ukázka podpurné konstrukce [6]

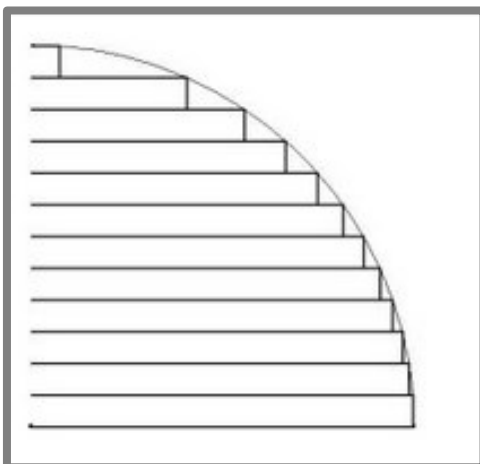
Ve výrobním systému RP je daný 3D model i s podpurnými konstrukcemi „rozřezán“ na jednotlivé vrstvy (viz Obr. 4). Tloušťku a množství jednotlivých vrstev ovlivňuje mnoho hledisek: typ výrobní metody, přesnost a složitost modelu, orientace modelu při výrobě, atd. Nejčastěji se používají vrstvy o tloušťce (0,05 - 0,2) mm. Volbou ideálních parametrů je snaha o potlačení schodečkovité struktury (viz Obr. 5) na povrchu součásti (patrné přechody mezi jednotlivými úrovněmi) a užití co nejmenšího počtu podpurných konstrukcí. [3; 4]



Obr. 4 Princip vytvoření vrstev [6]

2) Processing

Po dokončení úprav jsou data přenesena do výrobního zařízení a nastává processing, neboli vlastní výroba součástky. Model se vytváří postupně po vrstvách, které jsou definované z předchozího preprocessingu. Přesný způsob výroby se liší podle konkrétní technologie RP. [3; 4]



Obr. 5 Schodečkový efekt [2]



Obr. 6 Detail zhotoveného modelu [7]

3) Postprocessing

Pokud je součást již hotová, nastává poslední krok výroby modelu – post-processing. Ve většině případů součást nevyjmeme ihned po dokončení výroby, ale musíme ji ponechat po určitou dobu ve stroji. Po vyjmutí součástky z pracovního prostoru stroje se odstraní podpurné konstrukce. Podle potřeby míry kvality povrchu se musí potlačit schodečkový efekt, který je téměř vždy na součásti patrný (viz Obr. 6). Tento efekt se odstraní broušením. U kovových materiálů se dají použít i některé konvenční dokončovací metody. [3; 4]

2.2 Metody Rapid Prototyping

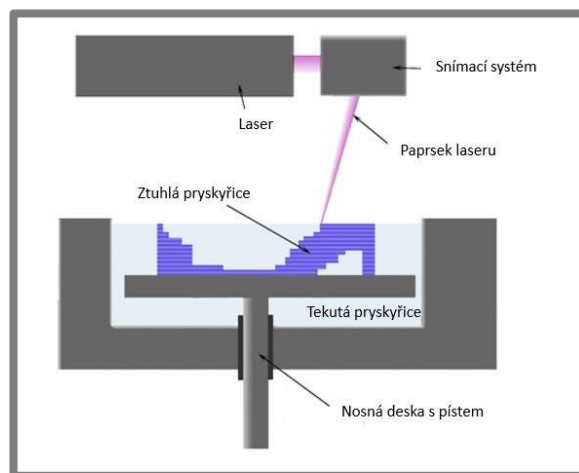
Od konce 20. století bylo vyvinuto mnoho výrobních technologií založených na aditivním principu výroby. V současnosti existuje přes 30 principů aditivní výroby pro stovky materiálů kovových i nekovových. Jednotlivé principy se odlišují metodou vytváření jednotlivých vrstev a použitým materiálem. Rozdělení metod je provedeno z hlediska použitého materiálu a to na nekovové materiály a kovové materiály. Z důvodu velkého počtu jednotlivých technologií jsou vybrány pouze nejzákladnější z nich. [8]

2.2.1 Příklady metod RP pro nekovové materiály

- SLA – Stereolithography
- LOM – Laminated Object Manufacturing
- FDM – Fused Deposition Modelling
- 3DP – 3D Printing
- SLS – Selective Laser Sintering
- Multi-Jet Modeling
- Poly-Jet 3D printing

1) SLA - Stereolithography (Stereolitografie)

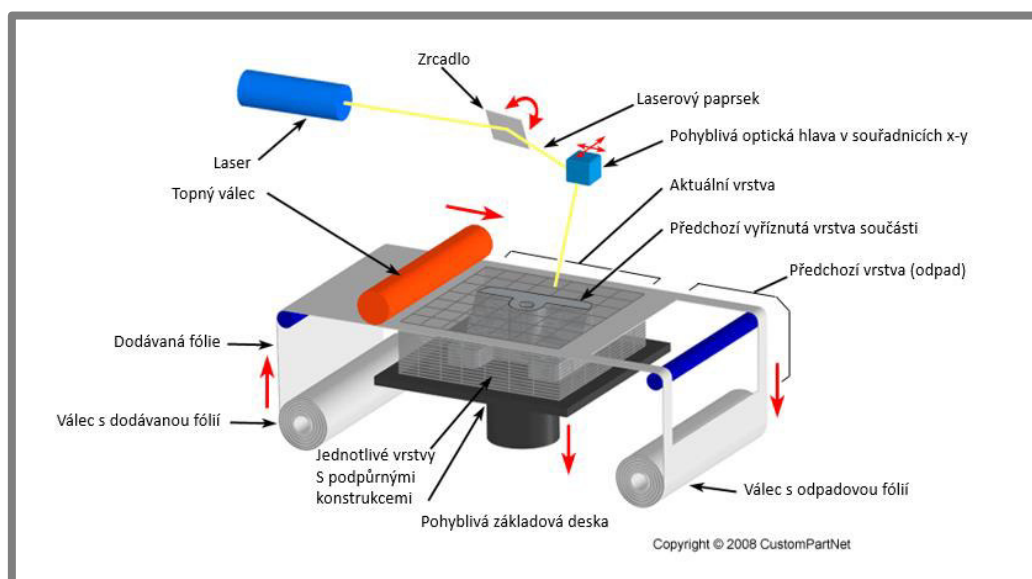
Jedná se o nejstarší a jednu z nejpoužívanějších metod Rapid prototypingu. Stereolitografie je založena na principu vytvrzování tekuté fotopolymerické pryskyřice počítačem řízeným UV laserem (ultrafialové záření). Pro technologii SLA je možno využít velké množství použitelných materiálů. Lze vyrábět modely s malými otvory (cca 1mm) a miniaturní prvky s tloušťkou vrstev pohybují mezi (0,05-0,15) mm. Technologie se vyznačuje vysokou přesností výrobků. Součást bývá vytvářena na nosné desce (viz Obr. 7). Výhodou je možnost výroby rozměrných ale i velmi malých modelů, využití průhledných materiálů a pevnost a odolnost zhotovených modelů. Nevýhoda této technologie je pomalé tvrzení polymeru a malá tepelná odolnost. Další nevýhodou je vyšší cena zařízení a používaných materiálů. [1; 8; 9; 10]



Obr. 7 Princip Stereolitografie [11]

2) LOM - Laminated Object Manufacturing

Velmi rychlá a jednoduchá metoda využívající princip laminování, při níž se postupně vrství plastová nebo papírová fólie napuštěná zpevňující hmotou a následně je ořezána CO₂ laserem do potřebného tvaru. Při výrobě se natáhne na předem nanesenou vrstvu buď papírová, nebo plastová fólie, která je následně přitlačena soustavou topných válců. Vyhřívání válců způsobí přilepení fólie. Po přilepení se může vrstva oříznout laserem na požadovaný obrys dané vrstvy. Zbylá fólie po ořezání obrysu je nařezána laserem na menší kusy a později odstraněna, nebo se přesouvá na válec s odpadovou fólií (viz Obr. 8). Součást je vyráběna na pohyblivé základové desce, která po vytvoření každé vrstvy poklesne o její výšku. Tento cyklus se opakuje až do doby, než je součást hotova. Při požadování hladkého povrchu se musí součástky po výrobě ručně opracovat. Vlastnosti zhotovené součásti jsou podobné součásti vyrobené ze dřeva. Výhodou je použití levných materiálů (např. papír) a výroba rozměrných modelů. Použitím silnějších vrstev se proces výroby součásti značně urychlí. Naopak nevýhodou je vznik velkého množství odpadu a omezené využití součásti. Důvodem je schopnost vyrobeného modelu absorbovat vlhkost z okolí, proto bývají dále opracovány. [8; 12; 13]

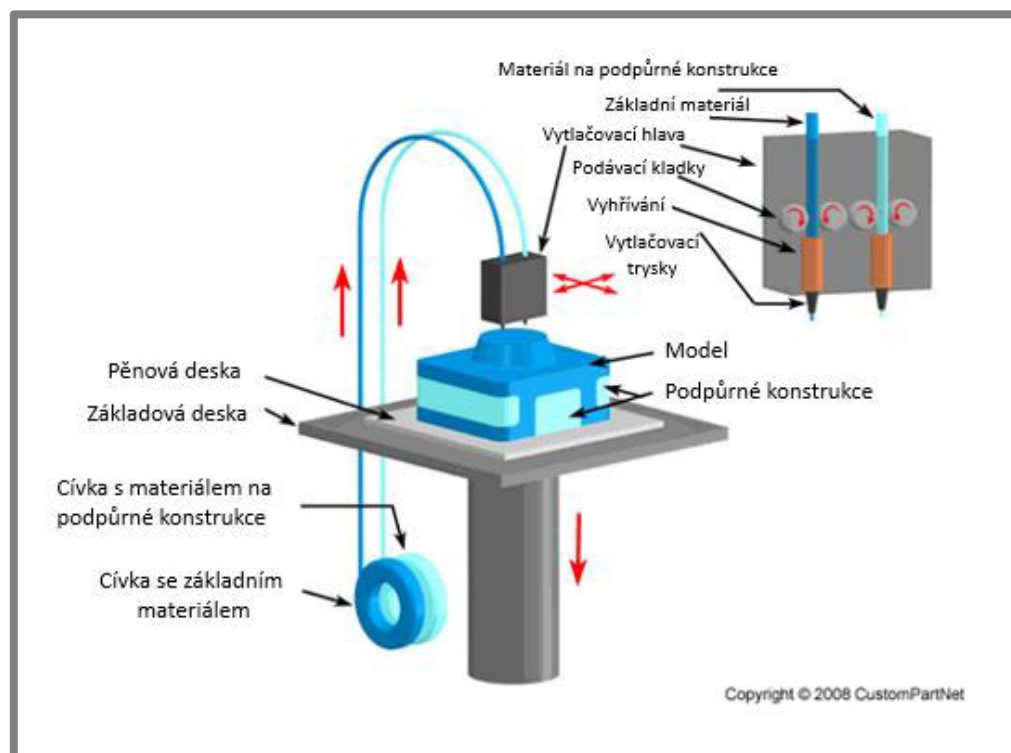


Obr. 8 Princip Laminated Object Manufacturing [13]

3) FDM- Fused Deposition Modeling

Metoda FDM je v současnosti jedna z nejpoužívanějších metod. Tento princip využívají i tzv. hobby 3D tiskárny. Model je opět tvořen po jednotlivých vrstvách. Materiál ve formě tenkého vlákna je do místa tvorby vrstvy dodáván přes vyhřívanou trysku. V trysce se materiál přehřeje na teplotu o 1 °C vyšší než teplota tavení daného materiálu a při kontaktu s povrchem vyráběného modelu se jednotlivá vlákna spojují, ihned tuhnou a vytváří velmi tenkou vrstvu. Tato vlákna bývají z různých netoxických termoplastů (polyamid, polykarbonát, polyethylen, atd.), vosků, atd. Vyhřívání trysky bývají obvykle párové, druhá tryska je využívána pro materiál na podpůrné konstrukce (viz Obr. 9). Pro tyto konstrukce se používá materiál, který je rozpustný ve speciálním roztoku, takže se nemusí odstraňovat mechanicky (např.

polystyren). Stejně jako u metody LOM je model vytvářen na základovou desku, která po vytvoření každé vrstvy klesne o její výšku. Princip technologie FDM je využíván ve většině tzv. plastových 3D tiskáren. Jednou z hlavních výhod je použití netoxických materiálů a není využíváno citlivé zařízení pro laserové snímání, proto se mohou zařízení využívající tuto metodu používat v běžném kancelářském prostředí. Dalšími výhodami jsou malá hlučnost a minimální odpad. Nevýhodou jsou anizotropní mechanické vlastnosti výrobků (odlišné vlastnosti v různých směrech). Kvalita modelů vyráběných metodou FDM nedosahuje takové přesnosti a kvality jako u metody SLA. [1; 7; 8; 14]



Obr. 9 Princip Fused Deposition Modeling[14]

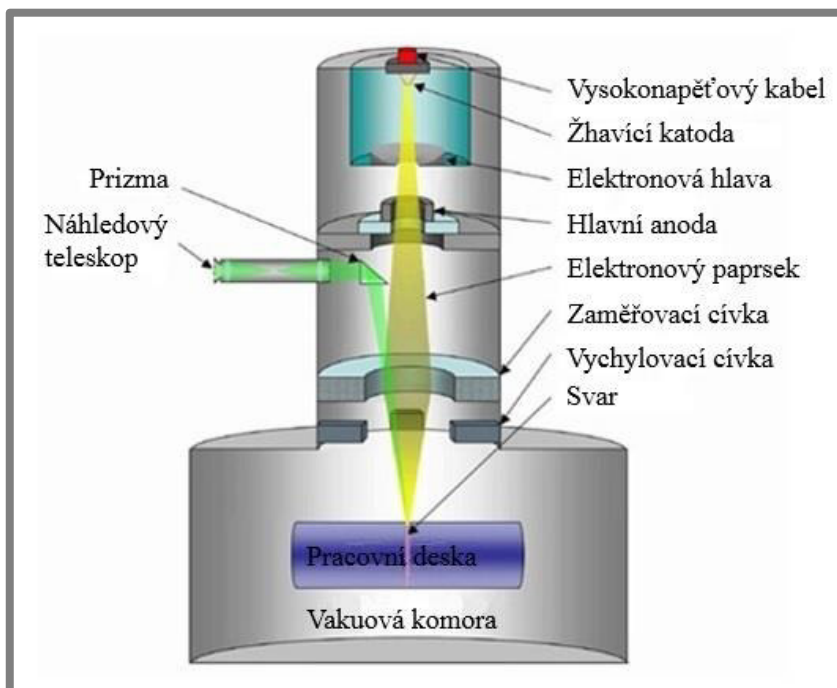
2.2.2 Metody RP pro kovové materiály

2.2.2

- EBM – Electron Beam Melting
- SLS – Selective Laser Sintering
- SLM – Selective Laser Melting
- LENS – Laser Engineered Net Shaping
- LC – Laser Cusing

1) EBM – Electron Beam Melting

Technologie Electron Beam Melting, využívá jako zdroj energie elektronový paprsek. Ten má oproti laseru vyšší energii. Elektronový paprsek představuje proud rychle letících elektronů, které při dopadu na práškovou vrstvu přemění svou kinetickou energii na místní tepelnou energii. Součást je opět vytvářena po vrstvách za pomoci kovového prášku, který je elektronovým paprskem taven a tím formován do předepsaného tvaru dané vrstvy. Prášek bývá předehříván, aby byla zaručena dobrá smáčivost mezi okolními částicemi prášku a roztavenou lázní. Neroztavený prášek je díky vysokému předehřevu slinován. Slinovaný prášek plní funkci podpůrných konstrukcí a napomáhá k tvorbě převislých a složitých konstrukcí. Celý proces výroby probíhá ve vakuu. Vakuum poskytuje čistou atmosféru, která zabraňuje kontaminaci součástí, a proto mají výrobky velmi dobré mechanické vlastnosti. Hlavním kladem metody je vysoká rychlost výroby a již zmíněné dobré mechanické vlastnosti vyráběných součástí. Díky těmto vlastnostem a rychlosti výroby je metoda EBM využívána zejména v medicíně, leteckém a automobilovém průmyslu. Nevýhodou je hrubý povrch vyráběných součástí s vysokou hodnotou drsnosti. [15; 16; 17; 18]



Obr. 10 Princip Electron Beam Melting [16]

2) SLS – Selective Laser Sintering

Pro metodu Selective Laser Sintering je charakteristický princip postupného spékání (slinování), různých druhů práškových materiálů pomocí laserového CO₂ paprsku do předem definovaného tvaru. Jako práškový materiál je používán např. slévárenský písek, plastový nebo kovový prášek. Tento prášek je přehříván na teplotu nižší, než je teplota tavení použitého prášku. Následně je v inertní atmosféře nanášen na základovou nosnou desku. Základová deska klesne po vytvoření dané vrstvy o její výšku. V místě působení laserového paprsku se prášek buď spéká, nebo se úplně roztaví. Okolí místa dopadu laserového paprsku je neovlivněno. Stejně jako u metody EBM nespečený okolní prášek plní funkci podpůrné konstrukce. Z tohoto důvodu není nutná další operace na odstranění přídavného materiálu. Jako „stavební“ materiál se na rozdíl od ostatních metod může použít téměř jakýkoli práškový materiál, který se vlivem působení tepla taví nebo měkne, ale každý materiál vyžaduje odlišné podmínky pro vytvrzení (polyamid, polykarbonát, polystyrén, speciální slitiny niklových bronzů, atd.). Z důvodu odlišnosti podmínek vytvrzení se metoda SLS dělí na různé metody:

LSP - Laser Sintering Plastic:

Tvorba prototypů slinováním z plastových materiálů např. nylon, polystyren. Vyrobená součást z nylonu se vyznačuje dobrou tvrdostí, houževnatostí a teplotní odolností. Při použití polystyrenu se vyrobené součástky používají jako vytavitelné modely pro slévárství.

LSM - Laser Sintering Metal (DMLS – Direct Metal Laser Sintering)

Modely jsou slinovány z kovových prášků. Hotový model má 60% teoretické hustoty. Součásti vytvořené pomocí metody LSM nebo DMSL mají vysokou pevnost, mechanickou odolnost a vysoká tvarová přesnost. Hotové součásti se často používají jako formy pro plastové vylisky.

LSF - Laser Sintering Formsand

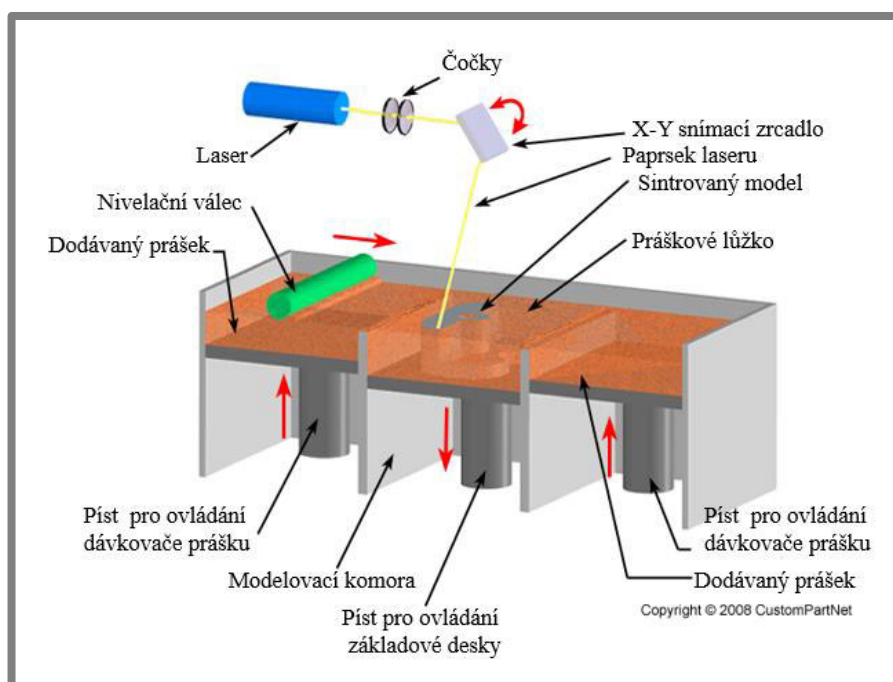
Jak už název napovídá, jde o metodu slinování upraveného tzv. slévárenského písku. LSF se využívá na výrobu klasických pískových forem pro lití.

LSC – Laser Sintering Ceramic

Při výrobě metodou LSC se používá keramický prášek, který umožňuje tisk velmi tenkých vrstev (od 0,02mm) a je spojován pomocí tekutého pojiva. Hotové výrobky se vyznačují odolností proti extrémním teplotám. Používá se při výrobě forem nebo jader pro přesné lití.

LMS – Laser Micro Sintering

U této metody se modely slinují z jemného wolframového prášku. U hotových součástí je dosažena velmi nízká drsnost (menší než Ra 1,5 μm). [8; 19; 20; 21; 22]

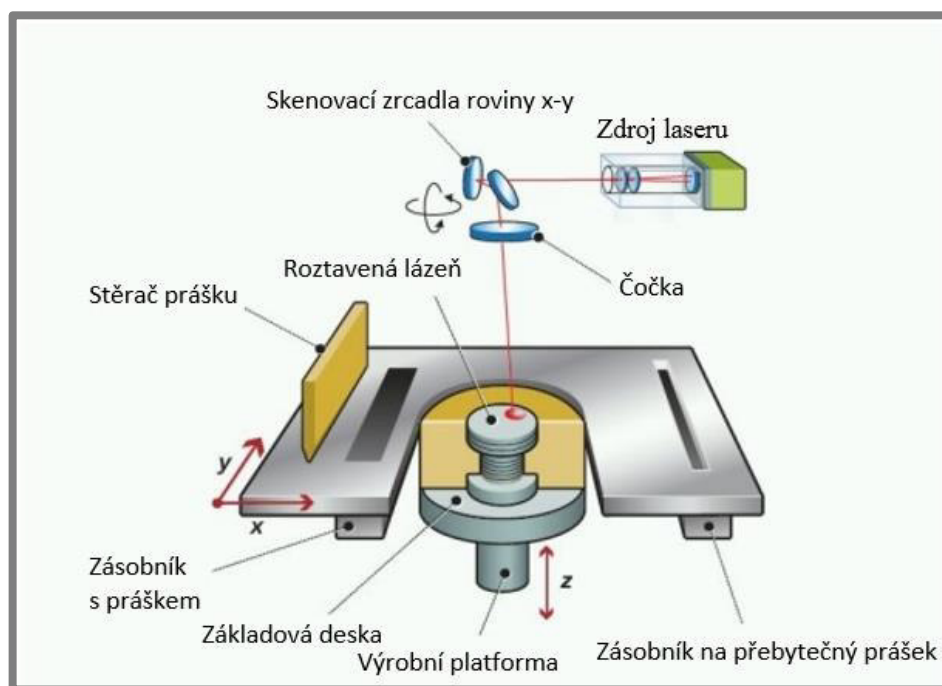


Obr. 11 Princim Selective Laser Sintering [22]

3) SLM – Selective Laser Melting

Základní charakteristika metody Selective Laser Melting je velmi podobná charakteristice metody SLS. Hlavním rozdílem mezi metodou SLM a SLS je, že při použití technologie SLS se prášek zahřeje na teplotu blízkou teploty tání daného prášku a zahřátá částice se spojí s okolními. U metody SLM je tato teplota vyšší a dosahuje za hranici teploty tání prášku. Jak už bylo řečeno, při využití metody SLM jsou částice jemného kovového prášku (velikost zrna mezi 10 μm a 60 μm) úplně roztaveny pomocí velmi výkonného vláknového laseru a vznikají tak kovové plně homogenní součástky. Stejně jako u většiny dalších metod Rapid Prototypingu je počítačový model rozdělen na jednotlivé vrstvy. Pro každou z vrstev je vygenerována dráha laseru a jeho parametry. Takto upravený soubor je nahrán do výrobního zařízení a poté může začít výroba součástí. Samotný proces výroby začíná nanášením velmi tenké vrstvy prášku (20 - 100) μm na základovou desku a působením laserového paprsku je prášek roztaven přesně v těch místech, kde má vzniknout předem definovaný tvar vrstvy a následně tuhne. Rychlost metody se pohybuje mezi (5 - 20) cm^3/h . Po dokončení první vrstvy základová deska klesne o její výšku a proces nanášení vrstvy prášku a roztavení se opakuje. Celý tento proces se opakuje do doby, kdy je celá součást hotová. Při výrobě složitějších dílu nebo dílů s převýšenými konstrukcemi se používají podpurné konstrukce. Po dokončení celého procesu výroby se součást oddělí od základové desky a případně se odstraní podpurné konstrukce. U hotové součásti může být dle potřeby využita úprava povrchu broušením, pískováním nebo obrobením funkčních rozměrů. V průběhu výroby se objemnější části, které jsou vlivem velkého vnitřního pnutí ohýbány, mohou odtrhnout od desky. Při odtrhnutí vznikají drobné úlomky. Tyto úlomky mohou poškodit čepel pohyblivého nanášecího zařízení a tím způsobit nerovnosti v dalších nanášených vrstvách, nebo může dojít k zastavení nanášecího zařízení vlivem nárazu do odtrhlé části dílu.

Proto bývá celý proces výroby monitorován, aby bylo zabráněno takovýmto chybám při výrobě. K monitorování procesu se častěji používají fotografie jednotlivých vrstev (není nutné důkladně snímat dráhu laseru). SLM zrychluje a zlepšuje průběh vývoje produktu, což velmi zrychlí celý proces a umožní tak využití více času na interaktivní vývoj součástí. Metoda SLM umožňuje nové konstrukční cesty pro vyráběné součásti, které mají mechanické vlastnosti srovnatelné s díly vyráběných konvenčními metodami. Metoda SLM je zejména využívána v leteckém nebo automobilním průmyslu pro výrobu součástí s komplikovanou geometrií, odlehčený nebo topologicky optimalizovaných konstrukcí a také v biomedicíně. Součásti vyrobené metodou SLM mohou mít tenké stěny, hluboké dutiny, skryté kanály nebo dutiny uvnitř součásti, což při výrobě konvenčními metodami není možné. Nicméně, tato technologie je v porovnání s ostatními poměrně pomalá a velmi nákladná. [19; 23; 24; 25; 26]



Obr. 12 Princip Selective Laser Melting [27]

2.3 Výroba práškových materiálů pro SLM technologii

2.3

Jak už bylo řečeno, pro výrobu pomocí metody SLM je základním stavebním materiálem jemný kovový práškový materiál. Mnoho materiálů lze vyrobit ve formě prášku, způsob a technologii výroby ovlivňují technologické a hlavně fyzikální vlastnosti materiálu. Při volbě technologie výroby prášku se musí zohledňovat například ekonomičnost metody, požadovanou výslednou charakteristiku prášku, typ aplikace prášku. Tyto metody výroby prášku podle principu zpracování se většinou dělí:

- 1) Mechanické
- 2) Fyzikálně-mechanické
- 3) Chemické
- 4) Fyzikálně-chemické (Elektro-chemické)

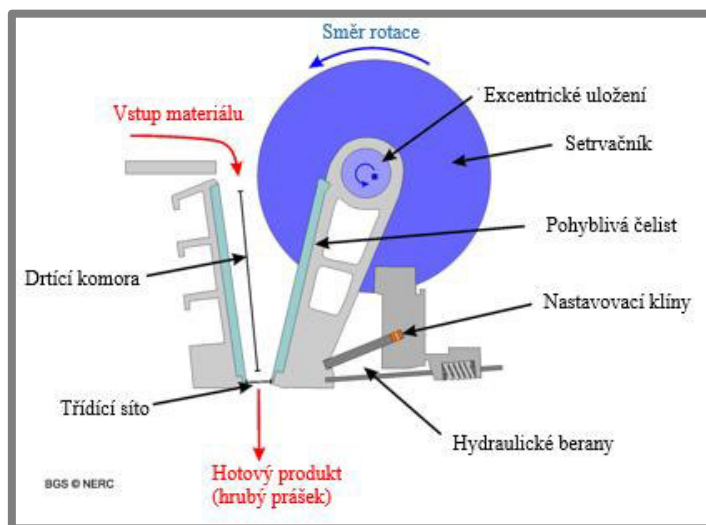
2.3.1 Mechanické způsoby výroby

2.3.1

Princip mechanického způsobu výroby prášku spočívá v rozmělnění materiálu pomocí přenosu energie mechanického pohybu rozmělnovacích segmentů. Samotný proces pracuje na stejném principu jako trhlina v jakékoli součásti tzv. lomový mechanismus. Lomový mechanismus probíhá v tomto sledu: nukleace trhlin (mikro a makrotrhliny), šíření trhlin a následně lom, při kterém vznikají nové povrchy. K rozmělnění materiálu mechanickým způsobem se využívají jednotlivé základní principy, ke kterým patří stříh, otěr, náraz nebo tlak. Tlakem se rozumí postupné zatěžování materiálu, naproti tomu nárazem je myšlený rychlý a krátký úder do materiálu. Princip otěru využívá při rozměrové redukci materiálu třecí pohyb rozmělnovacích segmentů a stříh využívá „štěpný“ lom. Tyto principy se v praxi velmi často kombinují. [28; 29]

Drcení:

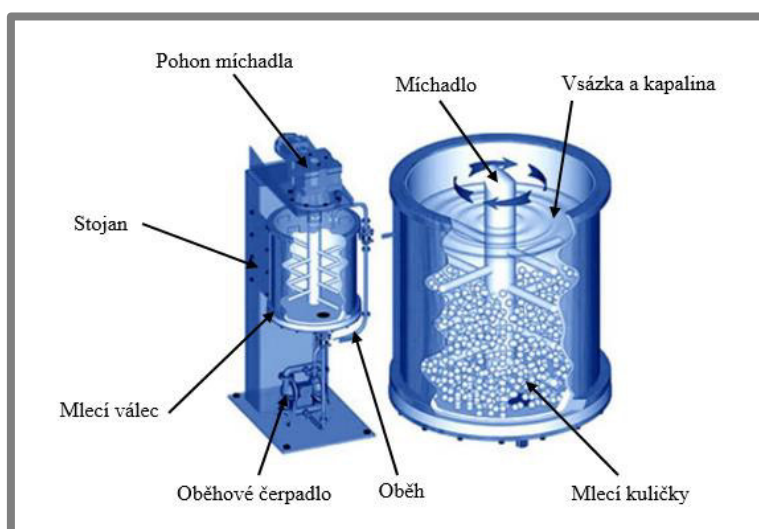
Při drcení se získává hrubý prášek, který se dále musí domlít na požadovanou hrubost hotového produktu. Pro drcení se nejčastěji používají čelistové nebo kladivové drtiče. Drtí se tzv. spečené kovové houby, ale nejvhodnější jsou křehké materiály. Čelistový drtič rozmělnuje materiál pomocí jedné pevné a jedné pohyblivé čelisti (viz. Obr. 13), kladivový drtič využívá k drcení náraz kladívek upevněných na rotoru. [28; 29]



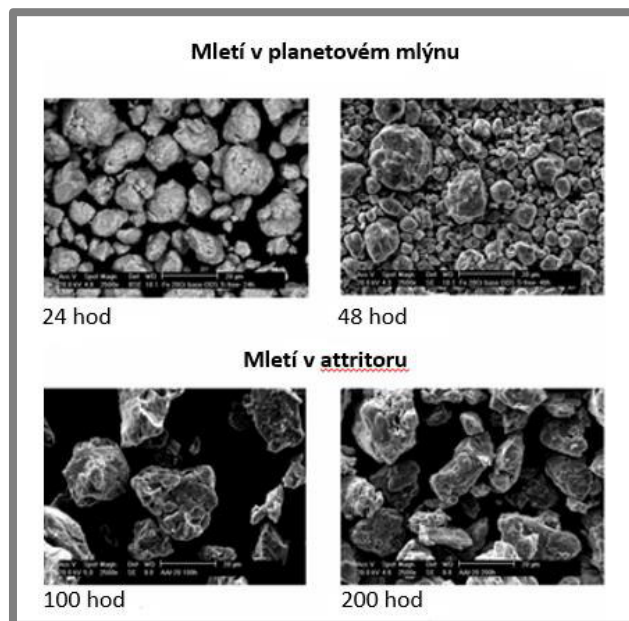
Obr. 13 Princip čelistového drtiče [30]

Mletí:

Mletí se využívá buď jako samostatná metoda, nebo jako doplňující metoda pro hrubé prášky vyrobené jinými metodami. Proces mletí se provádí v tzv. mlýnech a to buď za sucha, nebo za mokra. Při mletí za mokra se využívají různé povrchově aktivní kapaliny, které usnadňují rozmělnování (snižuje povrchovou energii částic, tím je zamezeno vytváření hrubých částic a urychluje proces disperzity). Nejčastěji se používají kulové, planetové, vířivé, kladívkové nebo vibrační mlýny. Nejjednodušším z těchto zařízení je kulový mlýn, který se skládá z otáčejícího se bubnu a tvrdých mlecích těles. Při mletí v tomto mlýnu se využívá mechanických nárazů tvrdých mlecích těles (kuličky, válečky nebo tyče) na zpracováváný prášek. Pokud je třeba intenzivního mokrého mletí, využívá se tzv. attritoru (viz Obr. 14). Oběhové čerpadlo zajišťuje nepřetržitou cirkulaci prášku s kapalinou a rotací míchadla se udává pohyb malým mlecím kuličkám a mletému prášku (mletivu). V attritorech je možné získat částice s velikostí pod 2 μm . [28; 29]



Obr. 14 Princip attritoru [31]

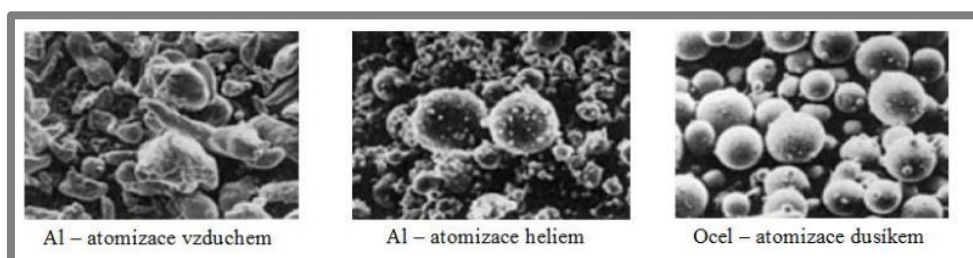


Obr. 15 Struktura částic po mletí [32]

2.3.2 Fyzikálně-mechanické

2.3.2

Tento způsob výroby prášku je zejména založen na rozstříkávání taveniny tzv. atomizace. Jedná se o nejproduktivnější, nejlevnější a tedy i nejrozšířenější princip výroby kovových prášků. Tekutý kov je rozstříkován působením tlakového plynu, proudu tekutiny, působením odstředivých sil, nebo kombinací těchto možností a následně rychle chladne a tuhne. O vlastnostech a kvalitě hotového produktu rozhoduje mnoho faktorů např. viskozita taveniny, její teplota a povrchové napětí, podmínky ochlazování, atd. Pokud se zvýší mechanická energie působící na taveninu a teplota taveniny (tudíž se sníží viskozita), velikost částic prášku se zmenší. Tvar vyrobených částic závisí na povrchovém napětí taveniny, které se případně může ovlivnit přísadami, jako jsou např. Bor nebo Fosfor. Po rozprášení je dobré kapičky taveniny rychle ochladit, čímž se zabrání tvorbě hrubozrnných strukturních složek (precipitátů). [28; 29; 33]



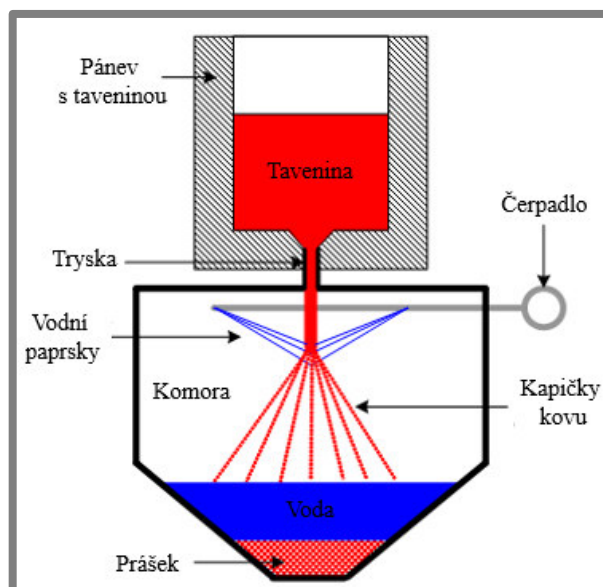
Obr. 16 Struktura částic po atomizaci plynem [31]



Obr. 17 Struktura částic po atomizaci vodou nebo atomizaci rotací [29]

Rozstříkování (atomizace) taveniny vodou:

Tento způsob výroby se vyznačuje vysokou produktivitou (až 30 tun vyrobeného prášku za hodinu) a nízkými pořizovacími náklady na rozstříkovací médium, v tomto případě vodu. Při atomizaci taveniny vodou dochází k velmi rychlému ochlazení rozprašené taveniny a ke vzniku páry při přímém kontaktu taveniny s vodou. Roztavený kov (tavenina) je rozprašován na malé kapičky vodou o vysokém tlaku, zároveň je za pomoci vody ochlazen a kalen. Voda je do místa rozprašování taveniny přiváděna pomocí trysky nebo soustav trysek (prstencová tryska, otevřené nebo uzavřené V-trysky). Následně je nutno prášek sušit ve vakuu. Získané částice prášku mají nepravidelný tvar, vysokou tvrdost a poměrně vysoký obsah uhlíku. Z důvodu vysokého obsahu kyslíku je tato metoda nevhodná pro materiály s vysokou rozpustností kyslíku (např. hliník). [29; 33; 35]

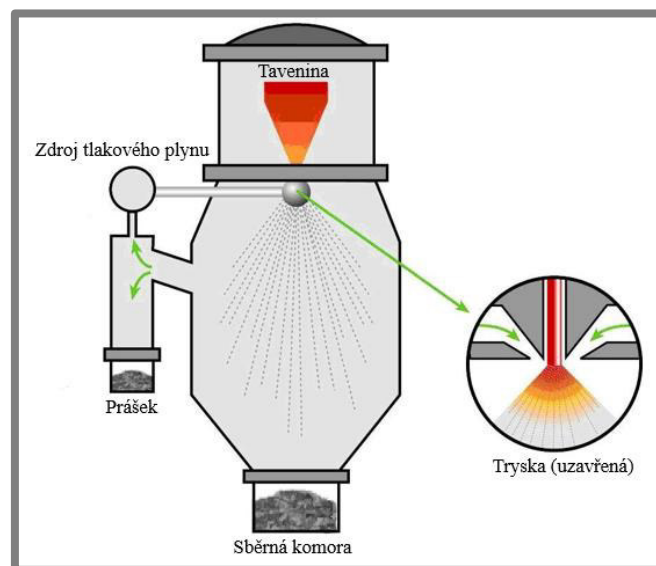


Obr. 18 Princip atomizace vodou [35]

Rozstříkování (atomizace) taveniny plynem:

K rozstříkování dochází za pomoci plynu proudícího pod tlakem přímo do místa atomizace. Jako plyn se používá vzduch, dusík, helium nebo argon s nižším tlakem než u atomizace vodou. Díky složitějšímu principu tvorby kapek, který se rozděluje do tří fází (vznik sinusových vln v tavenině, tvorba svazků taveniny, rozbití svazků na jednotlivé sferoidizované kapky), bývají výsledné kapky kulovitého tvaru (viz Obr. 16) se střední velikostí částic (20 - 300) μm . Výsledné charakteristiky prášku jsou ovlivněny celou řadou parametrů: typ použitého plynu, teplota tavení, rychlost

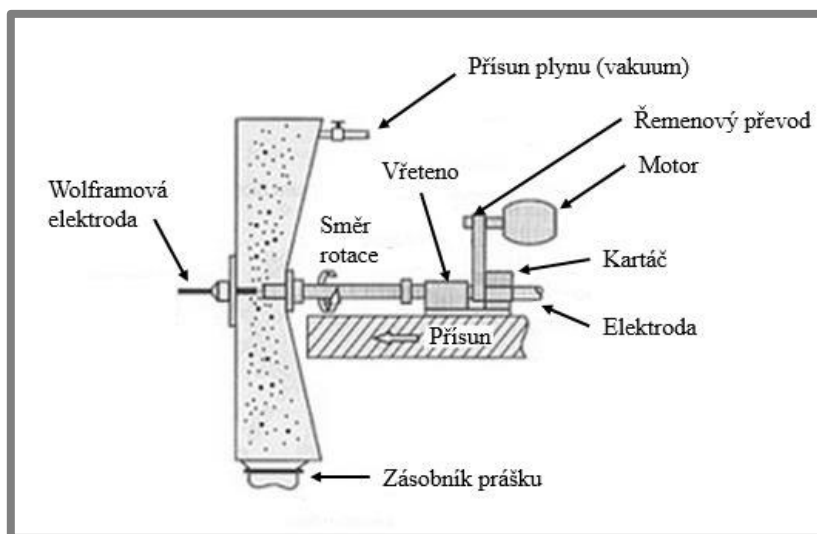
dávkování taveniny, tlak a teplota plynu, atd. Jedním dalším z důležitých parametrů je geometrie trysky, které se rozlišují dle konfigurace: 1) trysky využívající volný pád – tekutý kov vytéká a padá z nálevky do atomizační komory působením gravitační síly, 2) uzavřené (ohraňené) trysky (viz Obr. 19), 3) trysky s vnitřním mísením – tekutý kov s plynem se mísí ještě před vstupem do atomizační komory. Výhodou metody je homogenita výroby a dobré vlastnosti prášku, ale nevýhodou je neekonomičnost metody z důvodu velké spotřeby plynu. [29; 33]



Obr. 19 Princip atomizace plynem [36]

Rozstříkování (atomizace) taveniny odstředivou silou:

Jak je z názvu patrné, k atomizaci prášku se využívá odstředivá síla v rotujícím kole, disku nebo kelímku. Tato metoda využívající odstředivou sílu se dá rozdělit na jednostupňový nebo dvoustupňový proces atomizace. U jednostupňového procesu jsou v zařízení umístěny dvě elektrody. Jako anoda je použit příslušný materiál na výrobu daného prášku a vodou chlazená katoda je z wolframu. Připojením na napětí vzniká mezi elektrodami oblouk a natavuje rotující anodu s rozsahem otáček (1000 - 20000 min^{-1}) a tím se rozprašuje natavený materiál po celém prostoru výrobní komory s chlazeným pláštěm. Další možností jednostupňového procesu je využití heliového plazmového oblouku, který opět natavuje anody. Rotující elektroda musí splňovat vysoké požadavky na homogenost, kvalitu povrchu a stabilitu materiálu. Nejdůležitější předností této metody je vysoká čistota produkovaného prášku. Dvoustupňový proces je založen na tavení materiálu pomocí indukčního ohřevu v tavicím kelímku a následná atomizace je provedena pomocí chlazeného rotujícího kola, disku nebo kelímku. Tento proces se používá pro výrobu prášků z hliníku, vysokotavitelných kovů, titanových slitin, atd. Kapky se zmenšují s rostoucí rotační rychlostí, hustotou taveniny a naopak zmenšující se rychlostí dodávání taveniny. Hotové atomizované částice prášku po jednostupňovém procesu mají střední velikost (150 – 250) μm , po dvoustupňovém dokonce (80 – 90) μm a z obou procesů mají opět sférický tvar. [29; 33]



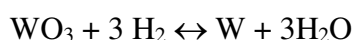
Obr. 20 Princip atomizace odstředivou silou [37]

2.3.3

2.3.3 Chemické

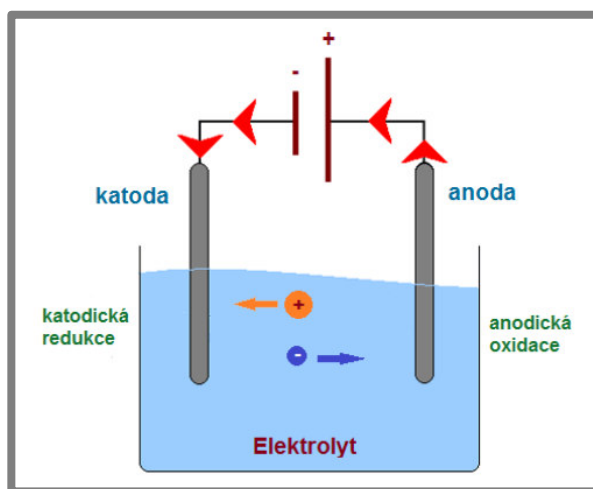
Veškeré chemické principy výroby prášku jsou založeny na redukcí kovových materiálů. Výroba prášků redukcí za pomoci pevných nebo s plyných redukčních činidel je jednou z nejvýznamnějších metod výroby práškových kovů. Jedním z důvodů je absence strusky, která vzniká při tavení materiálu, a proto není výsledný prášek od strusky znečištěn. Redukce může být dvojího typu a to buď přímá, nebo nepřímá. Pokud jsou v přímém kontaktu částice redukovaného oxidu s redukovadlem, potom tento proces nazýváme přímá redukce. Nepřímou redukcí rozumíme redukcí plyným redukovadlem. S vyšší teplotou a delší dobou redukce vznikají větší částice prášku s nižším měrným povrchem a nižším obsahem zbytkového kyslíku. Snížení zbytkového kyslíku se docílí i použitím vysokého průtoku například vodíku s nízkým rosným bodem, který dále umožňuje vysokou redukční rychlost a zabránění re-oxidaci prášku během ochlazování. Nejčastější využívanou reakcí při redukcí je redukčně-oxidační reakce. Hlavní plyné redukční činidlo je uhlík a vodík v elementární formě nebo ve formě sloučenin (CO, CH₄, atd.) a jako pevné redukční činidlo bývá použit koks nebo saze. Výsledkem chemické redukce a následného rozkladu je buď prášek, prášková směs, nebo tzv. kovové houby, které se dále drtí (melou) na požadovanou hrubost prášku. Speciální metodou chemické atomizace prášků je výroba prášku z plyné fáze, kdy je velmi jemný a relativně čistý prášek získáván z kovových sloučenin, které jsou vhodným způsobem převedeny do plyné fáze. Další speciální metodou je výroba prášků z tvrdých materiálů zejména karbidů, nitridů, boridů a silicidů. [29]

Příklad rovnice redukce WO₃ vodíkem při výrobě wolframového prášku:

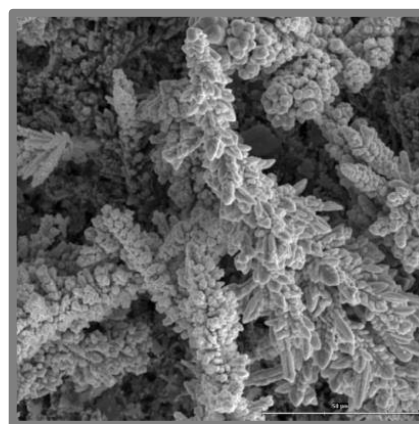


2.3.4 Fyzikálně-chemické (Elektro-chemické)

Základem těchto principů je elektrický proud působící v elektrolytu, který funguje jako redukční činidlo. Elektrolytem bývá solný roztok vedoucí elektrický proud pomocí iontů. Elektrolýzu u fyzikálně-chemických, respektive elektro-chemických metod výroby kovových prášků dělíme do dvou podskupin na elektrolýzu z vodních roztoků a elektrolýzu tavenin (roztavených solí). Hlavním rozdílem těchto dvou elektrolýz je v teplotách procesu výroby. Zatímco elektrolýza z vodních roztoků probíhá přibližně do 60 °C, elektrolýza z roztavených kovů vyžaduje teploty řádově vyšší (závislost na teplotě tání daného solného eutektika). V základním případě elektrolýza probíhá na dvou elektrodách ponořených v elektrolytu, které jsou připojeny na stejnosměrný proud. Elektroda z kovu, jejíž ionty jsou v roztoku, je připojena na kladný potenciál proudu tzv. anoda. Při procesu elektrolýzy se kladné ionty (kationty) přemísťují k záporné elektrodě (katodě) a záporné ionty (anionty) k anodě (viz. Obr. 21). Následně na anodě probíhá vylučování elektronegativních složek (kovy, vodík) tzv. oxidace a na katodě se vylučují elektro pozitivní složky tzv. redukce. Anoda bývá vyrobena z oceli, grafitu nebo vysokotavitelných kovů. Vhodné pro tuto metodu jsou materiály s nízkou afinitou ke kyslíku, jako je měď, nikl a tantal, jež se vyrábí z roztavených solí. Výsledný prášek se vyznačuje svojí vysokou čistotou a dendritickou, nebo houbovitou strukturou. Nevýhodou metody je vysoká energetická náročnost a nutnost čistého elektrolytu, proto se je nutná jeho tzv. rafinace od zbytkových nečistot (zbytky solí). [29]

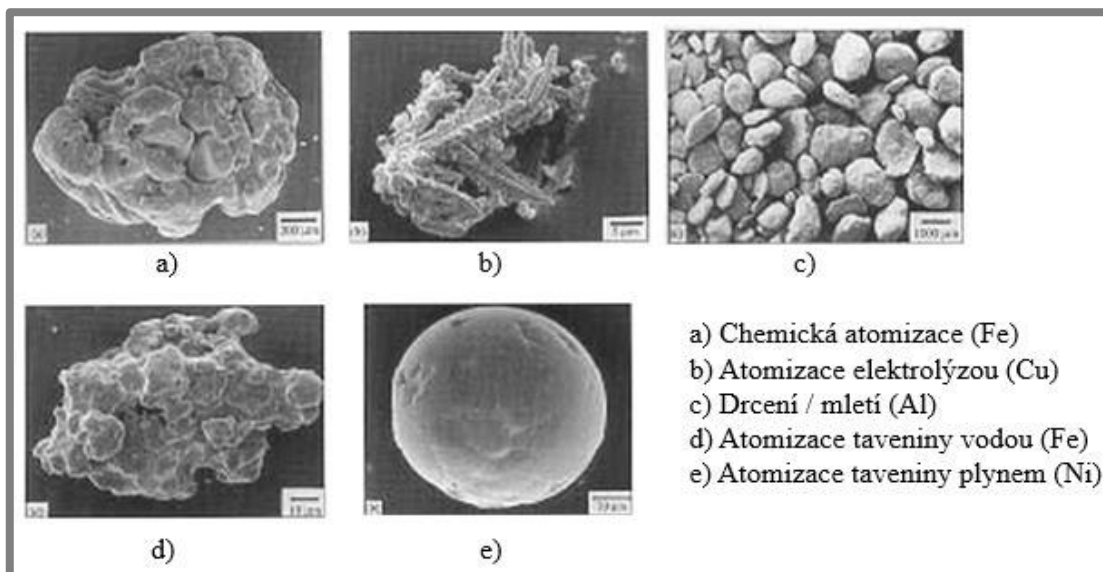


Obr. 21 Princip elektrolýzy [29]



Obr. 22 Dendritická struktura částic elektrolytické mědi [29]

Pro lepší představu struktur a tvarů částic z jednotlivých metod atomizace kovových prášků je na obrázku 22. Z tohoto obrázku je patrný rozdíl v tvarech částic podle jednotlivých metod. Nejzajímavější je hned první z těchto obrázků tzv. kovová houba, v tomto případě železná, která se dále drtí na požadovanou hrubost prášku. Za zmínku také stojí i poslední z těchto obrázků a to částice vyrobená metodou atomizace taveniny plynem, která má tvar takřka ideální sférický.



Obr. 23 Srovnání struktur a tvaru částic prášku jednotlivých metod atomizace [38]

2.4

2.4 Vlastnosti a charakterizace kovového prášku

Vlastnosti kovového prášku jsou velmi důležitým faktorem při výrobě aditivními technologiemi. Tyto vlastnosti je nutné průběžně kontrolovat, protože čím lépe je prášek kontrolován, tím lepší a přesnější bude konečný výrobek. Většina základních vlastností jako je velikost, tvar, atd. závisí na způsobu výroby prášku a následné úpravy. Vlastnosti kovových prášků dělíme:

- 1) Základní vlastnosti
- 2) Technologické vlastnosti
- 3) Sdružené vlastnosti

2.4.1

2.4.1 Základní vlastnosti

Mezi základní vlastnosti prášku patří: Velikost a tvar zrn, distribuce velikosti částic (rozložení zrn), mikrostruktura, mikrotvrdoost, pórovitost a měrný povrch částic. Tyto vlastnosti patří mezi nejdůležitější pro kovové prášky.

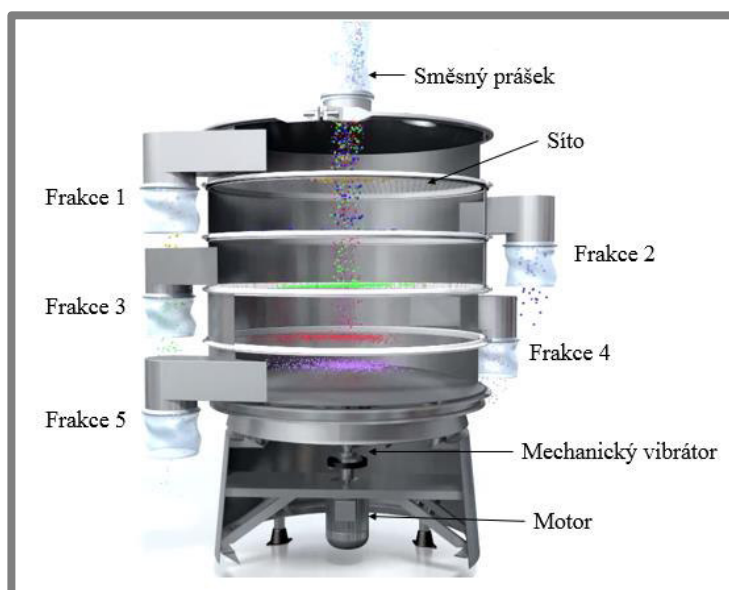
Velikost částic:

Velikost částic se vyjadřuje pomocí tzv. geometrického průměru, jelikož snaha je vyjádření velikosti obecného tvaru částice jedním rozměrem. Ve většině případu jde o průměr koule, která je s částicí ekvivalentní. Některé částice mají komplikovanější tvar a nejde proto jejich popis nahradit jedním rozměrem. Pro úplný popis je z tohoto důvodu nutné použít více rozměrů, například vločkovitý tvar částice potřebuje k úplnému popisu alespoň dva parametry a to průměr a tloušťku. Částice lze rozdělit do šesti skupin dle označení hrubosti (velikosti) prášku (viz Tab. 2). [29; 40]

Tab. 2 Rozdělení dle hrubosti prášku a způsoby měření velikosti částic [29]

Označení	Velmi hrubě disperzní	Hrubě disperzní	Jemně disperzní	Velmi jemně disperzní	Koloidně disperzní	Molekulárně disperzní
Oblast velikosti částic (μm)	>500	500 - 50	50 - 5	5 - 0,2	0,2 – 0,02	<0,02
Způsob měření	Hrubá síťová analýza	Jemná síťová analýza	Mikroskopie Sedimentace		Elektronová mikroskopie	

Jak je z tabulky patrné, hrubost zrn se dá měřit několika různými způsoby. Vhodnost metody se posuzuje podle předpokládané hrubosti zkoumaného prášku. Jemné prášky se měří pomocí mikroskopů, jemnější prášky dokonce elektronových mikroskopů, nebo pomocí sedimentační metody, která stanovuje velikost částic podle rychlosti klesání v klidném prostředí (v kapalině nebo vzduchu). Pro měření hrubých prášků do velikosti částic cca. 50 μm se používá metoda síťové analýzy. Tato metoda je nejrozšířenější. Principem metody je postupné prosévání prášku sítí. Částice prášku větší, než je velikost oka v síti, zůstává na něm a částice menší propadávají skrz, čímž je zajištěna separace prášku dle velikosti. Síťování se provádí ve vibračním zařízení se soustavou drátěných sítí, která jsou odstupňována podle velikosti ok (viz. Obr. 24). V každém síti zůstává po prosetí pouze daná frakce částic prášku, kterou udává rozdíl mezi velikostí ok po sobě jdoucích sítí (např. pokud propadnou částice sítím s velikostí oka 100 μm , ale už neprojdou sítím s velikostí oka 90 μm , na daném síti zůstane prášek s velikostí částic 90 μm až 100 μm). Pohyb prášku je zajištěn vibrátorem. Nejčastěji je používán mechanický vibrátor, který umožňuje lepší prosetí prášku. Pro síťování relativně hrubých, nekohezních prášků se využívá suché síťování, mokré síťování je vhodné pro jemné kohezní prášky. [29; 40]







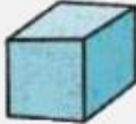



Obr. 24 Princip síťování [39]

Tvar částic:

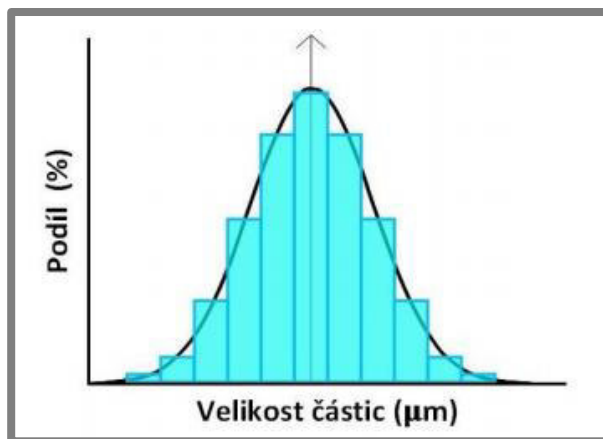
Tvar částic bývá odlišný (viz Tab. 3), což je způsobeno typem materiálu, způsobem výroby, atd. Částice se liší nejen tvarem ale mnohdy i kvalitou povrchu (hladký nebo členitý).

Tab. 3 Rozdělení částic podle vnějšího geometrického tvaru [41]

Tvar částic	Grafické znázornění
Kulovitý (sférický)	
Oblý	
Válcovitý	
Houbovitý	
Jehlicovitý	
Vločkovitý	
Kubický	
Sdružený	

Distribuce velikosti částic:

Vyrobený práškový materiál není složen pouze z jedné velikosti částic, ale zrna mají různou velikost v určitém rozsahu. Množství částic v daném rozsahu velikosti je popsán tzv. distribuční funkcí (viz Obr. 24). Určení distribuce prášku je prováděno obdobnými způsoby, jako se zjišťují velikosti zrn: síťový rozbor, mikroskopické měření, sedimentace, třídění vzduchem, laserovým analyzátořem velikosti částic, atd.



Obr. 25 Histogram distribuce velikosti částic [29]

2.4.2 Technologické vlastnosti

2.4.2

Technologické vlastnosti prášku udávají jeho statické a dynamické chování při procesech zpracování prášku. Pod těmito vlastnostmi si můžeme představit např. tekutost, sypanou hustotu, lisovatelnost. Většina těchto vlastností je využívána pro lisování, slinování, atd. Nejdůležitější z těchto vlastností pro výrobu metodou SLM je tekutost kovových prášků. [29]

Tekutost:

Pod tekutostí prášku si můžeme představit podobnou vlastnost, jako je viskozita u tekutin. Jde o schopnost prášku se pohybovat („téci“) v potrubí, násypkách a v dalších prostorech využívaných pro manipulaci a dopravu prášku do pracovního prostoru. Tekutost je definována jako doba, za kterou určité množství prášku „vyteče“ nálevkou s vrcholovým úhlem 60° a otvorem o předem daném průměru. Hlavní negativní vliv na tekutost má tvar zrn a tzv. odpor proti tečení, který je způsoben vzájemným třením částic prášku a třením částic o stěnu nálevky.[29]

2.5 Kovové práškové materiály pro SLM

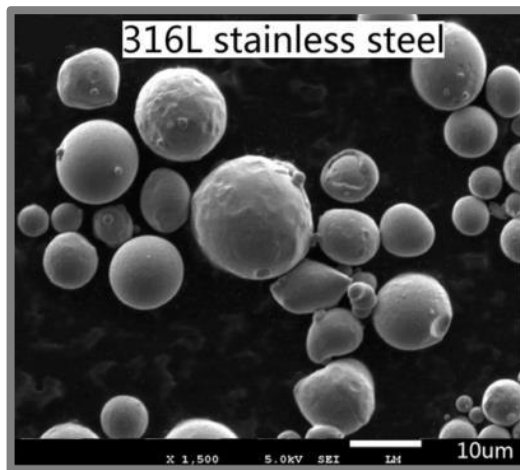
2.5

Kovové materiály se používají pro výrobu modelů metodou SLM ve formě prášku z jednoho druhu kovového materiálu (jednosložkové), nebo ze slitiny několika druhů odlišných kovových materiálů. Tyto slitinové materiály kombinují kladné i záporné vlastnosti, čehož se využívá pro dosažení lepších vlastností dle původních požadavků. Z tohoto důvodu je většina prášků ze slitin více kovů. Mezi nepoužívanější materiály pro metodu výroby SLM z kovových prášků patří ocel, hliník, titan, nikl, cobalt atd.

2.5.1 Práškové kovové materiály – jednosložkové

Ocelové prášky:

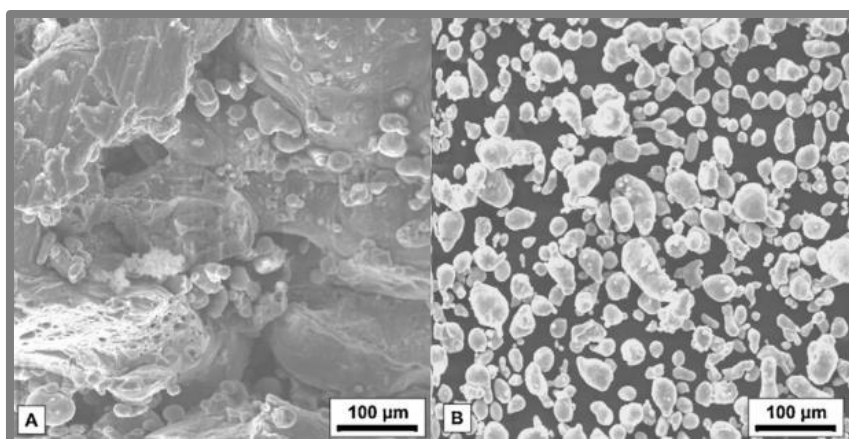
Základem ocelových prášků (steel powders) je železo. Dále jsou obsaženy přísadové prvky (např. nikl, měď, chrom, uhlík, atd). Nejde tedy o jednosložkový materiál, ale je vytvořen ze slitiny. Ocel je nejběžnější a nejpoužívanější materiál ve strojírenství, proto lze ocelové prášky řadit mezi jednosložkové práškové materiály. Tyto prášky bývají nejčastěji vyráběny pomocí metody atomizace plynem. Nejvyužívanějšími jsou v dnešní době prášky s označením 904L nebo 316L. Velikost částic ocelového prášku (E316 L) se pohybuje v rozmezí (10 - 38) μm a tyto částice se vyznačují sférickým tvarem (viz Obr. 26). Sférický tvar částic napomáhá dobré tekutosti, tudíž dobrému nanášení jednotlivých vrstev a dávkování prášku. Tento prášek je charakteristický velkou hustotou a dobrými mechanickými vlastnostmi. Hotové součásti se využívají nejen pro komerční účely, ale také v lékařství. [23; 42]



Obr. 26 Mikrostruktura ocelového prášku[43]

Hliníkové prášky:

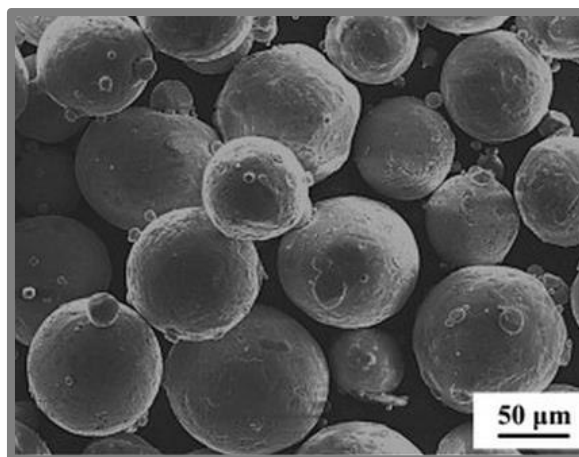
Nejvíce jsou rozšířené hliníkové prášky s obsahem více kovových materiálů (směs prášků), ale používá se i prášek z čistého hliníku. Výroba čistého hliníkového prášku spočívá v atomizaci inertním plynem. Distribuce částic, se sférickým nepravidelným tvarem, hliníkového prášku získaného atomizací plynem je mezi (45-75) μm . Tento rozsah zaručuje dobrou a rozlehlou tekutou lázeň, která umožňuje rychlý ohřev laserovým paprskem a zároveň zabraňuje tvorbě nežádoucích kuliček materiálu vznikajících při interakci prášku a laserového paprsku. Velkou výhodou hliníkových prášků je jejich relativně nízká cena, ale mají mnoho nevýhod a problémů spojených s výrobou SLM. Nevýhodou je obtížná tvorba tenkých vrstev prášku, protože hliníkový prášek je lehký a má špatnou tekutost, zejména v přítomnosti vlhkosti. V důsledku špatné tekutosti vznikají v násypkách a zásobnících mezi částicemi tzv. přemostění a brání tak toku prášku do pracovního prostoru. Další velkou nevýhodou je odrazivost hliníku (cca. 91 %) a vysoká tepelná vodivost (odvod tepla z místa tavení), čímž se zvyšuje nárok na výkon použitého laseru. Nicméně největší překážkou je oxidace hliníku během výroby, která brání difuzi. Použití dílů vyrobených SLM technologií z hliníkových prášků je nejčastěji v automobilovém, leteckém i vesmírném průmyslu, kde je snaha o co nejlehčí konstrukce. [19; 43]



Obr. 27 A) Struktura hliníkového úlomku vyrobeného vzorku
B) Tvar částic hliníkového prášku [44]

Titanové prášky:

Stejně jako u předchozích materiálů je titanový prášek nejvíce využíván ve formě práškových směsí (slitin), ale i čistý titanový prášek má své uplatnění. Výroba titanového prášku se provádí v zařízení na atomizaci plynem, v tomto případě argonem. Zrna získaného prášku mají sférický tvar, což opět zlepšuje tekutost prášku, a jsou poměrně jemná (8 – 30) μm . Titanový prášek respektive titan má mnoho kladných vlastností, mezi hlavní se řadí vysoká korozivzdornost, velmi dobré mechanické vlastnosti a vysoká biokompatibilita. Právě díky vysoké kompatibilitě jsou výrobky z titanového prášku používány pro výrobu kloubních a kostních náhrad a další potřebné součástky v biomedicině. Dalším uplatněním titanových výrobků je letecký, vesmírný a chemický průmysl. [44; 45; 46]

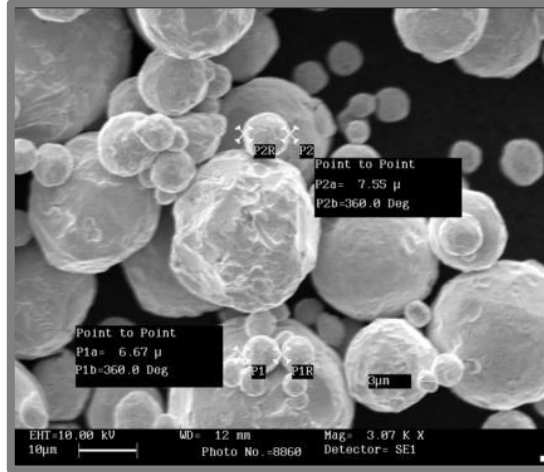


Obr. 28 Struktura a tvar částic titanového prášku [48]

Zlatý prášek:

Zlatý prášek se výhradně používá pro výrobu drobných součástí, jako jsou šperky, módní doplňky, nebo dříve hojně využívané zubní náhrady. Používá se velmi jemný prášek v rozmezí (3 - 24) μm (některé ultra jemné prášky mohou mít i částice menší než 3 μm) a částice mají pravidelný sférický tvar (viz Obr. 29). Tento prášek byl dříve rozprašován do vody, ale z důvodu špatného rozstříku částic se začal používat isopropanol jako disperzní médium. Nevýhodou zlatých prášků je stejně jako u

hliníkových prášků jeho odrazivost, která zvyšuje nároky na laserový paprsek. Na výrobu šperků pomocí metody SLM se dále využívá stříbrných a platinových prášků, které mají podobné vlastnosti jako zlaté prášky, ale nevyužívají se tak často jako zlaté. [47; 48]



Obr. 29 Tvar a struktura částic zlatého prášku [49]

Při výrobě pomocí metody SLM se používá další řada kovových práškových materiálů, které se ale využívají pouze ve formě slitin. Mezi tyto materiály patří měď, nikl, kobalt, chrom, atd.

2.5.2

2.5.2 Práškové kovové materiály - směsi prášků

Pro výrobu procesem SLM jsou tyto materiály velmi často využívány a je jich velké množství. Liší se od sebe nejen chemickým složením, ale často i odlišnými mechanickými vlastnostmi. Prášek je buď vyráběn ze slitiny, nebo smícháním více prášků. Před samotnou výrobou je nutno tyto prášky smíchat v tzv. mixérech po určitou dobu, aby bylo zajištěno jejich dokonalé smíšení. Tento smíchaný i slitinový prášek mívá vždy jeden hlavní prvek, který má největší hmotnostní podíl (např. slitiny na bázi železa, hliníku, titanu, atd.) a další přídavné prvky vylepšující jeho vlastnosti.

Směs prášků na bázi železa:

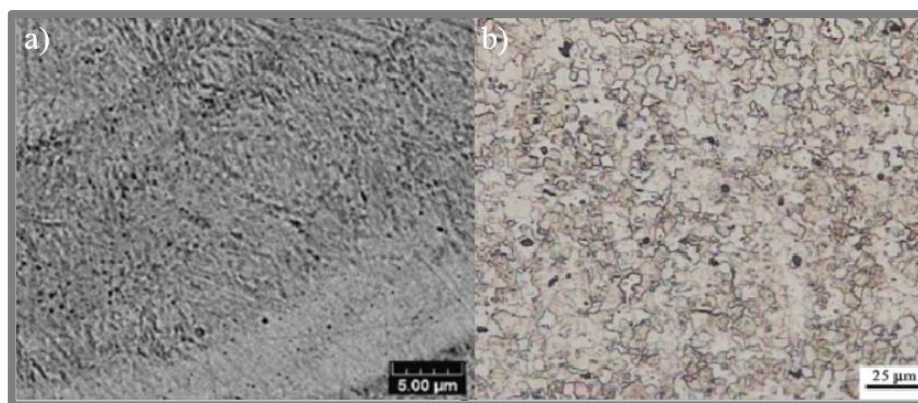
Základem těchto prášků je železo a pro zlepšení požadovaných vlastností jsou přidány další prvky. Díky železu jsou tyto prášky i hotové výrobky magnetické.

Fe-Ni (železo-niklové prášky): Nejvyužívanější příměsí pro prášky ze slitin na bázi železa je nikl. Nejčastěji se využívají prášky s 30,50, ale někdy i 80% příměsí niklu (FeNi_3 , Fe_7Ni_3 , atd.). Částice tohoto feromagnetického prášku jsou menší než $60 \mu\text{m}$ (průměrná velikost částic železného prášku je $35 \mu\text{m}$, niklového prášku $30 \mu\text{m}$) a mají sférický tvar (viz. Obr. 29). Vzhledem k mimořádným magnetickým, mechanickým a elektrickým vlastnostem jsou tyto materiály široce zkoumány a využívány pro magnetická zařízení, jako jsou například senzory, transformátory, indukční zařízení, elektrické motory atd. Hlavním problémem jsou vysoké teploty při výrobě metodou SLM, které mohou způsobit ztrátu magnetických vlastností v důsledku nadměrného

růstu zrn v materiálu. Proto jsou teploty při výrobě jen o málo vyšší, než je teplota tavení prášku. [49; 50]

Fe-Cr-Al (železo-chrom-hlinité prášky): Tyto prášky se vyznačují dobrým poměrem tečení a odolností proti oxidaci při vysokých provozních teplotách (vyšší než 1000 °C). Tyto vlastnosti jsou dosaženy právě použitím hliníku a chromu, které tvoří stabilní ochranné bariéry na povrchu. Nevýhodou těchto prášků je jejich vysoká cena. [51]

Fe-SiC (železný prášek s karbidy křemíku): Díky karbidům se materiál vyznačuje vysokou tvrdostí. Nejlepším karbidem je pro tyto účely karbid křemíku, protože si zachovává svoji tvrdost i při vysokých teplotách. Částice karbidů SiC jsou velmi drobné ve srovnání s částicemi železného prášku (např. prášek Fe o velikosti částice 20 μm se mísí s karbidy o velikosti 0,7 μm). Nevýhodou SiC pro vysokoteplotní aplikace je jeho silná reaktivita, která se ale zmenšuje díky smíšením s čistým železem v důsledku rozpuštění C a Si. [52]



Obr. 30 Struktura materiálu a) Fe-Ni [50] b) Fe-SiC [52]

Směs prášků na bázi hliníku:

Směsi na bázi hliníku přebírají převážně jeho vlastnosti (viz hliníkové prášky), které jsou ovlivněné přidávanými materiály.

Al-Mg (hlinito-hořčikové prášky): Jsou vyráběné ze slitinového materiálu. Částice mají nepravidelný tvar. Hotový výrobek má porézní strukturu, je velmi lehký a pevný. Tyto výrobky se uplatňují v leteckém průmyslu a používají se pro vesmírná zařízení. [19]

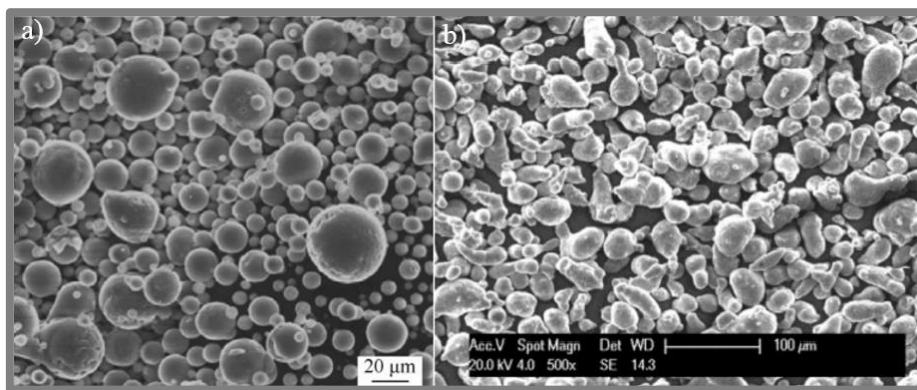
Al-Si (hlinito-křemíkové prášky): Prášek je vyráběn ze slitiny pomocí atomizace plynem a částice mají převážně sférický tvar. Hlavním přínosem tohoto prášku je extrémní pevnost výrobku. Mez kluzu součásti vyrobené pomocí metody SLM vykazují 4x vyšší mez kluzu než mají lité součásti. Pevnost v tahu je přibližně (260 – 380) MPa. [53]

Al-Si-10Mg: Tento prášek se skládá z více složek: hliník, křemík, hořčík (např. Mg-0,48; Al-88,85; Si-10,67). Pro hořčík je udáno optimální množství (0,3 - 0,5) %.

Velikost zrn prášku se pohybuje mezi (25 – 45) μm . Výrobky mají široký rozsah mechanických vlastností, extrémně jemnou strukturu a vysokou tvrdost. Mechanické vlastnosti jsou při výrobě SLM stejné nebo i vyšší než při výrobě litím. [54; 55]

Al-Fe₂O₃ (hliníkový prášek s oxidem železitým): Čistý hliníkový prášek se střední velikostí částic 40 μm je smíchán s oxidem železitým s velikostí částic menší než 53 μm . Práškové směsi se používají s 5, 10, 15 hmot. % Fe₂O₃. Tento oxid má velmi dobrý vliv na tvrdost materiálu, která dosahuje tvrdosti (50 - 60) HV. Vyrobena součást má hrubou strukturu a velmi hrubý povrch (Ra 23 μm až 32 μm). [56]

Al-Fe-V-Si: Vyráběn je ze slitiny hliníku, železa, vanadu a křemíku. Svou vysokou pevností, tažností a houževnatostí při teplotách až 650 K (cca 380 °C) konkuruje titanovým slitinám pro aplikaci v leteckém průmyslu. [57]



Obr. 31 Tvar a struktura prášku a) Al-Fe-V-Si [57] b) AlSi10Mg [58]

Směs prášků na bázi titanu:

Vlastnosti těchto prášků jsou ovlivněny hlavně titanem, který v těchto prášcích zaujímá většinový podíl. Většina těchto prášků se využívá v lékařství.

Ti-Ni (titano-niklové prášky): Bioafinitní materiál široce používaný v lékařství na chirurgické nástroje, různé tělní implantáty. Díky vynikající odolnosti proti korozi, proti opotřebení a hyperplasticitě mají výrobky využití i v oboru zubního lékařství. Prášek je vyráběn pomocí atomizace plynem. Částice mají střední velikost titanového prášku 35 μm a niklového prášku 30 μm . Nevýhodou tohoto prášku jsou vysoké náklady. [59]

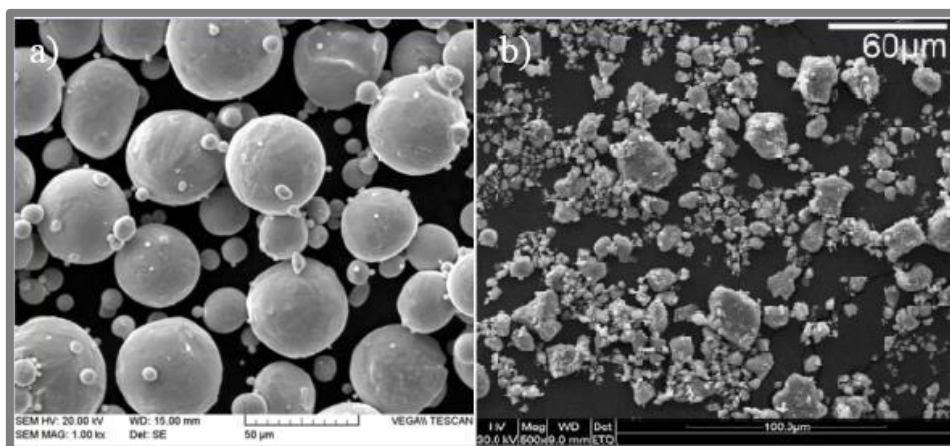
Ti-6Al-4V: Jedná se o nejpoužívanější slitinu na bázi titanu. Zrna prášku mají kulovitý tvar, proto má prášek dobrou tekutost. Využívána je zejména pro unikátní kombinaci pevnosti, houževnatosti, odolnosti proti korozi, nízkou hmotnost a biokompabilitu. Používá se pro letecký průmysl (součásti motorů, turbíny, atd) a díky biokompabilitě i v lékařství (hlavně implantáty pro chirurgii). [60]

Ti-6Al-7Nb: Od prášku Ti-6Al-4V se liší pouze záměnou vanadu s niobem. Niob vylepší mechanické vlastnosti prášku, zvýší odolnost proti korozi a zlepšuje

biokompabilitu. Hlavní aplikací výrobků jsou díky ještě lepší biokompabilitě různé tělní implantáty. [61]

Ti-TiB (titanový prášek s boridy titanu): Čistý titan vykazuje nízkou odolnost proti opotřebení a tvrdost, proto se přidávají částice boridu titanu. Borid titanu je elektricky i tepelně vodivý, tvrdý, žáruvzdorný a velmi pevný (230 - 770)MPa. Místo TiB se používají i další sloučeniny jako například TiN, TiC, SiC, B₄C, atd. TiB oproti ostatním sloučeninám poskytuje příznivější vlastnosti. Vykazuje dobrou chemickou a termodynamickou stabilitu, nereaktivní matici a mechanické vlastnosti, které vedou k vytváření dobrých mezifázových vazeb mezi maticí Ti a částicemi TiB. Další výhodou bóru je jeho biokompatibilita, a proto jej lze používat v lékařství. [62]

Ti-Al: Směs titanu a hliníku má velké využití v leteckém průmyslu a elektrárenských aplikacích z důvodu úspory hmotnosti, ale pouze pro středně teplotní prostředí (600 - 850) °C. Další výhodou Ti-Al slitiny je vysoká měrná pevnost, vysoký modul pružnosti a vynikající odolnost proti oxidaci. Nevýhodou je nízká pevnost při zvýšených teplotách. Pro zlepšení vlastností bývá vyztužen částicemi TiC. [63]



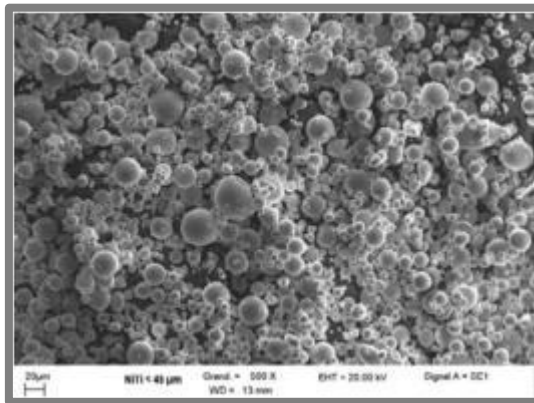
Obr. 32 Tvar a struktura prášku a) Ti-SiC [64] b) Ti-Al [63]

Směs prášků na bázi niklu:

Všeobecné vlastnosti niklu - jedná se o těžký kov, odolný proti zásadám, ale málo odolný proti kyselinám, feromagnetický a dobře svařitelný.

Ni-Ti (Niklo-titanové prášky): Biomedicínský materiál (někdy známý jako nitinol) s kombinací vysoké pevnosti, tažnosti, nízké tuhosti a tvarové pevnosti. Nejčastější aplikací jsou implantáty s dobrou mechanickou stabilitou v kostní tkáni. Prášek je atomizován plasmou na velikost částic (25-45) μm. [65; 66]

Niklové superslitiny: Tyto slitiny jsou hlavně zaměřeny na výrobu součástí používaných ve vesmíru a pro letecký průmysl. Příkladem je slitina s označením CM247LC. Tato slitina byla vyvinuta pro vysokoteplotní turbínové lopatky s nízkým obsahem uhlíku. [67]



Obr. 33 Tvar a struktura částic Ni-Ti prášku [66]

Směs prášků na bázi kobaltu:

Co-Cr (Kobalto-chromový prášek): Co-Cr prášek je nejčastěji používán pro výrobu dentálních náhrad. Dalším použitím jsou komponenty na výrobu elektřiny, letecký, ropný a plynárenský průmysl. Využívány jsou díky své odolnosti proti opotřebení, korozi a hlavně odolnost proti únavě spolu s biokompatibilitou. Pro získání optimálních mechanických vlastností a odolnosti proti korozi musí být obsah chromu (10-30) %. [68; 69]

Co-Cr-Mo: Tento prášek je používán k výrobě součástí pro fixace kostí, kyčelních a koleních kloubních náhrad, nebo dentální aplikace. Při výrobě těchto součástí pomocí metody SLM je dosaženo vyšší pevnosti v tahu než u odlitých součástí. Hlavní výhodou je pevnost součástí a odolnost proti korozi. [70]

Směs prášků na bázi wolframu:

Wolfram je kovový žáruvzdorný materiál s vysokým bodem tání (3420 °C), vysokou pevností, dobrou tepelnou vodivostí. Naproti tomu je špatně zpracovatelný z důvodu vysoké teploty tavení, má špatnou tekutost a vysokou křehkost.

W-Ni (Wolfram-niklové prášky): Nikl je v tomto případě použit jako matrice (pojivo) pro tvrdé wolframové částice a vzniká jedinečná kombinace pevnosti, tažnosti a hustoty. Nikl dále napomáhá výrobě pomocí slinování v kapalně fázi, přičemž částice téměř čistého wolframu jsou rozptýleny v matici tvárného materiálu (niklu). Wolframových částic bývá (78-98) hm.%. [71]

3 DISKUZE

Bakalářská práce byla zaměřena na výrobní metodu Selective Laser Melting, která spadá pod skupinu technologií výroby modelů a součástí souhrnně nazývanou Rapid Prototyping. Hlavní problematikou byly kovové práškové materiály používané právě při výrobě technologií SLM.

Technologie RP je poměrně novou a progresivní metodou výroby, která se stále rozvíjí. V dnešní době začíná hrát velkou roli v mnoha odvětvích průmyslu. Používá se pro výrobu takových dílů, které dříve vyrobitelné nebyly. V budoucnu bude většina složitějších součástí vyráběna touto metodou, naopak jednodušší součásti není výhodné vyrábět pomocí RP ani v dnešní době z důvodu velké nákladnosti.

Jednou z nejnovějších metod RP pro kovové materiály je metoda SLM. Součásti jsou zhotovovány spékáním jednotlivých vrstev kovového prášku vysoce výkonným laserovým paprskem. Velkou nevýhodou této metody pro využití v průmyslu ve větší míře je vysoká cena těchto zařízení i práškových materiálů. Z tohoto důvodu je tato metoda v dnešní době pro běžný průmysl nevyužitelná. Největší uplatnění SLM je hlavně pro výrobu prototypů, rozvoj kosmonautiky a vesmírných zařízení, kde se využívají složité součásti s vysokým poměrem pevnosti (tuhosti) vůči hmotnosti. Do budoucna bude snaha o urychlení celého procesu, což může být vyřešeno více laserovými paprsky pracujícími najednou, nebo použitím výkonnějších laserů.

Hlavní vliv na kvalitu a vlastnosti součástí má práškový materiál, ze kterého je součást vyrobena. Prášky se od sebe liší tvarem a velikostí zrn, materiálem, atd. Tvar částic je ovlivněn typem výroby prášku. Snahou je dosažení kulovitého tvaru částic, pro zajištění dobré tekutosti a schopnosti vytvořit tenkou souvislou vrstvu prášku pro následné spečení laserem. Sférický tvar zrn obsahuje prášek vyrobený atomizací (rozstříkem) taveniny plynem. Vyrobený prášek se třídí v prosévacím zařízení do různých frakcí dle velikosti. Volba materiálu je závislá na plánované funkci vyrobené součásti. Součásti pro kosmonautiku a letecký průmysl jsou vyráběné z lehkých materiálů, jako jsou hliníkové, titanové prášky a jejich směsi. Biokompatibilní směsi prášků na bázi titanu, niklu, či cobalto-chromové prášky se velmi často využívají v lékařství na kostní a kloubové náhrady nebo různé implantáty.

Mezi materiály používanými metodou SLM jsou i velmi tvrdé materiály, které jsou konvenčními metodami těžko zpracovatelné. Jsou to hlavně materiály na bázi wolframu, nebo materiály s přidanými karbidy, boridy, atd.

4 ZÁVĚR

Celá práce je věnována aditivní výrobě součástí pomocí Selective Laser Melting a používaným materiálům. Obsahuje stručný přehled aditivních výrobních technologií, výroby práškových materiálů a jeho specifikace. Hlavní část práce představuje rešerše těchto práškových materiálů používaných při výrobě součástí metodou SLM, popis jejich vlastností a rozdělení do jednotlivých skupin dle chemického složení. Tato práce slouží jako ucelený přehled materiálů v současnosti využívaných pro výrobu dílů pomocí SLM.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PANDEY, P. M. *Rapid prototyping technologies, application and part deposition planning* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://web.iitd.ac.in/~pmpandey/MEL120_html/RP_document.pdf
- [2] 3D tisk- úvod. *14220.cz* [online]. 2012 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-uvod/>
- [3] VIJAY, P., P. DANAIHAH a K. V. D. RAJESH. Critical Parameters Effecting the Rapid Prototyping Surface Finish. *Journal of Mechanical Engineering and Automation* [online]. 2011, roč. 1, č. 1: 17-20 [cit. 2015-05-18]. ISSN 2163-2405. Dostupné z: <http://article.sapub.org/10.5923.j.jmea.20110101.03.html>
- [4] *Rapid prototyping: theory and practice*. New York: Springer, 2006, xxxiii, 323 s. Manufacturing systems engineering series. ISBN 9780387232904.
- [5] 10 Things You Need To Know Before Buying A 3D Printer. *Hongkiat* [online]. 2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.hongkiat.com/blog/things-know-buying-3d-printer/>
- [6] MakerBot Releases Three Things. *Fabbaloo* [online]. 2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.fabbaloo.com/blog/2013/10/3/makerbot-releases-three-things.html>
- [7] Ultimaker 2 3D Printer Review: Quality Worth the Price. *Tomsguide.com* [online]. 2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.tomsguide.com/us/ultimaker-2-3d-printer,review-2556.html>
- [8] HODEK, J. COMTES FHT. *Aditivní technologie* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.ctps.cz/cs/uvodni-stranka/soubor-aditivni-technologie/85/>
- [9] Stereolitografie. *3D-tisk.cz* [online]. 2014 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/stereolitografie/>
- [10] MELCHELS, Ferry P.W., Jan FEIJEN a Dirk W. GRIJPMAN. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials* [online]. 2010, roč. 24, č. 31: 6121-6130 [cit. 2015-05-18]. ISSN 01429612. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142961210005661>

- [11] Stereolithography (SLA). *Proto3000* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://proto3000.com/stereolithography-sla-services-rapid-prototyping.php>
- [12] Laminated Object Manufacturing. *Additive3d.com* [online]. 2012 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.additive3d.com/lom.htm>
- [13] Laminated Object Manufacturing (LOM). *Custompart.net* [online]. 2009 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
- [14] Fused Deposition Modeling (FDM). *Custompart.net* [online]. 2009 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [15] WEIWEI, He, Jia WENPENG, Liu HAIYAN, Tang HUIPING, Kang XINTING a Huang YU. Research on Preheating of Titanium Alloy Powder in Electron Beam Melting Technology. *Rare Metal Materials and Engineering* [online]. 2011, roč. 12, č. 40: 2072-2075 [cit. 2015-05-18]. ISSN 18755372. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875537212600149>
- [16] Electron Beam Melting. *Mechanical Engineering* [online]. 2012 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.mechanicalengineeringblog.com/1391-electron-beam-melting/>
- [17] MURR, Lawrence E., Edwin MARTINEZ, Krista N. AMATO, Sara M. GAYTAN, Jennifer HERNANDEZ, Diana A. RAMIREZ, Patrick W. SHINDO, Frank MEDINA a Ryan B. WICKER. Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2012, roč. 1, č. 1: 42-54 [cit. 2015-05-18]. ISSN 22387854. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2238785412700091>
- [18] Electron Beam Melting 3D printing & rapid prototyping services. *3D Printer Pro* [online]. 2014 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.3dprinterpro.com/electron-beam-melting-service/>
- [19] OLAKANMI, E.O. Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al–Mg, and Al–Si powders: Effect of processing conditions and powder properties. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2013, roč. 8, č 213: 1387-1405 [cit. 2015-05-15]. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401361300099X>

- [20] Nekonenční metody obrábění 9. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-9-dil.html>
- [21] STREEK, A., P. REGENFUSS, R. EBERT a H. EXNER. Laser micro sintering -a quality leap through improvement of powder packing. *Sffsymposium.engr.utexas.edu* [online]. 2008 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2008/2008-27-Streek.pdf>
- [22] Selective Laser Sintring. *Custompartnet.com* [online]. 2009 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
- [23] YADROITSEV, Igor. *Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders*. Saarbrücken: LAP Lambert, 2009, iv, 266 s. ISBN 978-3-8383-1794-6.
- [24] Selective Laser Melting. *TWI* [online]. 2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/additive-manufacturing/selective-laser-melting/>
- [25] Generative Manufacturing Methods: Selective Laser Melting. *Ipk Fraunhofer* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.ipk.fraunhofer.de/fileadmin/user_upload/IPK_FHG/publikationen/themenblaetter/ps_ft_selective_laser_melting_en.pdf
- [26] Near-infrared camera monitors selective laser melting process. *Vision Systems* [online]. 2011 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.vision-systems.com/articles/2011/10/near-infrared-camera-monitors-selective-laser-melting-process.html>
- [27] Selective Laser Melting (SLM). *Popular3dprinters.com* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.popular3dprinters.com/selective-laser-melting-slm/>
- [28] FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI. *Prášková metalurgie* [online]. 2006 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/praskova_metalurgie.pdf
- [29] SKOTNICOVÁ, Kateřina. *Prášková metalurgie: studijní opory: učební text, scénáře, testy* [online]. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, 153 s [cit. 2015-05-18]. ISBN 978-80-248-3378-1. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/03_Materialov%C3%A9_i_nzenyrstvi/06_Praskova_metalurgie/Skotnicova_Praskova_metalurgie.pdf

- [30] Product Knowledge. *Longding Heavy Machinery* [online]. 2014 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.made-in-ld.com/product-knowledge/jaw-crusher-working-principle.html>
- [31] Attritor Mill. *Indiamart.com* [online]. 2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.indiamart.com/msengg/attritor-mill.html>
- [32] Oxide dispersion strengthened (ODS) steels for nuclear applications. *Ipmd.net* [online]. 2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.ipmd.net/articles/001523.html>
- [33] LAGUTKIN, Stanislav, Lydia ACHELIS, Sheikhalı SHEIKHALIEV, Volker UHLENWINKEL a Vikas SRIVASTAVA. Atomization process for metal powder. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2004, roč. 1, č. 383: 1-6 [cit. 2015-05-18]. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509304002023>
- [34] DVOŘÁK, M. a M. MAREČKOVÁ. *Technologie tváření* [online]. 2006 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/technologie_tvareni/index.htm
- [35] Powder preparation. *Substech.com* [online]. 2012 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=powder_preparation&DokuWiki=380e24fbd7ee826e7e53c597471f711b
- [36] Powder Production. *Lpwtechnology.com* [online]. 2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.lpwtechnology.com/technical-information/powder-production/>
- [37] GERMAN, Randall M. *Powder Metallurgy Science*. 1994. ISBN 18-789-5442-3.
- [38] LAWLEY, Alan. *Atomization: the production of metal powders*. Princeton, N.J.: Metal Powder Industries Federation, 1992, 166 p. ISBN 18-789-5415-6.
- [39] Vibrační Separátory. *Russellfinex.com* [online]. 2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.russellfinex.cz/produkty/vibracni-separatory/>
- [40] Powder processes. *Thelibraryofmanufacturing.com* [online]. 2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://thelibraryofmanufacturing.com/powder_processes.html

- [41] Sharma, V. *Powder metallurgy*. [online]. Mechanical Engineering Department. FET. MITS: 2013 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/shunty12/5-powder-metallurgy>
- [42] LIU, Z.H., D.Q. ZHANG, S.L. SING, C.K. CHUA a L.E. LOH. Interfacial characterization of SLM parts in multi-material processing: Metallurgical diffusion between 316L stainless steel and C18400 copper alloy. *Materials Characterization* [online]. 2014, č. 94: 116-125 [cit. 2015-05-15]. ISSN 10445803. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1044580314001351>
- [43] LOUVIS, Eleftherios, Peter FOX a Christopher J. SUTCLIFFE. Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2011, roč. 2, č. 211: 275-284 [cit. 2015-05-15]. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013610003018>
- [44] FISCHER, P., V. ROMANO, H.P. WEBER, N.P. KARAPATIS, E. BOILLAT a R. GLARDON. Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd: YAG laser source. *Acta Materialia* [online]. 2003, roč. 6, č. 51: 1651-1662 [cit. 2015-05-15]. ISSN 13596454. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645402005670>
- [45] GU, Dongdong, Yves-Christian HAGEDORN, Wilhelm MEINERS, Guangbin MENG, Rui João Santos BATISTA, Konrad WISSENBACH a Reinhart POPRAWA. Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium. *Acta Materialia* [online]. 2012, roč. 9, č. 60: 3849-3860 [cit. 2015-05-15]. ISSN 13596454. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645412002522>
- [46] ATTAR, H., M. CALIN, L.C. ZHANG, S. SCUDINO a J. ECKERT. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2014, č. 593: 170-177 [cit. 2015-05-15]. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509313012665>
- [47] KHAN, M.; DICKENS, P. M. Processing parameters for Selective Laser Melting (SLM) of gold. In: Proceedings of Solid Freeform Fabrication symposium. 2008, pp. 278-289. Dostupné z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2008/2008-25-Khan.pdf>
- [48] KHAN, Mushtaq a Phill DICKENS. Selective Laser Melting (SLM) of pure gold. *Gold Bulletin* [online]. 2010, roč. 2, č. 43: 114-121 [cit. 2015-05-15]. ISSN 0017-1557. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF03214976>

- [49] ZHANG, Baicheng, Nour-Eddine FENINECHE, Lin ZHU, Hanlin LIAO a Christian CODDET. Studies of magnetic properties of permalloy (Fe–30%Ni) prepared by SLM technology. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2012, roč. 4, č. 324: 495-500 [cit. 2015-05-15]. ISSN 03048853. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304885311005932>
- [50] ZHANG, Baicheng, Nour-Eddine FENINECHE, Hanlin LIAO a Christian CODDET. Microstructure and Magnetic Properties of Fe–Ni Alloy Fabricated by Selective Laser Melting Fe/Ni Mixed Powders. *Journal of Materials Science* [online]. 2013, roč.8, č.29: 757-760 [cit. 2015-05-15]. ISSN 10050302. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1005030213001205>
- [51] WALKER, John C., et al. Fabrication of Fe–Cr–Al Oxide Dispersion Strengthened PM2000 Alloy Using Selective Laser Melting. *Advanced Engineering Materials*, 2009, roč. 11, č. 7: 541-546 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://eprints.soton.ac.uk/204955/1/manuscript2.pdf>
- [52] SONG, Bo, Shujuan DONG, Pierre CODDET, Genshu ZHOU, Sheng OUYANG, Hanlin LIAO a Christian CODDET. Microstructure and tensile behavior of hybrid nano-micro SiC reinforced iron matrix composites produced by selective laser melting: the origin, evolution, and impact of do moi. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2013. č. 579: 415-421 [cit. 2015-05-15]. ISSN 09258388. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838813014850>
- [53] PRASHANTH, K.G., S. SCUDINO, H.J. KLAUSS, K.B. SURREDDI, L. LÖBER, Z. WANG, A.K. CHAUBEY, U. KÜHN a J. ECKERT. Microstructure and mechanical properties of Al–12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2014, č. 590: 153-160 [cit. 2015-05-15]. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509313011180>
- [54] BRANDL, Erhard, Ulrike HECKENBERGER, Vitus HOLZINGER a Damien BUCHBINDER. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials* [online]. 2012. č. 34: 159-169 [cit. 2015-05-15]. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306911005590>

- [55] WEINGARTEN, Christian, Damien BUCHBINDER, Norbert PIRCH, Wilhelm MEINERS, Konrad WISSENBACH a Reinhart POPRAWE. Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2015, č. 221: 112-120 [cit. 2015-05-15]. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013615000564>
- [56] DADBAKHS, S., L. HAO, P.G.E. JERRARD a D.Z. ZHANG. Experimental investigation on selective laser melting behaviour and processing windows of in situ reacted Al/Fe₂O₃ powder mixture. *Powder Technology* [online]. 2012, č. 231: 112-121 [cit. 2015-05-15]. ISSN 00325910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032591012005438>
- [57] ZHENG, Lijing, Yingying LIU, Shaobo SUN a Hu ZHANG. Selective laser melting of Al–8.5Fe–1.3V–1.7Si alloy: Investigation on the resultant microstructure and hardness. *Chinese Journal of Aeronautics* [online]. 2015, roč. 2, č. 28: 564-569 [cit. 2015-05-15]. ISSN 10009361. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1000936115000357>
- [58] ABOULKHAIR, Nesma T., Nicola M. EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2014, roč. 1, č. 4: 77-86 [cit. 2015-05-15]. ISSN 22148604. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860414000062>
- [59] ZHANG, Baicheng, Jing CHEN a Christian CODDET. Microstructure and Transformation Behavior of in-situ Shape Memory Alloys by Selective Laser Melting Ti–Ni Mixed Powder: Temperature monitoring and microstructural evolution. *Journal of Materials Science* [online]. 2013, roč. 9, č. 29: 863-867 [cit. 2015-05-15]. ISSN 10050302. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1005030213001254>
- [60] YADROITSEV, I., P. KRAKHMALOV a I. YADROITSAVA. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy for biomedical applications: Temperature monitoring and microstructural evolution. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2014, č. 583: 404-409 [cit. 2015-05-15]. ISSN 09258388. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838813020689>

- [61] CHLEBUS, Edward, Bogumiła KUŹNICKA, Tomasz KURZYNOWSKI a Bogdan DYBAŁA. Microstructure and mechanical behaviour of Ti—6Al—7Nb alloy produced by selective laser melting. *Materials Characterization* [online]. 2011, roč. 5, č. 62: 488-495 [cit. 2015-05-15]. ISSN 10445803. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1044580311000568>
- [62] ATTAR, H., L. LÖBER, A. FUNK, M. CALIN, L.C. ZHANG, K.G. PRASHANTH, S. SCUDINO, Y.S. ZHANG a J. ECKERT. Mechanical behavior of porous commercially pure Ti and Ti—TiB composite materials manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2015, č. 625: 350-356 [cit. 2015-05-15]. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509314015366>
- [63] GU, Dongdong, Zhiyang WANG, Yifu SHEN, Qin LI a Yufang LI. In-situ TiC particle reinforced Ti—Al matrix composites: Powder preparation by mechanical alloying and Selective Laser Melting behavior. *Applied Surface Science* [online]. 2009, roč. 22, č. 255: 9230-9240 [cit. 2015-05-15]. ISSN 01694332. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433209009805>
- [64] KRAKHMALOV, P. a I. YADROITSEV. Microstructure and properties of intermetallic composite coatings fabricated by selective laser melting of Ti—SiC powder mixtures. *Intermetallics* [online]. 2014, č.46: 147-155 [cit. 2015-05-15]. ISSN 09669795. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0966979513003117>
- [65] DADBAKHS, Sasan, Mathew SPEIRS, Jean-Pierre KRUTH a Jan VAN HUMBEECK. Influence of SLM on shape memory and compression behaviour of NiTi scaffolds. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2015, [cit. 2015-05-15]. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850615000475>
- [66] SHISHKOVSKY, I., I. YADROITSEV a I. SMUROV. Direct Selective Laser Melting of Nitinol Powder. *Physics Procedia* [online]. 2012, č. 39: 447-454 [cit. 2015-05-13]. ISSN 18753892. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389212025874>
- [67] CARTER, Luke N., Christopher MARTIN, Philip J. WITHERS a Moataz M. ATTALLAH. The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2014, č. 615: 338-347 [cit. 2015-05-13]. ISSN 09258388. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092583881401528X>

- [68] AL JABBARI, Y.S., T. KOUTSOUKIS, X. BARMAGADAKI a S. ZINELIS. Metallurgical and interfacial characterization of PFM Co–Cr dental alloys fabricated via casting, milling or selective laser melting. *Dental Materials* [online]. 2014, roč. 4, č. 30: 79-88 [cit. 2015-05-13]. ISSN 01095641. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0109564114000207>
- [69] MAHDAVI, S. a S.R. ALLAHKARAM. Composition, characteristics and tribological behavior of Cr, Co–Cr and Co–Cr/TiO₂ nano-composite coatings electrodeposited from trivalent chromium based baths. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2015, č. 635: 150-157 [cit. 2015-05-13]. ISSN 09258388. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838815005599>
- [70] AKAICHI, Atsushi, SUYALATU, Takayuki NAKAMOTO, Natsuka JOKO, Naoyuki NOMURA, Yusuke TSUTSUMI, Satoshi MIGITA, Hisashi DOI, Shingo KUROSU, et al. Microstructures and mechanical properties of Co–29Cr–6Mo alloy fabricated by selective laser melting process for dental applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [online]. 2013, č. 21: 67-76 [cit. 2015-05-13]. ISSN 17516161. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751616113000362>
- [71] ZHANG, D.Q., Z.H. LIU, Q.Z. CAI, J.H. LIU a C.K. CHUA. Influence of Ni content on microstructure of W–Ni alloy produced by selective laser melting. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* [online]. 2014, č. 45: 15-22 [cit. 2015-05-13]. ISSN 02634368. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263436814000389>

6 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma postupu výroby modelu [1]	15
Obr. 2 Převod 3D modelu z CAD do STL [5]	16
Obr. 3 Ukázka podpůrné konstrukce [6]	16
Obr. 4 Princip vytvoření vrstev [6]	17
Obr. 5 Schodečkový efekt [2]	17
Obr. 6 Detail zhotoveného modelu [7]	17
Obr. 7 Princip Stereolitografie [11]	18
Obr. 8 Princip Laminated Object Manufacturing [13]	19
Obr. 9 Princip Fused Deposition Modeling[14]	20
Obr. 10 Princip Electron Beam Melting [16]	21
Obr. 11 Princip Selective Laser Sintering [22]	23
Obr. 12 Princip Selective Laser Melting [27]	24
Obr. 13 Princip čelistového drtiče [30]	26
Obr. 14 Princip attritoru [31]	26
Obr. 15 Struktura částic po mletí [32]	27
Obr. 16 Struktura částic po atomizaci plynem [31]	27
Obr. 17 Struktura částic po atomizaci vodou nebo atomizaci rotací [29]	28
Obr. 18 Princip atomizace vodou [35]	28
Obr. 19 Princip atomizace plynem [36]	29
Obr. 20 Princip atomizace odstředivou silou [37]	30
Obr. 21 Princip elektrolýzy [29]	31
Obr. 22 Dendritická struktura částic	31
Obr. 23 Srovnání struktur a tvaru částic prášku jednotlivých metod atomizace [38]	32
Obr. 24 Princip síťování [39]	33
Obr. 25 Histogram distribuce velikosti částic [29]	35
Obr. 26 Mikrostruktura ocelového prášku[43]	36
Obr. 27 A) Struktura hliníkového úlomku vyrobeného vzorku	37
Obr. 28 Struktura a tvar částic titanového prášku [48]	37
Obr. 29 Tvar a struktura částic zlatého prášku [49]	38
Obr. 30 Struktura materiálu a) Fe-Ni [50] b) Fe-SiC [52]	39
Obr. 31 Tvar a struktura prášku a) Al-Fe-V-Si [57] b) AlSi10Mg [58]	40
Obr. 32 Tvar a struktura prášku a) Ti-SiC [64] b) Ti-Al [63]	41
Obr. 33 Tvar a struktura částic Ni-Ti prášku [66]	42

7 SEZNAM TABULEK**7**

Tab. 1 Historie technologie Rapid Prototyping [1]	15
Tab. 2 Rozdělení dle hrubosti prášku a způsoby měření velikosti částic [29]	33
Tab. 3 Rozdělení částic podle vnějšího geometrického tvaru [41]	34