

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ  
PRÁCE**

**2024**

**Ješko  
Marian**



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ješko** Jméno: **Marian** Osobní číslo: **484130**  
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
 Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
 Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
 Specializace: **Bez specializace**

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Technologie výroby zkušebních těles metodou PBF**

Název diplomové práce anglicky:

**Technology of production of test specimens by the PBF method**

Pokyny pro vypracování:

Technologie aditivní výroby pro zpracování kovů.  
 Charakteristika procesu výroby dílu na tiskárně LB-PBF.  
 Bezpečnost práce na pracovišti LB-PBF.  
 Provedení časové studie přípravy výroby vzorků, stanovení spotřeby času v rámci jednotlivých úseků.  
 Návrh nástroje pro kalkulaci nákladů výroby s využitím technologie LB-PBF.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Libor Beránek, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **04.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2024**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.  
 Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

**Název**

Technologie výroby zkušebních těles metodou PBF

**Abstrakt**

Tato diplomová práce pojednává o problematice kovového 3D tisku. V teoretické části se práce zabývá popisem existujících technologií pro kovovou aditivní výrobu. Dále je uveden přehled užívaných materiálů a podrobněji popsána jejich výroba. Na závěr teoretické části je sepsán přehled bezpečnostních rizik a opatření vyskytujících se při 3D tisku. V praktické části se práce zabývá charakteristikou procesu LB-PBF a stanovením časové spotřeby jednotlivých úseků. Závěr práce je věnován kalkulaci nákladů technologie výroby metodou PBF.

**Klíčová slova**

3D tisk, Aditivní technologie, LB-PBF, Bezpečnost a zdraví, Proces výroby, Časová spotřeba, Kalkulace nákladů

**Title**

Technology of production of test specimens by the PBF method

**Abstract**

This thesis deals with the issue of metal 3D printing. The theoretical part of the thesis deals with the description of existing technologies for metal additive manufacturing. Furthermore, an overview of the materials used is given and their production is described in detail. At the end of the theoretical part, an overview of safety risks and precautions occurring in 3D printing is given. In the practical part, the thesis deals with the characterization of the LB-PBF process and the determination of the time consumption of each section. The conclusion of the work is devoted to the cost calculation of the production technology by PBF method.

**Keywords**

3D Printing, Additive Manufacturing, LB-PBF, Health & Safety, Production Process, Time Consumption, Costing

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne.....

.....

*podpis autora*

## **Poděkování**

V této části bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za jeho vedení a věcné rady, panu Ing. Janu Šimotovi za jeho pomoc při experimentu a panu Bc. Markovi Neckařovi za spolupráci na Projektu 3.

Dále bych chtěl velice poděkovat mé přítelkyni za její bezbřehou trpělivost a obrovskou podporu a celé mé rodině a přátelům, že to se mnou zvládli až do konce.

## Obsah

1. Úvod.....	10
1.1. Cíl práce .....	10
2. Historie.....	11
3. Kovový 3D tisk .....	14
3.1 Powder Bed Fusion.....	15
3.1.1 L-PBF.....	15
3.1.1.1 Výhody a nevýhody L-PBF.....	17
3.1.1.2 Procesní návaznost .....	19
3.1.2 Electron beam melting .....	20
3.2 Direct energy deposition.....	21
3.3 Binder Jetting .....	23
3.4 Laminated object manufacturing.....	24
3.5 Material extrusion of metals .....	26
4. Materiály v 3D tisku.....	29
4.1 Výroba práškových materiálů pro aditivní výrobu.....	30
4.1.1. Mechanické metody .....	30
4.1.1.1. Atomizace plynem.....	30
4.1.1.2. Atomizace vodou.....	31
4.1.1.3. Atomizace plazmou.....	31
4.1.1.4. Odstředivá atomizace .....	32
4.1.1.5. Mechanické drcení a mletí.....	32
4.1.2. Fyzikálně-chemické metody.....	33
4.1.2.1. Elektrolýza.....	33
4.1.2.2. Chemické proces .....	33
4.2. Ocel.....	34
4.3. Hliník a jeho slitiny .....	36
4.4. Titan a jeho slitiny.....	37
5. Bezpečnost a zdraví .....	39
5.1 Rizika spojená s práškem.....	39
5.1.1 Skladování prášku.....	40
5.1.2 Zdravotní a bezpečnostní rizika dle druhu prášku .....	40
5.1.2.1 Ocel .....	41
5.1.2.2 Hliníkové slitiny .....	41
5.1.2.3 Titanové slitiny.....	41

5.1.2.4	Kobalt.....	41
5.1.2.5	Měď.....	42
5.1.2.6	Nikl.....	42
5.1.3	Bezpečnostní opatření .....	42
5.2	Rizika spojená s tiskárnou .....	43
5.2.1.1	Nebezpečí od elektrické energie .....	43
5.2.1.2	Nebezpečí od pneumatické výbavy a přívodu inertního plynu.....	44
5.2.1.3	Nebezpečí exploze a požáru .....	44
5.2.1.4	Nebezpečí od laserového zařízení .....	45
5.2.1.5	Nebezpečí od mechanických částí .....	45
5.2.1.6	Nebezpečí od vysokých teplot.....	45
5.2.1.7	Všeobecná nebezpečí .....	46
6.	Proces výroby.....	47
6.1	Použitá tiskárna – Concept Laser M2 Cusing.....	47
6.2	Popis projektu.....	48
6.3	Charakteristika procesu.....	49
6.3.1.	Příprava tisku .....	51
6.3.2.	Tisk.....	53
6.3.3.	Postprocessing .....	53
6.3.4.	Čištění .....	55
6.4	Stanovení časové spotřeby jako základ pro technicko-ekonomické zhodnocení 59	
7.	Technicko-ekonomické zhodnocení procesu.....	65
7.1	Vstupní hodnoty.....	65
7.2	Kalkulace.....	71
8.	Recyklace.....	75
9.	Závěr.....	78
10.	Seznam zkratk.....	82
11.	Seznam jednotek.....	84
12.	Seznam tabulek.....	85
13.	Seznam obrázků a grafů.....	87
14.	Zdroje.....	89
15.	Seznam příloh.....	94
15.1.	Příloha 1 - Plakát bezpečnostních opatření při 3D tisku s kovovými materiály.	95



15.2.	Příloha 2 – Plakát s bezpečnostními riziky.....	96
15.3.	Příloha 3 – Náhled nástroje pro kalkulaci nákladů v MS Excel.....	97

# 1. Úvod

Trendem posledních dekad se stala oblast aditivních technologií. V porovnání s konvenčními technologiemi se jedná o stále poměrně novou, málo zmapovanou technologii. Důvodem atraktivnosti aditivních technologií je výroba velmi složitých tvarů s vysokým stupněm využití materiálu, takže najde své využití jako technologie výroby speciálních dílů, ať už v letectví, medicíně nebo zbrojním průmyslu. Aditivní technologie je skvělá pro malé a střední výroby, nicméně její značnou nevýhodou je, že při větších objemech nezvládne cenově konkurovat konvenčním technologiím. Aby bylo možné posoudit, zdali se aditivní výroba vyplatí, je třeba mít důkladně zmapovaný proces výroby a přesnou představu o nákladech vstupujících do procesu výroby.

## 1.1. Cíl práce

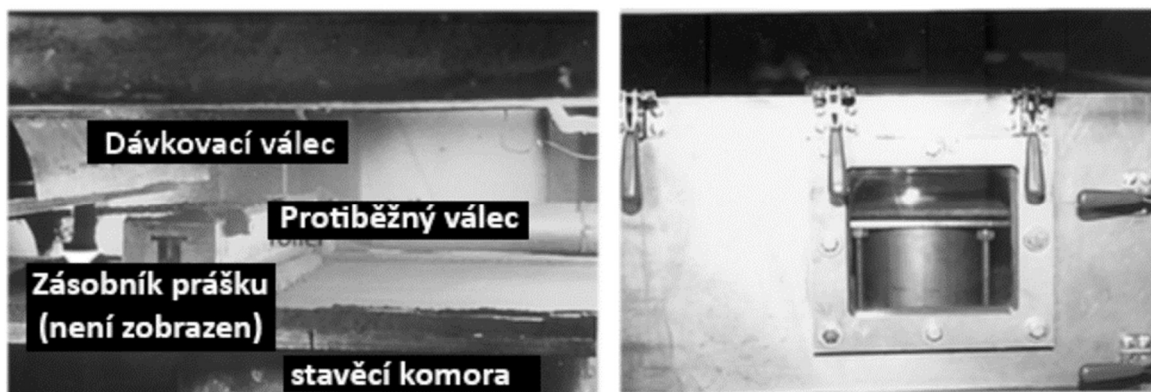
1. Představení využívaných aditivních technologií pro zpracování kovu
2. Bezpečnost práce na pracovišti LB-PBF
3. Charakteristika procesu výroby dílu na LB-PBF
4. Provedení časové studie přípravy výroby vzorku, stanovení spotřeby času v rámci jednotlivých úseků
5. Návrh nástroje pro kalkulaci nákladů výroby s využitím technologie LB-PBF

## 2. Historie

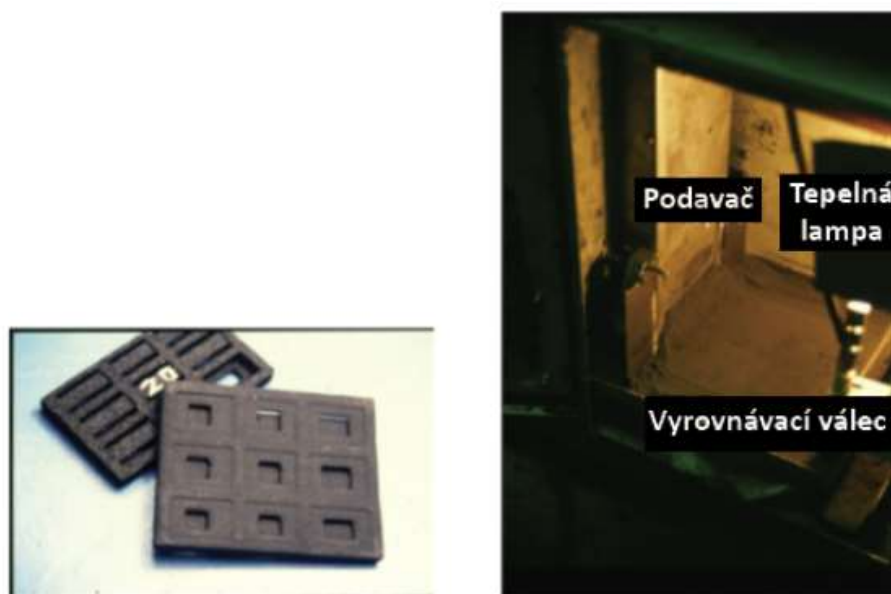
Myšlenka výroby trojrozměrných objektů pomocí kladení jednotlivých vrstev se poprvé objevila v roce 1952, kdy Dr. Hideo Kodama zvládl sestrojít první prototyp využívající fotosenzitivního resinu a UV světla. Ačkoliv mu nebyl schválen patent, je považován za jednoho z raných předchůdců aditivní technologie. Na další významnější pokrok si technologie musela počkat až do 80. let. V roce 1986 si zakladatel společnosti 3D systems Chuck Hull nechal patentovat zařízení, které by se dalo nazvat předchůdcem SLA. V roce 1987 se tento prototyp dostal na trh pod názvem SLA-1, čímž se stal prvním komerčně dostupným zařízením pro aditivní výrobu. [1]

O rok později si jistý Carl Deckard a Joe Beaman z Univerzity v Texasu patentovali technologii SLS. Technologie měla počátky v podobě malé, jednoduché krabičky naplněné práškovým polymerem a zařízení podobného solniče, kterému se později přezdívalo Betsy. Zařízení principiálně fungovalo tak, že laser vytvářel čtvercové vzory na povrchu prášku bez schopnosti vytvořit vrstvy či složitější geometrické útvary. V roce 1988 byla Betsy vylepšena o protiběžný vyrovnávací válec, podavač a tepelnou lampu. Tyto úpravy měly za následek celkové zlepšení kvality dílu. Ve stejném roce se Betsy dostalo publicity v *NY Times*, což týmu pomohlo při získávání financí na další výzkum. O rok později tedy došlo k vyvinutí druhé generace L-PBF systému pod názvem Bambi. U prototypu Bambi jsme se mohli setkat se spoustou charakteristik, které jsou dnes u L-PBF zařízení běžné. Oproti Betsy měl Bambi zásobník na prášek ovládaný pístem pro přesné dávkování a dávkovací válec. V roce 1990 byl Bambi vylepšen o systém podporující tisk kovových částí. Využitým materiálem pro první výtisky byla slitina mědi, olova a cínu.

Jako první se komerčně prodával DTM 125. Základem DTM 125 se stal výše popsaný prototyp Bambi. Výrazným zlepšením bylo přidání infračerveného teplotního senzoru, využívaného pro přesné ovládání teploty povrchu lože. Celkově se vyrobily čtyři kusy, které se nikdy neprodaly, přesto našly své uplatnění v zakázkové výrobě. [2]

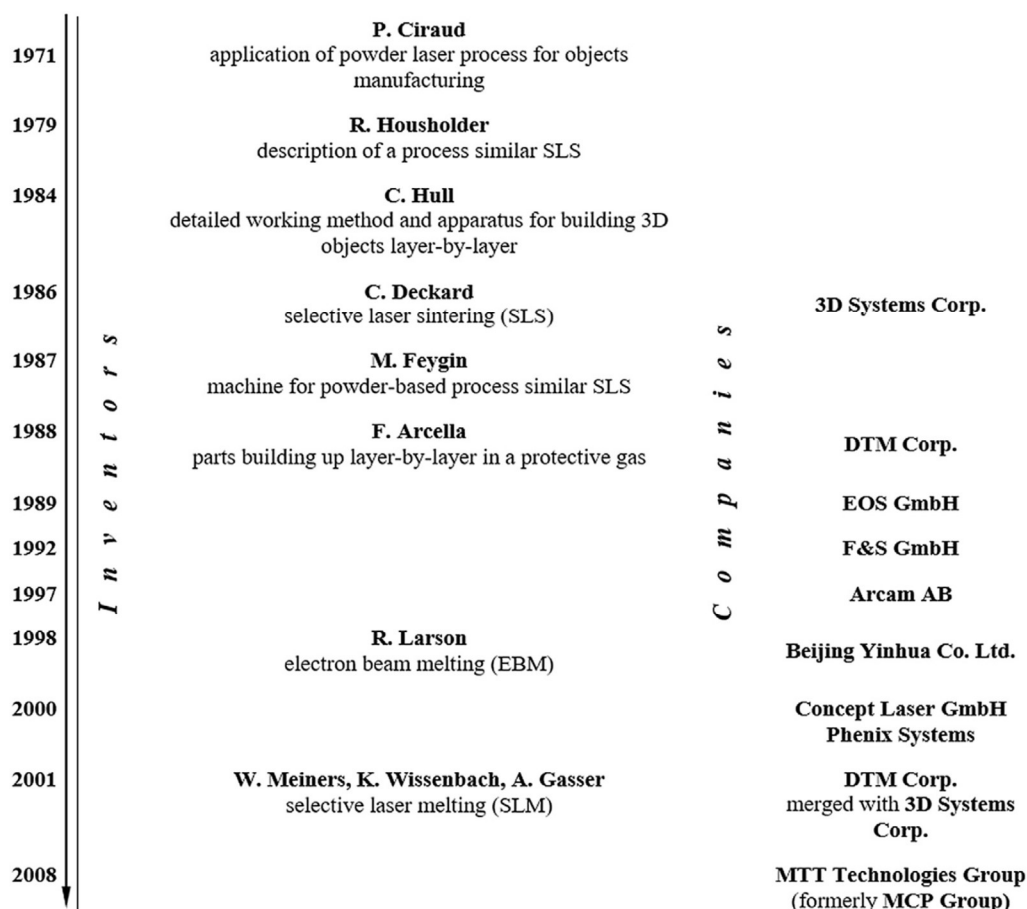


Obrázek 1 - Detail tiskárny Bambi [2]



Obrázek 2 - Tiskárna Betsy (vlevo) a její výtisky (vpravo) [2]

Souběžně s výzkumem v USA probíhal výzkum i na evropské půdě. V roce 1991 tým okolo Jeana-Pierra Krutha z KU Leuven v Belgii začal s vývojem své vlastní L-PBF tiskány s Nd:YAG laserem. V následujících letech provedli několik úspěšných tisků s ocelovým práškem, nicméně komerčního využití se dočkali až v roce 1994, kdy firma EOS z Německa uvedla na trh jejich EOSINT M160. Jelikož v té době bylo rozšířené využití CO<sub>2</sub> laserů, bylo třeba využít při tisku pojiv, jelikož docházelo ke zvýšení křehkosti výtisků. Toto se podařilo eliminovat firmě Fockele&Schwarze vyvinutím tzv. SLPR, který už využíval prášků bez pojiv. V roce 1999 se povedlo jednomu z průkopníků technologie Franku Herzogovi vytisknout první výtisk se 100% výplní. Po tomto úspěchu došlo k založení společnosti Concept Laser GmbH (dnes Colibrium Additive). S počátkem nového tisíciletí výzkum klade větší důraz na zlepšení kvality výsledných dílů a hlubšího pochopení procesu tisku, ať už pomocí zlepšení snímačů veličin, předehřevu práškového lože nebo zdrojů laserového záření. [3]



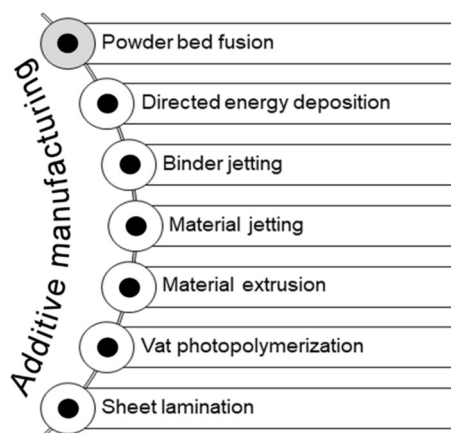
Obrázek 3 - Vybrané patenty AM [3]

### 3. Kovový 3D tisk

V oblasti aditivní výroby se můžeme setkat s celou řadou způsobů, jak požadovanou součást vyrobit. Pro tisk se využívají různorodé materiály, které mají různé typy atomových vazeb: kovové materiály jsou spojeny kovovými vazbami, polymerní jsou obvykle spojené kovalentními vazbami, keramické jsou spojeny iontovými a/nebo kovalentními vazbami a kompozitní mohou být spojeny všemi výše uvedenými. Mimo materiály je výchozí technologie závislá na podobě vstupního materiálu (prášek, resin, filament, drát apod.), tepelném zdroji (laser, elektronový paprsek, el. oblouk) či rozměrech požadovaného výtisku. Aby bylo možné udělat informované rozhodnutí, je třeba porozumět základním principům technologie a jejím výhodám a omezením. Tyto a další faktory budou popsány v následujících podkapitolách.

Rozdělení technologií aditivní výroby se řídí normou ISO/ASTM 52900:2015, která je dělí do 7 procesních kategorií:

- Powder bed fusion
- Directed energy deposition
- Binder jetting
- Material extrusion
- Material jetting
- Vat photopolymerization
- Sheet lamination



Obrázek 5 - Rozdělení AM technologií dle ISO ASTM 52900 [7]

Tato práce se zaměřuje na aditivní výrobu z kovových materiálů, kategorie zaměřující se na plastové materiály proto nebudou dále v textu zmíněny. [4–7]

## 3.1 Powder Bed Fusion

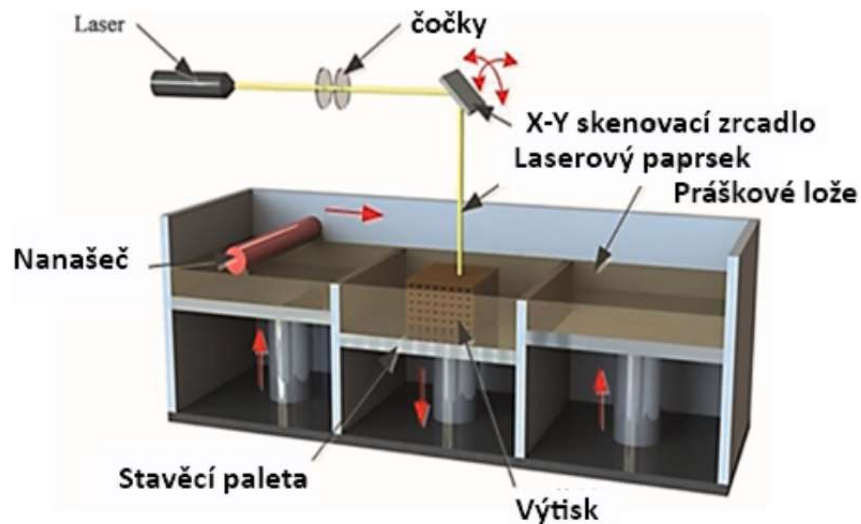
Technologie PBF neboli technologie práškového lože, nabízí vysoký stupeň svobody, co se týče výrobků se složitou vnější a vnitřní geometrií. Díky těmto charakteristikám je spolu s technologií DED za posledních 30 let nejvyužívanější aditivní technologií v oblasti tisku kovu. Jedná se tedy o metodu, kterou lze krátce popsat jako technologii, kdy dochází k rozprostření kovového prášku a jeho následného selektivního natavení. U PBF technologie se můžeme setkat s několika variantami rozdělenými dle zdroje energie používané k natavení materiálu, které jsou obvykle uvedeny v názvu technologie. Pro představu to může vypadat následovně: pro proces využívající laserového zdroje se před nebo za zkratku přidává písmeno L, tedy L-PBF či PBF-L. Setkat se můžeme i s variantou, kdy je L doplněné o písmeno B, které by v tomto případě znamenalo beam (paprsek). V případě procesu s elektronovým paprskem lze proces označit analogicky jako PBF-EB, který je známější pod označením EBM. Ten bude popsán v dalších kapitolách. [4, 6]

### 3.1.1 L-PBF

V literatuře se můžeme setkat s celou řadou označení L-PBF procesu. Nejčastěji to jsou označení SLM (selective laser melting), DMLS (direct metal laser sintering), laser cusing nebo LMF (laser metal fusion). Je nutné podotknout, že se jedná o různé komerční označení, nicméně jedná se o jeden a tentýž proces.

Výrobní proces je charakterizován fokusováním laserového paprsku na povrch práškového lože. Laser za sebou zanechává stopu natavením a následným ztuhnutím kovového prášku. Dá se říct, že tato stopa je základní strukturní jednotkou celého procesu. Když se tímto způsobem vytvoří více stop vedle sebe, vznikne souvislá vrstva a více vrstev vede ke vzniku trojrozměrného objektu. K natavení stopy dochází v místě kontaktu paprsku s povrchem kovového prášku. V tomto místě dochází k přenosu energie z laserového paprsku do prášku, čímž se iniciuje natavení. Natavené částice a substrát společně vytvoří taveninovou lázeň. Následné chladnutí stopy nastává ihned po odjetí laserového paprsku.

Chladnutí je závislé na použitém materiálu, zdroji energie a procesních parametrech. Po spojení celé vrstvy dochází k poklesu stavební palety a k povyjetí zásobní komory. Následně dochází k přejetí stavební palety nanašečem, který zde rozprostře další vrstvu kovového prášku, aby mohlo dojít k vytvoření další vrstvy. Je důležité zmínit, že vrstva prášku je vždy vyšší než výsledná natavená vrstva. Tuto skutečnost má na starosti tzv. overdose faktor, který mají dnešní tiskárny běžně zabudovaný v systému. Jelikož jsme už schopni odhadnout pomocí výpočetních modelů, o kolik více prášku musíme nanést na stavební paletu, aby nedocházelo k velké pórovitosti, tak jsme schopni vytisknout díly s téměř 100% hustotou. [4, 5]

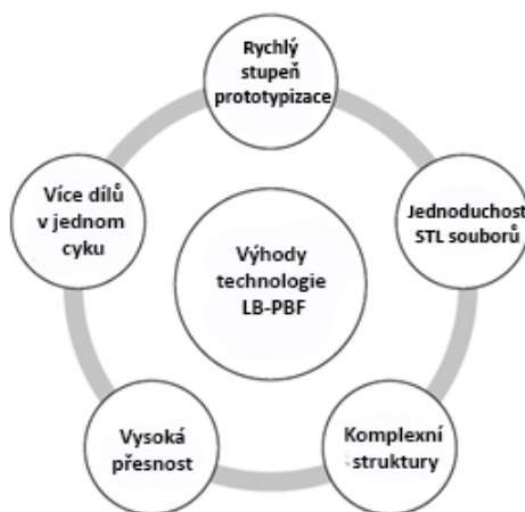


Obrázek 6 - Schéma L-PBF systému [8]



### 3.1.1.1 Výhody a nevýhody L-PBF

U powder bed fusion a aditivní technologie obecně je velké využití v prototypizaci. Aditivní technologie dokážou vyrobit i struktury, které by byly konvenčně velice složité, jako například latice struktury či chladič kanálky. Významnou výhodou je, že řízení laseru zprostředkovává systém magneticky řízených zrcadel. Zrcadla nahradila nutnost pohybovat celou laserovou optikou, což vedlo ke zvýšení přesnosti za vyšších rychlostí a odbourání nutnosti mít tiskárnu vybavenou mohutným mechanickým systémem. Tiskárny podporující PBF tisk jsou schopny tisknout velké množství dílů naráz, přičemž každý z dílů je možné tisknout jinou strategií. Díky tomu je možné zkoumat např. vliv různých parametrů tisku na pórovitost současně a není třeba připravovat dalších staveb, což by byla velice nákladná položka. Modernější tiskárny jsou dnes vybaveny vyhřívanou komorou, čímž se sníží teplotní gradient mezi práškem a paletou a omezí se teplotní pnutí, a dodávkou vysoce čistého inertního plynu, který je výhodný u tisku vysoce reaktivních materiálů. [5]



Obrázek 7 - Výhody L-PBF [5]

Jako každá technologie i aditivní technologie má své nevýhody. PBF je velice nákladná, a to jak cena stroje, tak cena materiálu, takže zatím není příliš dostupná široké veřejnosti. Toho si můžeme všimnout i na ceně jednotlivých dílů, které sahají mnohdy až k vyšším desítkám tisíc. Ruku v ruce jde s vysokou cenou materiálu i fakt, že je při tisku třeba využít velkého objemu materiálu, jelikož je třeba vyplnit práškem celý tiskový prostor, nejen oblast tisku (v případě

menších výtisků). Velikost tiskového prostoru rovněž omezuje maximální možnou velikost tisknutého dílu. Se zvyšujícím se objemem prášku se zvedá i bezpečnostní riziko. Každý prášek má určitá zdravotní rizika, a proto musí být zavedena jistá zdravotní opatření. Tato opatření jsou finančně i časově nákladná. Konkrétní rizika a opatření, která se využívají, jsou uvedena v páté kapitole. Do tisku kovu vstupuje celá řada faktorů: výkon laseru, tloušťka vrstvy, rychlost tisku, offset skeneru, ale i vnější faktory jako vlhkost vstupního materiálu, jestli je materiál nový či recyklovaný, jestli byla tiskárna důkladně vyčištěna před výměnou materiálu a mnoho dalších. V případě špatného nastavení některého z těchto faktorů může dojít k defektu. Obvykle se setkáváme s velkou porozitou, praskáním nebo anisotropií. Výše je uvedena schopnost technologie tisknout díly o téměř 100% hustotě. Ještě však nebylo zmíněno, že vyšší hustota prodlužuje dobu depozice. To může mít za následek prodloužení doby tisku až o několik dní. Ačkoliv PBF umožňuje tisk složitých geometrií, i zde má technologie své limity. Nelze například tisknout uzavřené dutiny, protože by odtud nešel dostat při post-processingu prášek. Dalším limitním faktorem je tisk dílů bez podpěr v případě strmějších stěn než 45°. Pak dochází ke ztrátě přesnosti a stability.



Obrázek 8 - Nevýhody L-PBF [5]

### 3.1.1.2 Procesní návaznost

Abychom byli schopni vyrobit nějaký díl, musíme postupovat dle předem určených kroků. Tento postup se u většiny aditivních technologií skládá ze stejných šesti kroků:

1. Vytvoření CAD modelu
2. Přenesení dat do STL formátu
3. Přípravení modelu k tisku
4. Příprava tiskárny
5. Vyjmutí dílu
6. Post-processing

Body 1-3 budou rozebrány níže, zatímco body 4-6 budou pouze nastíněny a podrobněji popsány v šesté kapitole.

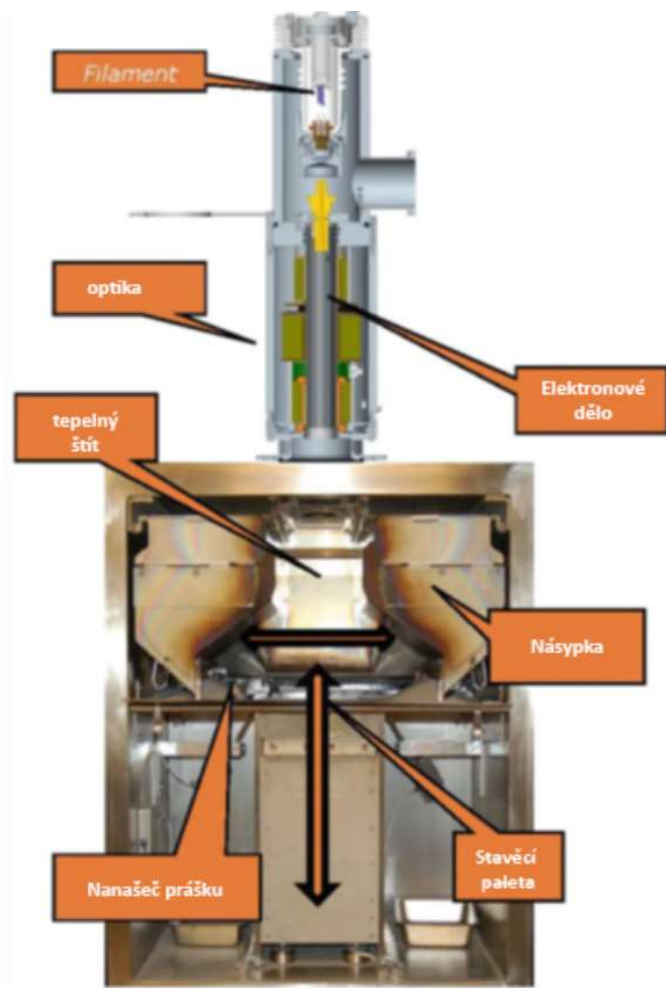
Jako i u konvenčních technologií je třeba si výrobek nejprve vizualizovat. K tomu nám slouží CAD programy (např. Solidworks, Creo, NX apod.). Při modelování dílu je dobré myslet na pravidla technologičnosti, protože nám to následující kroky značně usnadní. STL (stereolithography) je dnes standardně využívaný formát, do kterého se CAD model exportuje. Jedná se o formát, který generuje trojúhelníkovou síť na povrchu modelu a zachovává informace o tvaru modelu. To však může být v mnoha případech nedostačující, proto byl vyvinut formát AMF, který je nyní standardizovaný dle ASTM/ISO. Jedná se o formát, který obsahuje všechny chybějící informace ve formátu STL oproti CAD modelu. Konkrétně mluvíme o datech jako rozměry, barva, materiál, samozřejmě geometrie a další. Tato data se poté nahrají do programu (např. Materialise Magics), kde se následně vhodně zvolí orientace (vůči paletě a nanašeči) a podpěry. Podpěry mohou a nemusí být nutné v závislosti a geometrii a kontaktní ploše. Podpěry mohou také fungovat jako odvod tepla, čímž brání kroucení palety/výtisku v důsledku teplotních pnutí. Parametry tisku jsou obvykle doporučeny výrobcem stroje dle zvoleného materiálu. Některé programy podporují možnost si upravit tiskové parametry sám, ale pro to je již potřebná zkušenost uživatele. Přípravený model se poté pomocí sliceru rozdělí do vrstev v závislosti na zvolené tloušťce vrstvy. Tloušťka vrstvy se pohybuje obvykle mezi 25–100  $\mu\text{m}$ . Optimální výška je

napojená na rozměry částic v prášku a měla by být o něco větší, než je střední průměr částice. V případě, že je vrstva příliš vysoká, nemusí dojít k dostatečnému natavení.

Předtím, než se nahrají data do tiskárny, je třeba prostor pro stavbu připravit. Tato část, a k ní přidružené (obsluha stroje), budou podrobně charakterizovány v šesté kapitole. Obecně se jedná o plnění zásobní komory práškem, nastavení první vrstvy a spuštění tisku. Časově nejnáročnějším úsekem je samotný tisk, který se u plnějších palet pohybuje v řádech dní. Po tisku dochází k vyčištění palety a tiskárny od prášku a odsekání dílu od palety. Díly se poté mohou dát na tepelné zpracování, případně na obrobení. [6]

### 3.1.2 Electron beam melting

Jak již bylo výše uvedeno, rozlišujeme více variant pro PBF. EBM nebo také PBF-EB je jednou z těchto variant. Největším rozdílem mezi L-PBF a EBM je využití jiného zdroje tepelné energie. EBM využívá k roztavení částic elektronového paprsku ve vakuu. Využití elektronů odlišuje proces od L-PBF a přináší spolu jak výhody, tak nevýhody. Elektronový paprsek může být fokusován pomocí elektromagnetických čoček, díky čemuž jsou elektrony schopny dosáhnout rychlosti až  $8000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , což umožňuje mnohem vyšší rychlost tisku v porovnání s laserovým paprskem. Na druhou stranu je potřeba mít v prostoru tisku vakuum a hrozí zde vznik elektrostatického výboje, který může narušit stabilitu procesu. Je také možné tisknout pouze elektricky vodivé materiály, tzn. kovy a slitiny. Tiskárna se skládá z elektronového děla, vakuové komory s práškovým ložem a systémem elektromagnetických čoček. Proces začíná zahřátím wolframového drátu, který emituje elektrony za vysokého napětí. Elektrony jsou pak fokusovány pomocí elektromagnetických čoček na povrch kovového prášku, kde dojde k natavení a spojení prášku za zvýšené teploty (kvůli potlačení vnitřního pnutí). Po tisku nastává asistované chlazení v heliu, které může trvat až šest hodin. Vakuum umožňuje tisk vysoce reaktivních materiálů jako je titan, ale také Inco 718 nebo kobaltové slitiny. Technologie EBM je monopolizována švédskou firmou Arcam AB (později koupena společností Colibrium additive), přičemž nabízí tisk v odvětvích jako je letectví nebo lékařství. [6, 8, 9]

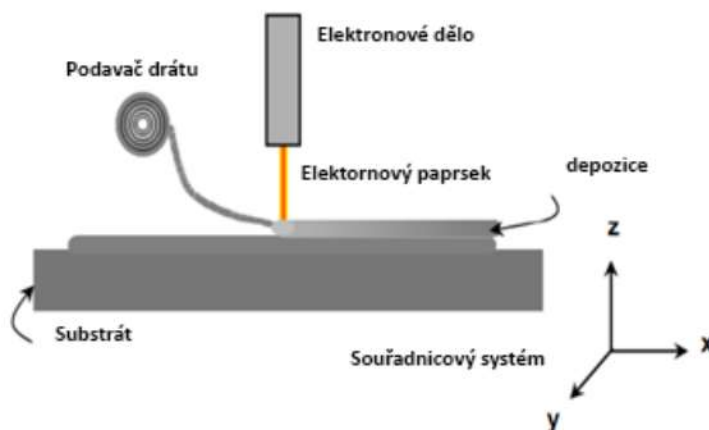


Obrázek 9 - Schéma EBM systému [6]

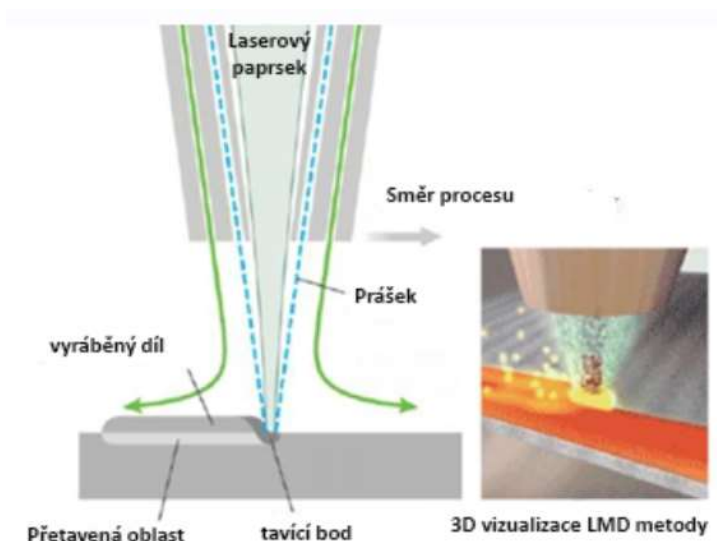
### 3.2 Direct energy deposition

Technologie DED (v překladu přímého energetického nanášení) popisuje procesy, kdy dochází k nanášení surového materiálu přímo do místa depozice a místa směřování energie. Dle nejvíce využívaných typů procesů rozdělujeme DED na procesy LENS, EBF3 nebo WAAM. Principiálně se jedná o velice podobné procesy s využitím jiného zdroje energie, využitím materiálu v jiné podobě a využitím jiného pracovního prostředí. Stejně jako u předchozích technologií se zde setkáme s využitím laserového a elektronového paprsku, případně plazmy a elektrického oblouku. Mimo kovových prášků se můžeme setkat i s materiály v podobě drátu. V případě využití elektronového paprsku nebo reaktivních materiálů je třeba využití inertních atmosfér, respektive vakua v případě EBAM. DED je schopno nanést velké množství materiálu za velmi krátkou dobu: od 0,5

$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$  až po  $10 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  v závislosti na použité technologii. V případě LENS je laser fokusován na místo, kam je přiváděn prášek v surovém stavu. Jak laser, tak prášek jsou vedeny ze stejné nástrojové hlavy na tiskovou plochu. V místě kontaktu vzniká taveninová lázeň, do které lze metalurgicky přidávat další materiál. Pohybem nástrojové hlavy, potažmo taveninové lázně, lze vyrobit kompletní kovový dílec. Na podobném principu funguje technologie WAAM, kdy místo prášku využívá systém kovový drát. Taveninová lázeň v tomto případě vzniká pomocí elektrického oblouku. Jedná se v podstatě o automatizovaný svářecí proces MIG. Svařovací hlava sleduje předem nakonfigurovanou cestu z 3D modelu a zanechává za sebou svarovou housenku. EBF3 využívá elektronového paprsku a stavba probíhá pod vysokým vakuem. Tento proces byl vyvinut společností NASA a jedná se o technologii využívanou pro vesmírné aplikace. Jedná se o kombinaci obou předchozích technologií, kdy je materiál v podobě drátu veden na tiskovou plochu, kde ho natavuje elektronový paprsek. Výše uvedené technologie spadají pod tzv. Direct-write technologii, kdy je materiál veden lokálně kontinuálním směřováním energie a materiálu do stejného místa. S DED technologií se často můžeme setkat u hybridních strojů. Mezi výhody DED patří široké spektrum využitelných materiálů, možnost kombinovat různé materiály, velká rychlost nanášení, v porovnání s PBF výrazně větší rozměry výtisků a možnost tisku na ne horizontálních površích. DED je také užitečné pro vyplňování prasklin a děr a obecně se jedná o vhodnou technologii pro opravu dražších kovových částí. [6, 10–12]



Obrázek 10 - Schéma EBF3 [12]



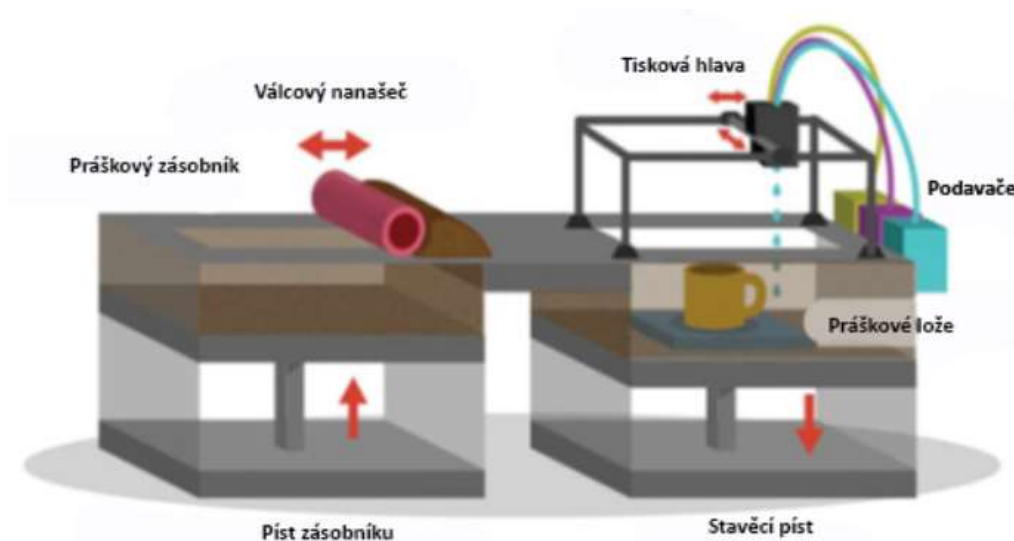
Obrázek 11- Schéma LENS [11]

### 3.3 Binder Jetting

Binder Jetting je velice přesná technologie kovové výroby. Jedná se o technologii principiálně blízkou technologii PBF – obě technologie vyrábí díl za pomoci práškové vany. Nicméně rozdíl spočívá v samotném vytváření jednotlivých vrstev. Materiál se nenatavuje, nýbrž je spojován kapalným pojivem. Na rozdíl od technologií využívajících energetický paprsek je možné zpracovávat kovy s vysokou optickou odrazivostí, tepelnou vodivostí a nízkou tepelnou stabilitou. Rovněž nejsou při procesu třeba podpurné struktury, ani pro odvod tepla, ani pro podporu převisů, jelikož je díl podpořený okolními částicemi. Tisk probíhá při pokojové teplotě, čímž umožňuje využití celé škály materiálů jako např. polymer, kov nebo keramika. Proces probíhá tak, že se na tiskovou plochu nanese vrstva prášku, na kterou je poté selektivně nanášeno pojivo, které volné práškové částice spojí. Takto připravená vrstva pomocí pístu sjede o velikost vrstvy dolů a celý proces se opakuje, dokud nevznikne požadovaný tvar. Takto vytvořená část se nazývá tzv. green part neboli zelený díl. Po vytištění musí být díl oddělen od volného prášku. Některá pojiva však vyžadují před vyjmutím z prášku post-processing, aby dosáhla adekvátní pevnosti. Na základě chemického složení pojiva se volí další postup, jako sušení, tepelné vytvrzení, případně redukce pojiv založených na soli. Nejčastěji se celá tisková podložka vsune do pece, kde dojde k odstranění zbytkového pojiva a může dojít k iniciaci dalších vytvrzujících reakcí.

V případě potřeby lze ještě použít vytvrzování pomocí UV světla, vakua, tlaku a další. Čištění volného prášku může být velice obtížné, jelikož nestačí pouhé ometení štětcem. Pro dostatečné očištění se celý výtisk vloží do rozpouštědla nebo ultrasonického čističe. Takto vyčištěný díl se označuje jako brown part neboli hnědý díl. Po vyčištění následuje sintrování, které z chemických vazeb tvoří vazby mechanické. Sintrování slouží ke zvýšení pevnosti a hustoty, jelikož hustota výtisku před sintrováním je obvykle mezi 50-60 %. Díky sintrování jsme schopni dosáhnout teoretické hustoty <99 %.

BJ je velice flexibilní metoda, která našla uplatnění v lékařství, elektronice či slévárenství. V dnešní době se využívá pro tisk odlévacích forem a jader, a to díky vyšší porositě, která formám umožňuje odvádět plyn. Při vyšších objemech výroby je BJ oproti konvenčním metodám dražší, ale při středních a nižších objemech už se ve výrobě vyplatí. [6, 13, 14]



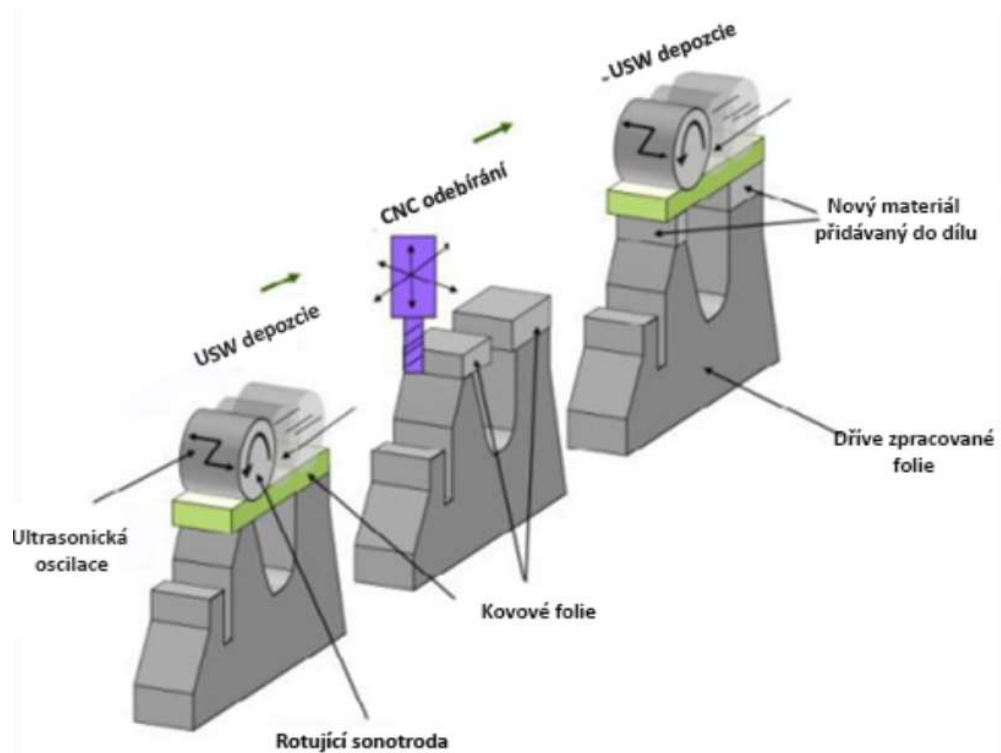
Obrázek 12 - Schéma BJ [6]

### 3.4 Laminated object manufacturing

LOM je jednou z prvních komerčně dostupných metod aditivní výroby, která je založena na řezání a laminování vrstev. Jednotlivé vrstvy jsou přesně nařezány pomocí rezného kotouče či laseru a poté jsou spojeny metodou form-then-bond



(proces, kdy se vrstvy nařezou na požadovaný tvar dříve, než se spojí) anebo opačně bond-then-form (proces, kdy jsou vrstvy spojeny předtím, než se nařezou do požadovaného tvaru). Form-then-bond metoda je užitečná při tepelném spojování keramických a kovových materiálů. Rovněž usnadňuje konstrukci vnitřních struktur odstraněním přebytečného materiálu. Odříznutý materiál slouží jako podpěra a po dokončení procesu jej lze odstranit a recyklovat. Pro LOM lze využít celou řadu materiálu přes kompozity, keramiku, papír až po pláty s kovou výplní. Speciální podkategorií LOMu je technologie UAM (ultrasonic additive manufacturing). Technologie postupně spojuje kovové folie, zatímco kombinuje ultrazvukové svařování a CNC frézování během laminovacího procesu. Jedná se tedy o hybridní technologii kombinující aditivní a subtraktivní výrobu. V současné době se jedná o jedinou metodu aditivní technologie, která je schopná výroby kovových dílů za nízkých teplot (obvykle <50 % teploty tání kovu). Kombinace těchto technologií umožňuje řadu unikátních výrobních procesů, jako například spojování tepelně a mechanicky nesourodých materiálů a možnost vkládání funkčních komponentů mezi jednotlivé vrstvy fólie. Možnost vkládat komponenty mezi vrstvy umožňuje efekt akustického změkčování, ke kterému dochází právě při ultrazvukovém zpracování. Proces začíná upevněním kovové fólie na tiskovou podložku. Celá podložka se poté protáhne pod sonotrodou, čímž dojde, pomocí vysokofrekvenčního svařování, ke spojení fólie s podložkou. Tento proces se opakuje, dokud výška vrstev nedosáhne potřebné výšky. Zde přichází na řadu CNC stroj, který odebere přebytečný materiál a začne udávat výsledný tvar dílu. Proces se opakuje, dokud není díl hotov. V porovnání s jinými aditivními technologiemi má UAM výhodu v tom, že dokáže dělat jinak nemyslitelné dutiny, jelikož není limitována nutností podpor nebo případným zbavením se kovového prášku. Jelikož nespojuje materiály za vysoké teploty, nedochází ke změně struktury, a tudíž je možné spojovat vícero různých materiálů. Jak je již výše zmíněno, je možné vkládat komponenty mezi vrstvy, to znamená, že lze do konečných dílů vkládat citlivé senzory a obvody, což je u jiných technologií téměř nemožné. Vzhledem k možnosti spojovat různé materiály má UAM velké uplatnění v letectví a automobilovém průmyslu, ale také v elektronickém průmyslu s chytrými zařízeními a lékařství. [15–17]



Obrázek 13 - Schéma UAM [15]

### 3.5 Material extrusion of metals

Aditivní technologie založená na extruzi je v porovnání s ostatními relativně levná a přímočará. Jedná se o proces selektivního dávkování materiálu tryskou nebo otvorem. Pomocí extruze lze zpracovávat termoplasty, kompozity, keramiku a kovy. Extruze je nízkošpatový proces, který je vhodný pro tisk materiálů s homogenní strukturou, avšak výroba kovových dílů je stále značnou výzvou. MEX se vyznačuje levným vybavením, jednoduchostí a bezpečností. Nedochozí k volnému pohybu kovového prášku, čímž se značně snižují bezpečnostní rizika, a zároveň se nevyužívají vysokoenergetické zdroje. Díky těmto vlastnostem přitáhl MEX v posledních 10 letech značnou pozornost. Značnou zásluhu na tom má také popularizace FDM tisku polymerů. Proces začíná zahřátím vstupního materiálu složeného z kovového prášku a polymerního pojiva. Při změknutí materiálu je tlačeno skrz tiskovou trysku. Následně se materiál nanese na zahřátou tiskovou podložku, kde se vrstvu po vrstvě vytváří, dle CAD modelu, výsledný díl. Tímto způsobem lze také vytvářet díly z více materiálů za předpokladu, že má tiskárna

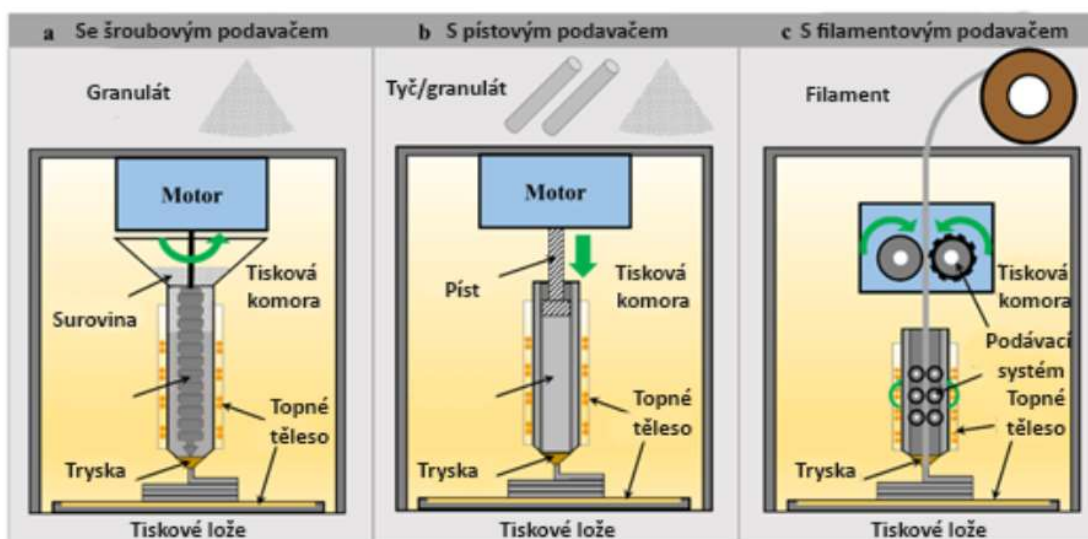
více tiskových hlav nebo podávací systém. V závislosti na podávacím systému lze technologii rozdělit na tři typy: šroubový, pístový a filamentový. Po vytištění je třeba díly zbavit pojiva a následně sintrovat.

Filamenty jsou v sortimentu slitin stále velice omezené, proto se v současné době využívá primárně šroubový podávací systém. Šroubový MEX využívá kovového granulátu. Granulát se pomocí rotačního pohybu šneku a topných těles dopraví k trysce, kde se pokračuje dle procesu popsaného výše. Granulát se nahřívá na teplotu vyšší, než je teplota skelného přechodu polymerních pojiv. Výhodou tohoto typu podavače je, že se oproti dalším dvěma jedná o kontinuální plnicí systém, což vede ke zkrácení doby tisku, a zároveň odpadá nutnost kroku zpracování tyčí či filamentů. Vstupní materiál se musí kontrolovat, aby splňoval rozměrové požadavky <5 mm a aby byla zajištěná stálost procesu. V případě velkých granulí může dojít ke špatnému změkčení či může dojít ke vzpříčení v podávacím systému, což může vést ke vzniku vad ve výsledném dílu. Výhodou však je, že takovýto díl je možné rozdrtit a znovu použít.

Pístový systém využívá vstupní materiál ve tvaru tyčí, případně je možné využít i granulátu. Tyč je tlačena k trysce vyhřívaným pouzdrem, kde je protlačena tryskou a materiál je nanášen na podložku. Jednou z předností tohoto systému je lepší manipulace s materiálem oproti např. filamentu. Nevýhodou je dodatečný krok přípravy tyčí. Tyče se vyrábí stlačením kovového prášku a přidáním polymerního pojiva a následným nařezáním na požadovanou velikost. Další nevýhodou je, že dochází k přerušování procesu tisku, když je třeba doplnit další tyč.

FDM nebo FFF je zkratka označující procesy využívající filament. Jedná se o jednu z nejrozšířenějších aditivních technologií vůbec. Zpočátku se tento proces využíval pro rychlou prototypizaci, v současné době se daří vyrábět díly pro koncové uživatele. Kovový filament je, podobně jako tyč u pístového systému, vyroben z kovového prášku a polymerního pojiva. Filament je veden pomocí extruderu k topnému tělesu, kde dojde ke změknutí a protlačení tryskou. Následně pokračuje v tisku. Výhodou tohoto procesu je, že lze využít dostupných tiskáren pro termoplastické materiály a proces je už relativně dobře zmapovaný a bezpečný. Aby to však nebylo tak jednoduché, nelze využívat tiskárnu ve stejné podobě jako pro tisk termoplastů. Filamenty s vyšším podílem kovu mají za

následek vyšší míru opotřebení trysky, proto je třeba použít rubínové nebo trysky z kalené oceli, čímž se stabilizuje tok materiálu a prodlouží životnost trysky. Značná nevýhoda je nutnost výroby filamentu, jenž vyžaduje speciální výrobní zařízení a know-how. Vlastnosti filamentu jsou velmi důležité pro konečné vlastnosti dílu, proto je důležité zvolit vhodná pojiva, která požadované vlastnosti zajistí. Požadavky na filament jsou následující: měl by mít vysokou pevnost a tuhost, aby nedošlo k jeho přetržení a změně tvaru při průchodu extruderem. Také by měl být dostatečně ohebný, aby při manipulaci a navíjení nedošlo k jeho poškození. [18, 19]



Obrázek 14 - a) šroubový podavač b) pístový podavač c) filamentový podavač [19]

## 4. Materiály v 3D tisku

Jedním z hlavních důvodů, proč se aditivní technologie zabývají tiskem kovů, jsou obory letectví, lékařství a zubní lékařství. S ohledem na tyto obory se výzkum více zaměřil na titanové, niklové, hliníkové slitiny a slitiny železa, hlavně pak na nerezovou ocel.

Kovové biomedicínské materiály jsou obecně známé pro svou dobrou korozní odolnost a dobré mechanické vlastnosti. Hojně se využívají pro zubní implantáty a při ortopedických zákrocích, nevýhodou však je, že u těchto aplikací může nastat tzv. stress-shielding, kdy dochází ke snížení hustoty kosti vlivem odstranění napětí z kosti implantátem, což vzniká jako důsledek rozdílu modulů pružnosti mezi kostí a implantátem. S ohledem na tento fakt se začalo využívat pórovitých implantátů, které mají modul pružnosti nižší než „plné“ implantáty. Pórovitost rovněž usnadňuje zarůstání kosti do implantátu, čímž zpevňuje vazbu tkání kosti a implantátu. Toto jsou hlavní důvody, proč se začaly využívat aditivní technologie pro tisk kovových biomateriálů. Tisk nedegradovatelných materiálů, jako je titan nebo slitiny kobaltu a chromu, byl obrovský pokrok pro klinické aplikace, naopak tisk biodegradabilních materiálů, jako je zinek, železo nebo hořčík, je stále velice nerozvinutý. Jedním z důvodů je, že při tisku vysokoenergetickými paprsky dochází k vypaření prvku a ztrátě porozity.

Dalším průmyslem, který převzal aditivní technologii, je letecký průmysl. Oproti lékařství je letectví výrazně opatrnější, co se týče aplikačních možností. Jedním z důvodů jsou obavy o kvalitu dílů vyrobených aditivní technologií. Obvykle uváděná výhoda možnosti tisku složitých geometrií je v tomto případě zdrojem defektů. Studie [20] ukázala, že při mechanických zkouškách více jak 1000 identických vzorků vyrobených metodou L-PBF, došlo k defektu u 2 % vzorků. Tyto defekty měly vliv na celkové mechanické vlastnosti a zabránily většímu přijetí aditivní výroby do doby, než bude možné zaručit, že tyto defekty nevzniknou. [21]

V následujících kapitolách budou představeny metody výroby prášků a nejběžnější typy používaných materiálů v aditivní výrobě.

## 4.1 Výroba práškových materiálů pro aditivní výrobu

V současné době existuje celá řada technologií pro masovou výrobu kovového prášku. Ne všechny jsou však v současné době vhodné k použití pro aditivní výrobu. Jedním z hlavních požadavků pro použití kovových prášků v aditivní technologii a obdržení spolehlivých a opakujících se výsledků, je tvar částic, respektive jejich kulovitost. Některé technologie jsou schopny vytvořit kulovitý tvar ihned po vytvoření prášku, některé však vyžadují další procesy. Tyto technologie můžeme obecně rozdělit na dvě kategorie: fyzikálně-chemické a mechanické. Fyzikálně-chemické metody jsou spojeny s fyzikální a chemickou přeměnou, změnou struktury a chemické kompozice a výrazně se liší od vstupního materiálu. Mechanické metody zahrnují celou řadu vrtacích procesů a disperzi pomocí trysek známé pod pojmem atomizace.

### 4.1.1. Mechanické metody

Atomizace je jednou z nejrozšířenějších metod výroby kovových prášků pro účely aditivní technologie. Rozlišujeme hned několik způsobů atomizace: atomizace plynem, která je principiálně podobná atomizaci vodou, dále atomizaci plazmou, známou také jako rotační elektrodová atomizace, a odstředivou atomizaci.

Hlavní princip atomizace spočívá v disperzi tekutého kovu za pomoci plynu, proudu vody, plazmy apod. Během kontaktu dochází k rozdělení tekutého kovu na malé kapky, které okamžitě po nárazu začínají krystalizovat.

#### 4.1.1.1. *Atomizace plynem*

Jedná se o hlavní způsob výroby kovového prášku. Proces se skládá ze tří hlavních kroků: roztavení, atomizace a tuhnutí. Plynové atomizéry jsou obvykle vybaveny pecí pro tavení ve vakuu nebo v ochranné atmosféře inertního plynu. Prášky vyrobené plynovou atomizací mají kulovitý tvar, vysokou čistotu a mají jemnou homogenní strukturu.

Při atomizaci plynem se můžeme setkat se dvěma obvyklými modifikacemi. Jedná se o modifikace VIGA (vacuum inert gas atomization) a EIGA (electrode induction gas atomization). VIGA je nejvíce používaný systém pro výrobu z nereaktivních kovů a jejich slitin. EIGA je systém používaný pro výrobu prášků

z vysokoreaktivních materiálů a jejich slitin, jako je třeba titan. Méně známou modifikací je například PIGA (plasma inert gas atomization). PIGA využívá místo indukčního tavení plazmový hořák a vodou chlazený měděný kelímek. PIGA se využívá pro výrobu nekeramických a reaktivních materiálů s vysokým bodem tavení.

Jak je výše uvedeno, prášek vyrobený plynovou atomizací má kulovitý nebo téměř kulovitý tvar, který je vhodný pro využití v aditivní technologii. Nicméně velikost částic je výrazně ovlivněna použitým materiálem a je dobré na to při aplikaci myslet. Velikost se obvykle pohybuje mezi 0-500  $\mu\text{m}$ .

#### *4.1.1.2. Atomizace vodou*

Atomizace vodou je podobná atomizaci plynem s tím rozdílem, že k disperzi využívá vysokotlaký proud vody. Atomizace vodou se používá hlavně pro výrobu z nereaktivních materiálů jako je ocel. S ohledem na vysokou rychlost ochlazování v porovnání s atomizací plynem, dochází ke vzniku nepravidelných tvarů. Prášky vyrobené atomizací vodou mají rovněž vyšší obsah oxidů. Hlavní důvod využívání atomizace vodou je jeho nižší cena v porovnání s ostatními typy atomizací. Naopak mezi hlavní nevýhody patří nižší čistota, hlavně u kovů, které mají tendenci k oxidování.

#### *4.1.1.3. Atomizace plazmou*

Jedná se o proces, který se využívá k výrobě prášků o vysoké čistotě a k výrobě reaktivních materiálů s vysokým bodem tavení, jako je titan, zirkonium apod. Atomizace plazmou umožňuje produkci velmi jemného prášku s vysoce symetrickými kulovitými částicemi a nízkým obsahem kyslíku. Na rozdíl od předchozích metod je u atomizace plazmou vstupní materiál ve formě drátu. Podavač drátu jej vede přímo do plazmového hořáku, který rozfukuje drát do kapek, které poté tuhnou ve formě prášku. Velikost částic se pohybuje v rozmezí od 0-200  $\mu\text{m}$ . Využití drátu má mnohé výhody v porovnání s tekutým kovem. Největší výhodou je, že vstupní materiál (tavenina) nepřichází do kontaktu se studenými stěnami atomizační komory. Je to jeden z faktorů, proč se pomocí plazmové atomizace daří vytvářet prášky o vysoké čistotě. Prvním krokem v produkci prášku je nastavení rychlosti podávání drátu, které má vliv na distribuci velikosti částic. Jako ohřívací a atomizační médium se používá argon. Plyn se místo

studeného používá horký, protože zabraňuje tuhnutí částic v nepravidelných tvarech. Využití plazmy umožňuje dosažení vysokých teplot, což také napomáhá tvorbě sférických útvarů. Výsledný prášek se ještě pasivuje, aby bylo možné s ním bezpečně manipulovat.

Samozřejmě i tato metoda má svá omezení. Vstupní materiál musí být dostatečně flexibilní, aby byl schopný projít podavačem, takže je nemožné atomizovat materiály, ze kterých nejdou vyrobit dráty.

#### 4.1.1.4. *Odstředivá atomizace*

V praxi se setkáváme se dvěma metodami odstředivé atomizace. První je proces využívající rotace elektrody zkráceně REP. Jedná se o metodu, kdy kovová elektroda rotuje za vysoké rychlosti a volný konec je taven pomocí elektrického oblouku, který vzniká mezi kovovou elektrodou a wolframovou elektrodou. V případě, že se jedná o plazmový oblouk, mluvíme o procesu PREP. PREP se využívá pro vysoce reaktivní materiály, přičemž tavení elektrody probíhá v inertní atmosféře. Částice prášku vyrobené touto metodou mají symetrický tvar a vysokou kvalitou povrchu. Velikost částic se pohybuje v rozmezí 50-400  $\mu\text{m}$ . Nevýhodou metody je kromě vysoké ceny i limit rychlosti, kvůli které je medián velikosti částic mezi 50-150  $\mu\text{m}$ . Druhá metoda odstředivé atomizace probíhá tak, že roztavený proud kovu dopadá na rotační disk nebo kužel, který vlivem odstředivé síly rozprašuje kapky roztaveného materiálu.

#### 4.1.1.5. *Mechanické drcení a mletí*

Výroba kovového prášku externí silou je jedna z nejstarších metod výroby prášku. Přeměna kovu na prášek může probíhat za pevného i tekutého stavu. Rozlišujeme následující výroby prášku: drcení a mletí.

Můžeme se setkat se speciálním druhem mechanické výroby prášku pod názvem *mechanical alloying*. Jedná se o proces, kdy dochází k opakovanému svařování a drcení kovového materiálu ve vysokoenergetických drtičkách. Proces se využívá k vytvoření nových materiálů a slitin, jako jsou amorfní slitiny nebo intermetalické materiály. Výhodou těchto procesů je, že lze využívat surového materiálu a materiál může mít formu vláken, špon a dalšího odpadu.



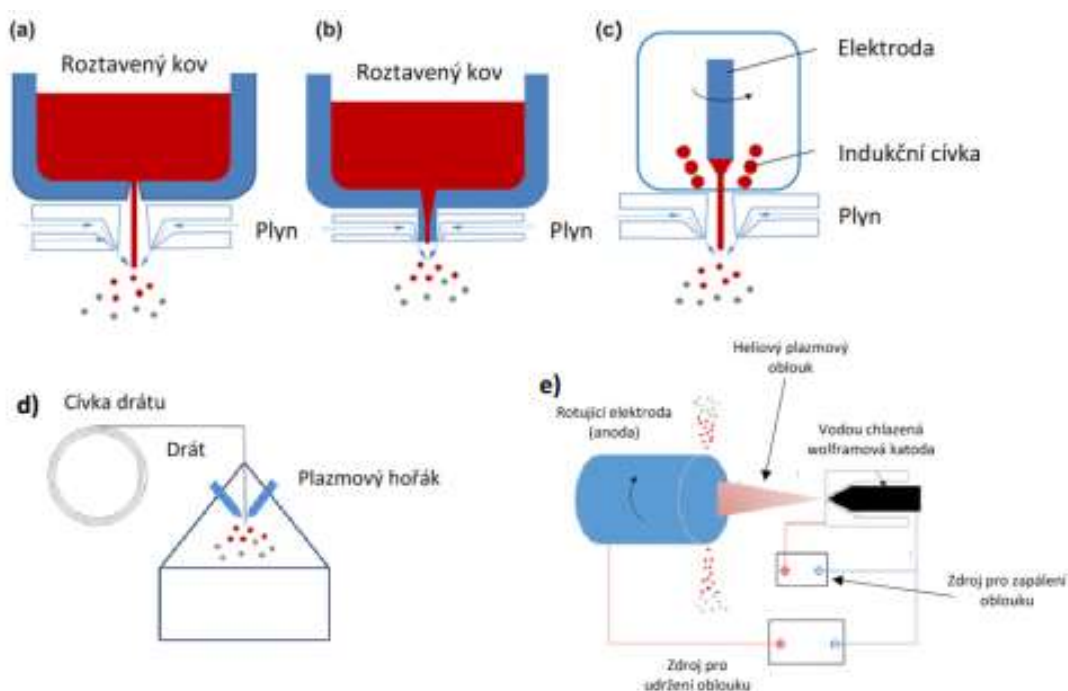
## 4.1.2. Fyzikálně-chemické metody

### 4.1.2.1. Elektrolyza

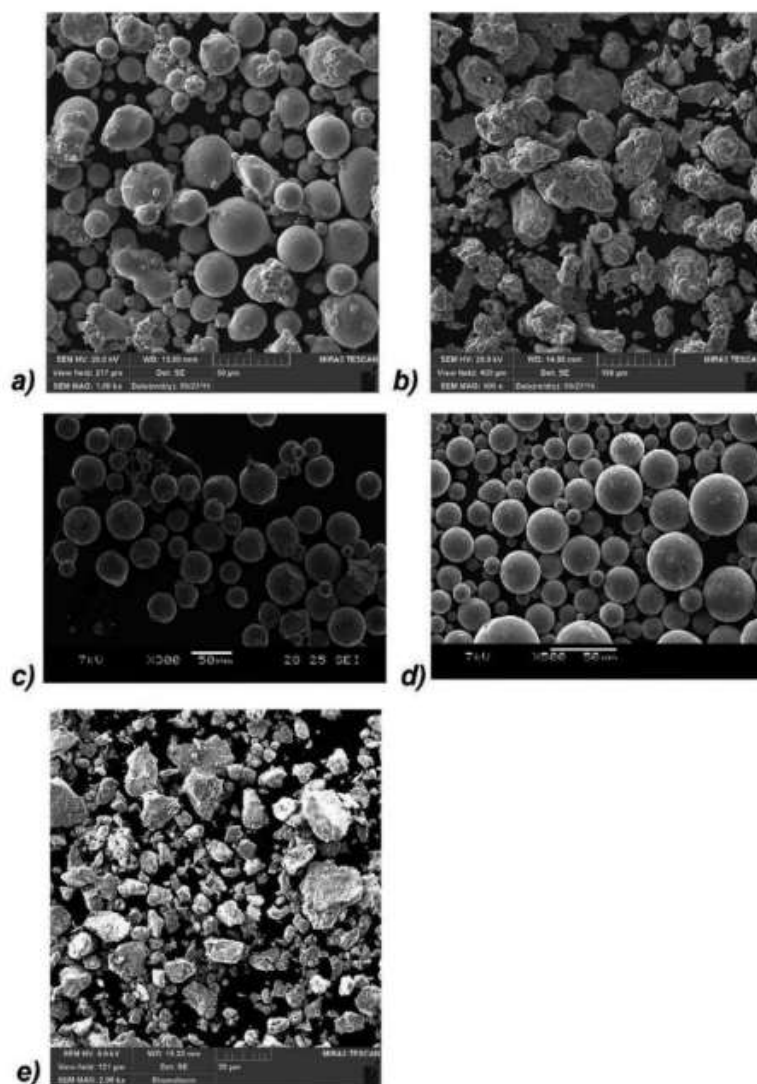
Elektrolyza je zavedená fyzikálně-chemická metoda, kdy dochází ke změně koncentrace látek vlivem průchodu elektrické energie, která vede ke změně podmínek pro získání kovového prášku. Omezením elektrolyzy je, že je možné získat pouze čistý kov, nikoliv slitiny.

### 4.1.2.2. Chemické procesy

V čele chemických procesů stojí karbonylový proces, který umožňuje produkci prášku niklu a železa. Surový kov reaguje s oxidem uhlíku za působení tlaku a teploty, což vede ke vzniku karbonylu, který se za snižujícího tlaku a zvyšující teploty rozkládá na kovový prášek. [22–24]



Obrázek 15 - a) VIGA b) EIGA c) PA d) wire powder e) PREP [24]



Obrázek 16 - a) atomizace plynem In718 b) chemická redukce Fe c) atomizace plynem Ti6Al4V d) atomizace plazmou Ti6Al4V e) mechanical alloying Fe18Cr8Ni12MnN [22]

## 4.2. Ocel

Nejvíce používaným materiálem v aditivním průmyslu je ocel. Konkrétně se jedná o austenitickou nerezovou ocel. Svou oblíbenost si vysloužila hlavně pro svou skvělou korozní odolnost, biokompabilitu a tvárnost, čímž je vhodná pro aplikace v letectví, lékařství, zbrojním průmyslu a dalším. Nejvíce využívanou austenitickou ocelí je ocel 316L. Jedná se o vysokopevnostní chrom-niklovou ocel s vysokou korozní odolností a pevností. Obsahuje molybden, který poskytuje skvělou odolnost proti bodové korozi, a nikl, který zvyšuje pevnost a tvrdost oceli.

Díky své unikátní mikrostrukturu mají austenitické oceli zajímavé chování v tahu, které je značně odlišné v porovnání s díly vyrobenými konvenčními způsoby. Při porovnání tahového tělíska z nerezové oceli 316L tištěné metodou L-PBF a tělíska odlitého můžeme pozorovat v tabulce 1, že mezi mechanickými vlastnostmi je výrazný rozdíl. To je přisuzováno přítomností zvýšeného počtu nanovměstků, které brzdí pohyb dislokací, a velkou hustotou malouhlových hranic. Díky skvělému poměru pevnosti a tvárnosti slouží jako skvělá alternativa v případě dilematu u konvenčních technologií, kdy je problém s upřednostněním pevnosti na úkor tvárnosti a opačně. Ocel 316L má rovněž vysokou odolnost proti poškození vodíkem v porovnání s konvenčně vyrobeným dílem, čímž by se mohla stát kandidátem na použití pro nádrže na vodíkové palivo.

	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Tažnost [%]
Tištěná 316L	640-700	450-590	36-59
Odlitá 316L	450-550	160-365	30-43

*Tabulka 1-Porovnání mechanických vlastností vytisklého a odlitého vzorku 316L*

Ačkoliv bylo dříve uvedeno, že ocel 316L má skvělou korozní odolnost, při zpracování L-PBF technologií byl pozorován pokles v korozní a erozní odolnosti, což je způsobeno slabší schopností re-pasivace v porovnání se svým konvenčním protějškem. Proč k tomu dochází, stále není jasné, ale předpokládá se, že hlavními faktory jsou přítomnost vnitřních pórů a nehomogenní mikrostruktura. I přes veškeré slibné vlastnosti, které ocel, a přeneseně i další materiály, má díky aditivní technologii, je zde řada výzev, které musí nejprve překonat před širší průmyslovou aplikací. Mluvíme zde kupříkladu o zbytkovém napětí nebo anizotropii.

Vzhledem k velkému teplotnímu gradientu spojenému s aditivními technologiemi se u vytištěných dílů objevuje zbytkové napětí, které je zdrojem deformací. To následně ovlivňuje mechanické vlastnosti, snižuje odolnost proti praskání nebo zhoršuje konečnou geometrii. Možností, jak snížit teplotní gradient, je předeřev stavební palety a materiálu, případně změna skenovací strategie

či vhodné využití podpěr, které slouží jako odvod tepla. Rovněž je možné použít tepelné zpracování tepelného dílu.

Anizotropie je velkým problémem dílů vyrobených aditivní technologií. Anizotropii jako takovou můžeme rozdělit do dvou skupin: anizotropie vznikající při stavbě dílu v různých směrech a anizotropie vznikající při zkoušení mechanických vlastností dle různých os. V závislosti na umístění dílu je možné mít rozdíl v mechanických vlastnostech až 20 %. To je způsobeno formováním defektů mezi vrstvami, které jsou příčinou poklesu pevnosti. [25, 26]

### 4.3. Hliník a jeho slitiny

Hliník a jeho slitiny jsou po oceli druhým nejrozšířenějším konstrukčním materiálem na světě. Jeho využití stále roste, hlavně díky jeho nízké hustotě, vysoké korozní odolnosti a dobré kombinaci fyzikálních a mechanických vlastností. Díky těmto vlastnostem se stal prvním materiálem, který byl využit aditivní technologií v leteckém průmyslu. Dosud se v praxi využívaly technologie, které zpracovávaly hliníkové slitiny jak v tekuté, tak pevné formě. Co se týče využití hliníkových slitin aditivní technologií v tekuté formě, není jejich využití tak rozšířené jako u konvenčních technologií, protože hliníkové slitiny se odlévají pomocí konvenčních technologií do složitějších tvarů relativně snadno, proto není tlak na využití aditivních technologií. Dalším důvodem je, že hliníkové slitiny tvoří na povrchu oxidy, špatně se roznáší a mají tendenci navlhat, což jsou vlastnosti, které nejsou pro aditivní výrobu příliš vhodné. Rovněž špatná svařitelnost vysokopevnostních hliníkových slitin je překážkou pro jejich větší využití, protože je zde riziko vzniku trhlin za tepla. Hliníkové slitiny v pevné formě se zpracovávají sintrováním. Ani zde není úplně snadné zpracování, jelikož je třeba sintrovat v atmosféře s nízkým parciálním tlakem kyslíku a par, která zabraňuje oxidaci a podporuje difúzi kovu.

V současné době se nejvíce používají slitiny hliníku s křemíkem. Čistý hliník lze také použít, ale vzhledem k jeho nízké pevnosti se jeho využití příliš nerozšířilo. Slitiny Al-Si mají nízký rozsah tuhnutí a tekutosti, díky čemuž mají skvělou tisknutelnost. Jsou však velice citlivé na nastavení tiskových parametrů, které mohou způsobit vyšší pórovitost nebo pokles meze kluzu a pevnosti. Ze slitin Al-Si

se v praxi nejvíce setkáme s Al-12Si, AlSi10Mg a A357. Jedná se o slitiny s výtečnou tisknutelností, tekutostí a mechanickými vlastnostmi. Mez kluzu se pohybuje v rozmezí 150-300 MPa, výjimečně dosáhne až 330 MPa. Jediné slitiny Al-Si, které dosahují vyšších mezí kluzu až 440 MPa jsou slitiny s příměsemi TiB<sub>2</sub> a TiC. Výhodou Al-Si slitin je, že je lze tepelně upravovat.

Al-12Si je známý pro svůj skvělý poměr váhy, mechanických vlastností a dobrých vlastností za tepla. Slitina se využívá často v letectví, kosmonautice nebo automobilovém průmyslu. Je vhodná také pro tenkostěnné aplikace např. pro výměníky tepla.

AlSi10Mg je slitina využívaná hlavně v automobilovém průmyslu na díly jako jsou výfuky a emisní systémy, které nevyžadují příliš velkou stálost mechanických vlastností za zvýšené teploty.

Slitina A357 nebo také AlSi7Mg0,6 má dobré mechanické vlastnosti a nižší obsah křemíku zlepšuje elektrickou a tepelnou vodivost. Slitina byla navržena pro letecký průmysl s úmyslem, aby si zvládla zachovat dobré mechanické vlastnosti za zvýšené teploty. [27–29]

	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Tažnost [%]
Al-12Si	480-500	250-270	4-8
AlSi10Mg	435-495	225-275	3,8-12
AlSi7Mg0,6	350-430	180-240	6-16

Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti vybraných Al slitin [28]

#### 4.4. Titan a jeho slitiny

Titan a jeho slitiny jsou v průmyslu už více jak 50 let a v posledních dekádách se stávají stále populárnějšími. Titan se nejvíce používá tam, kde je jeho poměr váhy a mechanických vlastností lepší, než u hliníkových či ocelových slitin. Jeho další využití se odráží od velice dobré biokompability a koroziivzdornosti. Jak se vývoj dere kupředu, tak je tlak na lepší a pevnější materiály. Skvělým příkladem je letectví, kde se požadují pevné rámy, což je jedním z důvodů, proč dochází

k náhradám hliníkových slitin za titanové. Vzhledem k vysoké ceně titanu je aditivní výroba titanových součástí vítaná, už jenom z důvodu ušetření materiálu.

Nejvíce používaná titanová slitina je Ti6Al4V a v současné době zabírá více než 50% podíl na trhu s titanem. Je také známá pod označením Ti64. Je to ( $\alpha+\beta$ ) slitina s vysokou pevností, nízkou hustotou, skvělou korozní odolností a vysokou biokompabilitou. V literatuře se uvádí, že Ti6Al4V obsahuje čtyři různé druhy martenzitu: primární, sekundární, terciární a kvartický, který obsahuje velké množství dislokací a dvojčat. Velikost martenzitu může být ovlivněna procesními parametry. Ti6Al4V je aplikován v místech, kde díl nese nějakou zátěž, tedy klíčovými vlastnostmi slitiny jsou její tahové a únavové vlastnosti. V porovnání s konvenčními technologiemi dochází při tisku k velkým změnám teplot, což vede k transformaci  $\beta$  fáze na nestabilní  $\alpha'$  (martenzitická fáze). V důsledku toho roste pevnost a tvrdost a klesá tvárnost. Pro aditivní zpracování titanu je důležité použít ochrannou atmosféru. Ačkoliv je zdokumentováno, že jisté prvky, jako je kyslík nebo dusík, mohou zvýšit pevnost, rovněž snižují tvárnost a podporují vznik křehkých struktur. Proto je dobré dbát na dobré skladování a manipulaci v průběhu výroby, aby nedošlo ke kontaminaci prášku. Tato slitina se obvykle používá v letectví a lékařství. [6, 30]

	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Tažnost [%]
Tištěná Ti6Al4V	1035-1407	910-1350	12-18
tvářená Ti6Al4V	870-995	830-930	~10

Tabulka 3 - Srovnání mechanických vlastností tištěné a tvářené Ti slitiny [6]

V rámci aditivní výroby se mimo výše zmíněné materiály můžeme setkat také s materiály na bázi niklu, mědi nebo kobaltu. Tyto a další materiály budou v následující kapitole zmíněny v souvislosti se zdravotními riziky.

## 5. Bezpečnost a zdraví

V oblasti aditivní technologie je stejně jako u jiných technologických odvětví celá řada bezpečnostních rizik. Jelikož je aditivní technologie relativně nové odvětví v porovnání s konvenčními technologiemi, veškerá bezpečnostní rizika a opatření nejsou dokonale zmapována. Prvním oficiálním dokumentem, který se snažil problematiku adresovat je norma ČSN EN ISO/ASTM 52931 – Aditivní výroba kovů – Životní prostředí, zdraví a bezpečnost – Obecné zásady pro použití kovových materiálů z roku 2023. Norma se zabývá vyhodnocením rizik spojených s procesem aditivní technologie a možnou prevencí. Norma rovněž uvádí úrovně bezpečnosti dle velikosti částic. To je uvedené v níže přiložené tabulce a je dobré se jí řídit i navzdory tvrzení výrobců, že materiál neobsahuje menší částice než uvedené.

Průměr částic	Efekt
Méně než 100 $\mu\text{m}$	Všechny částice pod 100 $\mu\text{m}$ mohou vstoupit do dýchacího ústrojí
Mezi 5 a 100 $\mu\text{m}$	Zachytí se nárazy v dutině hltanu a hrtanu o stěny či chlupy
Mezi 1 a 5 $\mu\text{m}$	Většina z nich se ukládá v průdušnici, průduškách nebo průdušinkách
Méně než 1 $\mu\text{m}$	Dostávají se do plicních sklípků, které ucpávají

Tabulka 4 - Úrovně nebezpečí dle velikosti částic [44]

V závislosti na použité technologii a materiálu se mohou bezpečnostní rizika a následná opatření lišit. V následujících podkapitolách se budu věnovat převážně rizikům pojícím se s materiálem ve formě prášku a na něj navázané technologii PBF.

### 5.1 Rizika spojená s práškem

Asi největší bezpečnostní a zdravotní riziko představuje kovový prášek, jelikož u něj můžeme pozorovat široké spektrum potenciálních hrozeb. Kovové prášky

mohou způsobit podráždění kůže, očí nebo sliznice a při vdechnutí mohou způsobit plicní fibrózu. Většina prášků není klasifikovaná jako toxická či karcinogenní, přesto při požití mohou způsobit závažné problémy. U některých prášků dokonce může dojít ke spuštění Alzheimerovy choroby či plicních chorob. Kovové prášky jsou obecně velmi hořlavé a část z nich i výbušná, speciálně v případě vystavení statické elektřině nebo jinému tepelnému zdroji. Některé naopak hoří v případě vystavení oxidující látce. Registrujeme i látky, které mají tendenci k samovznícení v případě kontaktu s kyslíkem nebo vlhkostí.

V následujícím textu bude uvedeno, jaká rizika přesně hrozí, jak s práškem správně manipulovat a jaká preventivní opatření dodržovat.

### 5.1.1 Skladování prášku

Aby nedošlo k závažnému ohrožení na životě a ohrožení majetku, je důležité dodržovat bezpečnostní předpisy a přečíst si materiálový list, kde jsou uvedeny údaje jako správné skladování, užívání apod. Správné skladování má vliv nejen na bezpečnost, ale i kvalitu tisku, aby nedošlo k navlhnutí a kontaminaci. Prášky by se měly skladovat v kontrolovaném prostředí, kde je možné kontrolovat teplotu a vlhkost. Dále by měly být skladovány v nezbytně nutném množství a v uzavřeném kontejneru, abychom se vyvarovali právě navlhnutí, degradaci, kontaminaci a úniku prášku. Aby nedošlo k záměně materiálu a z toho plynoucím problémům, je třeba kontejnery s práškem správně označit a mít k nim patřičnou dokumentaci. U reaktivních materiálů, jako jsou titanové či hliníkové slitiny, je dobré kontejnery skladovat v bezpečnostních skříních v inertní atmosféře. Rovněž je doporučeno prášky skladovat v prostorách mimo hlavní budovu tzn. oblast, kde jsou minimalizovány škody v případě požáru či výbuchu. Jakékoliv činnosti, které generují teplo, případně jiskry, se nesmí vykonávat v blízkosti skladu. Jelikož některé prášky mohou při kontaktu s vodou vytvářet vodík, je zakázáno využívat vodní hasicí systém.

### 5.1.2 Zdravotní a bezpečnostní rizika dle druhu prášku

Již bylo řečeno, že kovové prášky mají na člověka a přeneseně i na životní prostřední negativní vliv. Tyto vlivy se ale liší dle druhu materiálu. Níže jsou vypsané běžně užívané prášky a jejich vlivy na organismus a životní prostředí.



#### 5.1.2.1 *Ocel*

Jedná se o slitinu obsahující železo, často doprovázené chromem a niklem. S ohledem na doprovodné prvky se klasifikuje jako toxický materiál. Může způsobit podráždění kůže a je podezření, že může způsobit rakovinu. Dlouhodobé nebo opakované vystavení může způsobit vážné poškození vnitřních orgánů. V kompaktní formě je tento materiál nehořlavý a výbušný je pouze při vystavení zápalnému zdroji nebo v případě, že je prášek jemně rozprostřený. V případě požáru produkuje oxidy železa. Materiál je hašený práškovými hasícími prostředky, nikoliv vodou. [31–33]

#### 5.1.2.2 *Hliníkové slitiny*

Materiály na bázi hliníku jsou vysoce hořlavé s vysokým rizikem samovznícení a výbuchu. Je nutné ho skladovat v suchu, jelikož při kontaktu s vodou produkuje vysoce hořlavé plyny. Hasí se pouze práškovými hasícími přístroji. Při kontaktu s kůží nevyvolává závažnější problémy, při vdechnutí může vyvolat astmatickou reakci. Obecně je hliník hodnocen jako málo nebo vůbec toxický, nicméně je podezřelý ze způsobování Alzheimerovy choroby. [34, 35]

#### 5.1.2.3 *Titanové slitiny*

Titan je biologicky inertní, tudíž při kontaktu s kůží nebo při požití by neměl způsobit žádné problémy. Při vdechnutí může způsobit problémy s dýcháním krátkodobějšího charakteru. Jedná se o vysoce hořlavý a výbušný materiál. V případě požáru vzniká vodík. Je důležité s ním manipulovat v inertní atmosféře, jelikož může nebezpečně reagovat při kontaktu se vzduchem. Rovněž je důležité zabránit zvíření prášku, jeho vystavení zápalnému zdroji a kontaktu s vodou. Titanové slitiny lze hasit pouze pískem či práškem. [36, 37]

#### 5.1.2.4 *Kobalt*

Prášky obsahující kobalt jsou vysoce toxické. Mají na svědomí celou řadu problémů mj. způsobují alergické reakce při kontaktu s kůží, podráždění očí, způsobuje astma, pravděpodobně je zdrojem některých genetických poruch. Dále může způsobovat rakovinu a neplodnost. Mimo člověka je velice toxický pro vodní prostředí, respektive pro vodní faunu s dlouhotrvajícími následky. V případě zvíření a kontaktu se vzduchem může dojít ke vzniku výbušné směsi. Je také nutné

vyhýbat se kontaktu se zápalným zdrojem. V případě požáru hasit práškem nebo pískem. [38, 39]

#### 5.1.2.5 *Měď*

Měděné prášky mohou při kontaktu s kůží způsobit alergickou reakci. V případě delšího vystavení dochází k vážnému poškození vnitřních orgánů. Je možnou příčinou rakoviny. Při požití vyvolává horečku, nevolnost, může být příčinou poškození jater. Při vyšší akumulaci v těle může způsobit Wilsonovu nemoc. Stejně jako u kobaltu je vysoce toxický pro vodní prostředí s dlouhotrvajícími efekty. Jedná se o hořlavý kov. V případě zvíření prášku může dojít při kontaktu se vzduchem ke vzniku výbušné směsi. Pro hašení opět využít hasící prášek nebo písek. [40, 41]

#### 5.1.2.6 *Nikl*

U niklových slitin je podobně jako u kobaltu velké množství zdravotních komplikací. Způsobuje zcitlivění dýchacího traktu a kůže, dermatitidu, ekzém. Dále je pravděpodobně karcinogenní, může způsobit mutaci buněk, případně narušit plodnost. Je vysoce škodlivý vůči životnímu prostředí. V případě požáru je třeba hasit práškovými hasícími přístroji. [42, 43]

### 5.1.3 Bezpečnostní opatření

Největší problém může nastat v případě plnění tiskárny a post-processingu. Při těchto procesech je obsluha nejvíce zranitelná, proto je nutné zavést ochranná opatření. Obsluha musí být řádně vyškolená k manipulaci s prášky a obsluze aditivních zařízení. Ke školení by na pracovišti mělo být dostatek informačních materiálů jako materiálové listy, návody k obsluze, případně upozornění na nebezpečí. V přítomnosti osoby doplňující prášek by mělo být co nejméně osob. Místnost by měla být přístupná jen pro školený personál. Místnost by měla být dobře ventilovaná, u vchodu do místnosti by měla být lepící podložka, aby se zamezilo šíření prášku do ostatních prostor. Zdi místnosti by měly být natřeny barvou, která nezachytává prášek. Osoba obsluhující tiskárnu je povinna nosit ochranné pomůcky. Aby byla co nejmenší šance na šíření prášku mimo místnost, doporučuje se mít sadu oblečení/ochranných pomůcek pouze pro tuto místnost. Mezi nutné ochranné pomůcky patří dýchací maska s vhodným filtrem a ochranné

rukavice. V případě, že součástí dýchací masky není ochrana očí, je důležité mít i ochranné brýle. Oblečení se doporučuje samozhasínací a takové, které nevytváří statickou elektřinu. Hasící systém a hasící přístroje by měly být přizpůsobeny užívaným materiálům a v dosahu obsluhy. Obsluha by se měla vyvarovat rizikové činnosti, jako manipulace s otevřeným ohněm nebo zařízeními generující statickou elektřinu, dodržovat bezpečnostní předpisy, používat pouze schválený prášek a používat ochranné pomůcky. Rovněž by měla pověřená osoba zodpovídat za úklid místnosti po manipulaci s práškem. Tím rozumíme otření ploch doporučeným čistícím prostředkem, případně vysát místnost vodním vysavačem. Zde je nutné pamatovat, že kovový prášek se nikdy nesmí vysávat z malých, uzavřených prostor.

Z veškerých prostor, kde se manipuluje s práškem, je třeba mít přístup k umyvadlu nebo sprše a lékárnice. V případě potřeby první pomoci spojené s kovovými prášky je postup následující:

- Při vdechnutí je nutný okamžitý přísun čerstvého vzduchu
- Při kontaktu s kůží je nutné postižené místo umýt, ideálně polyethyl glykolem a poté vodou
- Při kontaktu s okem je nutné okamžitě dát oko pod tekoucí vodu a chránit oko zdravé
- Při požití je nutné vypláchnout ústa a je dobré hodně pít, pokud možno vyvolat zvracení
- Ve všech případech je nutné okamžitě vyhledat lékařskou pomoc

## 5.2 Rizika spojená s tiskárnou

Ačkoliv je prášek největším zdravotním a bezpečnostním rizikem procesu tisku, rozhodně není jediným. V tiskárně se můžeme setkat s celou řadou komponent, které mohou ohrozit obsluhu nebo její okolí. Mezi takové části patří laser, pohyblivé části tiskárny, elektrický proud, plynový systém včetně nádob s inertním plynem a horké povrchy.

### 5.2.1.1 *Nebezpečí od elektrické energie*

Tiskárna je stroj využívající elektrickou energii a je zde šance na úraz elektrickým proudem. K úrazu může dojít kdykoliv při kontaktu s dílem pod

napětím. Obvykle je úraz od elektrického proudu spojený s poškozenou izolací nebo poškozením konstrukčních dílů. V rámci preventivních opatření je nutné dodržovat bezpečnostní předpisy. Obsluha by se nikdy neměla dotýkat dílů pod napětím. Jakékoliv opravy týkající se elektroinstalace je nutné přenechat kvalifikované osobě. Veškeré bezpečnostní prvky a izolace by měly být pravidelně kontrolovány. V případě práce na stroji se musí stroj odpojit od přívodu elektrického proudu. I po odpojení od proudu je zde nebezpečí akumulovaného náboje, proto je nutné počkat alespoň 10 minut po odpojení od proudu. V rámci zvýšení bezpečnosti je předepsanou součástí ochranných pomůcek obuv s izolující podrážkou.

#### *5.2.1.2 Nebezpečí od pneumatické výbavy a přívodu inertního plynu*

Tiskárny jsou mimo jiné vybaveny i pneumatickým systémem a přívodem inertního plynu. Vzhledem k přítomnosti inertního plynu může dojít při úniku k nedostatku kyslíku v místnosti. K úniku může dojít neodborným zacházením s vedením plynu, případně špatným upevněním a utažením přívodu. Vedení rovněž může být poškozené, proto je nezbytné dělat pravidelné kontroly. V průběhu manipulace s tiskárnou musí být prostor dobře větrán a v případě úniku musí obsluha prostor opustit a opět může vstoupit pouze s vhodným dýchacím přístrojem. V případě úniku plynu hrozí i uvolnění hadic, zvíření prachu a nebezpečí od pneumatických pohonů. V tomto případě je nutné zamezit poškození vedení, ale bez demontáže. Veškerá připojení je vhodné často kontrolovat z hlediska těsnosti. V případě zjištění nedostatku je třeba kontaktovat odpovídající společnost a nechat provést údržbu.

#### *5.2.1.3 Nebezpečí exploze a požáru*

Mimo kovové prášky je celý proces doprovázen vznikem procesních spalin a filtračních zbytků, které mohou spolu s kovovým práškem vytvořit explozivní atmosféru. Celá oblast by měla být označena jako oblast s nebezpečím výbuchu. Jak již bylo dříve zmíněno, je třeba vyloučit přítomnost zápalných zdrojů v takto označených oblastech. Platí zde absolutní zákaz kouření. Výbuch může být způsoben i elektrostatickým výbojem, proto je nutné nosit antistatické oblečení. Odsávání spalin se zapíná pouze tehdy, jeli obsah kyslíku v komoře pod 2 %.

V případě spuštěného odsávání se nesmí za žádných okolností otevírat dveře procesní komory.

#### *5.2.1.4 Nebezpečí od laserového zařízení*

U laserových zařízení je zvýšené riziko poškození zraku a zničení sítnice. Rovněž může dojít k popálení kůže. V případě neodborné manipulace může laserové záření způsobit požár nebo explozi. Aby se takovýmto problémům předešlo, je třeba dodržovat bezpečnostní předpisy. Práce na stroji se nikdy nesmí provádět při zapnutém laserovém systému. Jakékoliv ochranné prvky, kryty a ochranné dveře se nesmí sundávat. V rámci ochrany zraku se nesmí dívat do laserového nebo rozptýleného paprsku. V případě pohybu v oblasti ohrožené laserovým paprskem se musí používat vhodné ochranné brýle. Aby se předešlo vážnému zranění, nikdy se nesmí částí těla, ani s ochranným oblečením, zasahovat do laserového paprsku.

#### *5.2.1.5 Nebezpečí od mechanických částí*

Jedním ze zjevných nebezpečí je nebezpečí hrozící od pohyblivých částí tiskárny. Převážná většina pohyblivých součástí je koncentrována v přípravné komoře: hlavně písty zásobníkových komor, pojezd nanašeče a pojezd celého modulu. Jelikož se v přípravné komoře manipuluje s celou řadou nástrojů, je zde riziko, že by mohlo dojít ke kolizi kterékoliv z výše uvedených částí se zapomenutým nástrojem. Kolize s částí těla je zde nepravděpodobná, jelikož tiskárna má celou řadu bezpečnostních senzorů, i přesto je dobré být na pozoru s ohledem na případné selhání senzorů. Při manipulaci s nanašečem hrozí poranění o nanášecí břit či roh nanašeče. Mimo přípravnou komoru je riziko přiskřípnutí se do dveří tiskárny. Aby nedošlo ke zranění, je potřeba mít řádně proškolenou obsluhu. Povinností obsluhy je řídit se provozním návodem, vnitřními nařízeními instituce a dbát zvýšené pozornosti v oblasti pohyblivých částí.

#### *5.2.1.6 Nebezpečí od vysokých teplot*

Jelikož se jedná o vysokoenergetický proces, veškeré díly v procesní komoře se zahřívají. Při nepozornosti může dojít k popáleninám, proto se doporučuje před jakoukoliv manipulací počkat, než se díly ochladí alespoň na 40 °C. Při vyjímání filtru a čištění komory se jako ochranné pomůcky předepisují žáruvzdorné rukavice.

#### 5.2.1.7 *Všeobecná nebezpečí*

Na pracovišti dochází k pohybu mezi celou řadou vedení. Elektrická vedení zařízení, odsávací vedení, vedení inertního plynu a stlačeného vzduchu představuje riziko zakopnutí, které může vést k těžkým zraněním. Veškerá vedení musí být zajištěna krytem proti zakopnutí a zachycení. V případě potenciálního zdroje zakopnutí musí být označen značkovací páskou. Aby se minimalizovalo nebezpečí zakopnutí, je dobré odstranit z oblasti veškeré nepotřebné předměty. Při manipulaci s práškem může dojít k úniku na podlahu, kde je možným zdrojem uklouznutí. V takovém případě je místo nutné uklidit, aby nedošlo ke zranění. V příloze lze najít plakáty popisující rizika a možná opatření pro pracoviště. [44–48]

## 6. Proces výroby

V následujících kapitolách je uvedeno zařízení a popis projektu tisku s náhledem na konkrétní výtisky. Dále je detailně popsán samotný proces tisku rozdělený do odpovídajících úseků a z nich pramenící časová spotřeba. Naměřená a zpracovaná časová spotřeba poslouží jako základ pro technicko-ekonomické zhodnocení celého PBF procesu, který je popsán v sedmé kapitole.

### 6.1 Použitá tiskárna – Concept Laser M2 Cusing

Veškerý tisk a na něj navazující měření probíhala na tiskárně umístěné na Fakultě strojní ČVUT v Praze.

Pro tisk vzorků byla použita tiskárna Concept Laser M2 Cusing z roku 2017. Název může být v tomto případě zavádějící, jelikož v roce 2016 došlo ke vzniku divize GE pojmenované GE Additive. Součástí této divize je dříve v témže roce odkoupená firma Concept Laser, Arcam EBM a divize aditivní technologie GE additive. V roce 2024 se divize přejmenovala na Colibrium Additive. Jedná se o divizi, jenž je součástí GE Aerospace, což je jedním z největších dodavatelů v oblasti aditivního designu, výroby a výzkumu.

Jak již bylo výše zmíněno, jedná se o model z roku 2017. Tiskárna je primárně určena pro prototypovou výrobu z oceli, hliníkových a titanových slitin. Jedná se o stroj o váze 2 200 kg. Tiskárna je vybavena stavební a výrobní komorou o rozměrech 250x250 mm s možností výšky dílů až 280 mm. Maximální příkon stroje je roven 6,8 kW a je vybaven přípojkami pro ethernet do 100 MB/s. Během výroby je nutné dodávat ochrannou atmosféru, proto je tiskárna vybavena generátorem dusíku. V případě potřeby je rovněž možné připojit zdroj argonu. Pro oba plyny je tlak plynu pro tento stroj stanoven na 5 barů. V závislosti na druhu materiálu a výkonu laseru, dosahuje tiskárna výrobních rychlostí v rozmezí 2–35 cm<sup>3</sup>/h. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 20–80 μm. Tiskárna rovněž disponuje ytterbiovým vláknovým laserem o výkonu 400 W, vlnové délce 1070 nm a průměru laserového paprsku 50 μm. Pro vyhodnocení nanesené vrstvy je v tiskárně přidán modul QM coating, který sleduje a vyhodnocuje vrstvu. V případě nedostatečného nanesení dojde k opakování nanesení vrstvy. [48–50]



Obrázek 17 - Tiskárna Concept Laser M2 Cusing [48]

## 6.2 Popis projektu

Celá studie probíhala jako součást projektu BTHA-JC-2022.30. Jedná se o projekt ve spolupráci s Bavorsko-českou akademickou agenturou a dalšími. Projekt se zaměřuje na chování 3D tištěných vzorků při vysokocyklové únavě. Jedním z dílčích kroků projektu je zkoumání vlivu recyklace na mechanické vlastnosti. [55]



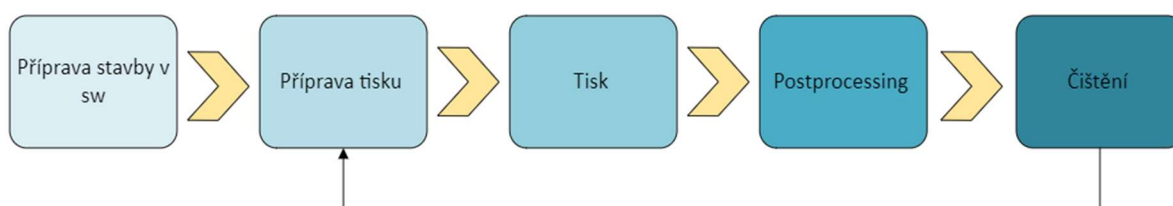
Obrázek 18 - ukázka tištěných vzorků



### 6.3 Charakteristika procesu

V této kapitole je uveden podrobný přehled činností, které vstupují do procesu PBF. Jedná se o činnosti nezbytné k uskutečnění procesu, nicméně je nutné podotknout, že není evidován oficiální postup, dle kterého by se činnosti měly vykonávat. Proto je možné, že v praxi bude sled úseků a některé detaily odlišné. Vytvoření postupu je jedním z dílčích cílů této práce. Níže uvedený popis úseků začíná od přípravné fáze. To je jeden z příkladů, kde může dojít k odlišnosti, jelikož ne vždy se začíná od přípravné fáze, někdy se začíná od čistící. Čistící fází se začíná obvykle v komerčních aplikacích, aby zákazník neobdržel vadný kus vlivem nečistot

a přimícháním jiného materiálu. Může to být také způsobeno častým střídáním obsluhy na pracovišti a nedokončením celého procesu. Veškeré činnosti se také mohou lišit použitým materiálem. V této práci se zabýváme hliníkovou slitinou AlSi10Mg, proto bude veškerý popis vztažen k tomuto materiálu. Pokud by došlo k diametrálně odlišnému kroku, bude to v textu uvedeno. Pro přehlednost



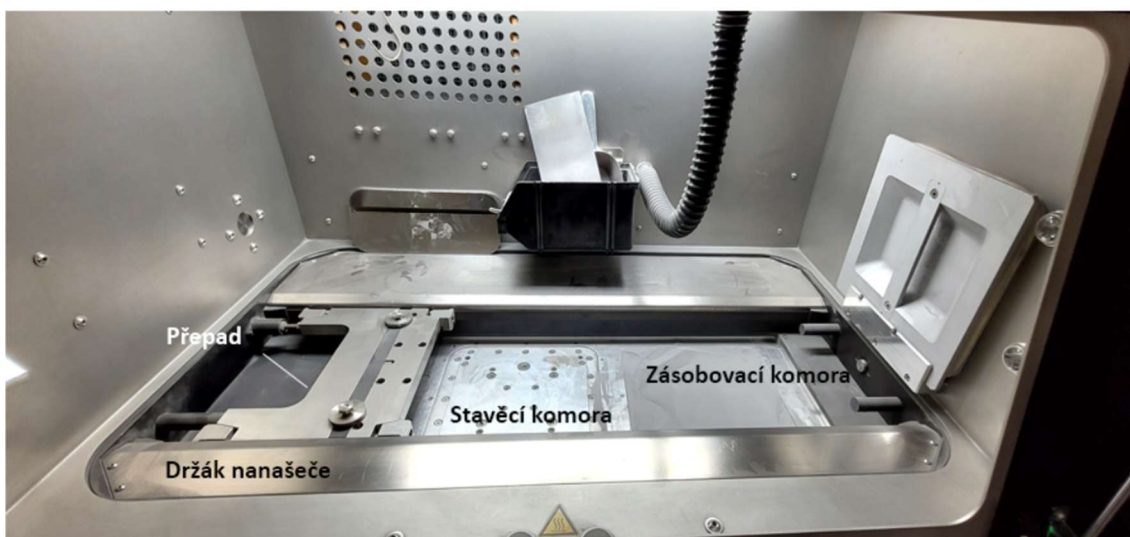
Obrázek 19 - Procesní graf

v navazujících kapitolách byl vytvořen níže uvedený procesní graf.

Aby bylo pro čtenáře snazší si představit umístění jednotlivých částí, je na obr. 20 a 21 vytvořené jednoduché schéma popisující hlavní části tiskárny, které jsou v textu zmíněny.



Obrázek 21 - Orientační schéma tiskárny



Obrázek 20 - Detail přípravné komory



Obrázek 22 - Odkrytá tisková komora

### 6.3.1. Příprava tisku

Za první úsek celého procesu můžeme považovat přípravu tisku. Příprava tisku nezačíná u stroje, jak by se mnozí mohli domnívat, nýbrž při vytváření CAD modelu. Vytvoření modelu je stavebním kamenem celého procesu. Po vytvoření modelu se hotový soubor nahraje do softwaru Materialise Magics, kde je nutné připravit stavbu. Až poté může dojít k přípravě samotného tisku u stroje. Obsluha nejprve zapne stroj. Dalším krokem je obvykle nahrání dat ze softwaru Materialise Magics. V závislosti na složitosti stavby se může jednat i o vyšší desítky minut. Po nahrání dat nám tiskárna sdělí celkovou dobu tisku a celkové množství potřebného materiálu, což je užitečné pro další kroky. Poté je nutné zreferovat osy tiskárny a nastavit nulu zásobovací komory. V případě špatného zreferování či nastavení by mohlo dojít ke kolizi, případně by mohlo dojít k přerušení tisku v důsledku nedostatku materiálu. Dále dochází k nastavení tzv. overdose faktoru, který má vliv na tloušťku vrstvy a má vliv na zhutnění materiálu a obvykle se nastavuje na 180-200%. Upravuje vrstvu tak, aby byla optimálně nastavena a co nejméně prášku šlo do přepadu. Dále přichází na řadu využití informací od tiskárny. Dle potřebného množství materiálu si obsluha sjede na požadovanou výšku. Jelikož při plnění dochází k nakypření materiálu v důsledku smíchání se vzduchem, je dobré nastavit výšku o něco větší. Jak je již v teoretické části práce zmíněno, při tisku se manipuluje s nebezpečnými materiály, proto je třeba využívat ochranných

pomůcek. Následujícím krokem je tedy oblečení ochranných rukavic a dýchací masky s vhodným filtrem.

Před otevřením přípravné komory je důležité zkontrolovat, zdali v místnosti není nikdo bez ochranných prvků a nejsou otevřené dveře do jiných částí budovy. Následuje založení stavební palety. Paleta je uchycena na čtyřech šroubech, umístěných v každém rohu. Šrouby se nedotahují nadoraz, jelikož se do závitových děr dostává prášek, který by mohl zabránit následnému povolení. Poté následuje založení nanašeče. Nejprve se do úchyty založí nanašeč s kovovou hranou, což umožňuje snazší zarovnání. Zarovnání probíhá následovně: obsluha nejprve povolí manipulační šrouby a od oka zarovná nanašeč dle palety. Poté položí za nanašeč baterku a zhasne v přípravné komoře. Obsluha poté manipuluje nastavovacími šrouby tak, aby světlo z baterky prosvítalo mezerou mezi paletou a hranou nanašeče jen slabě. Když je obsluha spokojená s nastavením mezery, dojde k výměně za nanašeč s gumovým hrotem. Před jeho založením je nutné zkontrolovat, zdali není gumový hrot nikde poškozený, jelikož by mohlo dojít k znehodnocení stavby nerovnoměrným nanášením. Dále je nutné založit nový kontejner na odpad. Ten se zakládá pomocí manipulátoru z boku tiskárny. Před puštěním každého tisku je nutné zkontrolovat, že je kontejner prázdný a veškeré ventily jsou otevřené, aby nedošlo k hromadění prášku uvnitř komory. Následujícím krokem je samotné plnění tiskárny práškem. Zde se postup liší dle druhu použitého prášku, nového nebo recyklovaného. V případě nového prášku je postup následující; pytel nebo láhev s práškem se zavře do přípravné komory. Poté se komora naplní ochranným plynem, aby se ochránil prášek před oxidací. Prášek se z pytle vysype do zásobovací komory, přičemž v průběhu je dobré prášek promíchávat, aby se uvolnil zachycený plyn a prášek si mohl sednout. V případě recyklovaného materiálu se nejprve musí nad přípravovací komoru připojit kontejner s recyklovaným práškem. Připojení probíhá pomocí systému trubic, které vedou do zásobovací komory. Poté se otevřou ventily a prášek se nechá padat do zásobovací komory. Jelikož je materiál z hliníkové slitiny velice lehký, může tento proces trvat až hodinu. Komora se zaklopí víkem a pytel se může vyndat ven. Komora se uzavře a opět naplní plynem. Zásobovací komora se odkryje a celý modul se může přesunout z přípravné komory do komory výrobní. Zde dojde k inertizaci celé výrobní komory. Předposlední krok je nastavení první

vrstvy. To probíhá tak, že obsluha manuálně přejíždí přes stavební paletu a nanáší vrstvu prášku. Na paletě by měla zůstat jemná, mírně prosvítající vrstva prášku. Když je obsluha spokojená s nastavenou vrstvou, může dojít ke spuštění tisku.



*Obrázek 23 - Plnění materiálem*

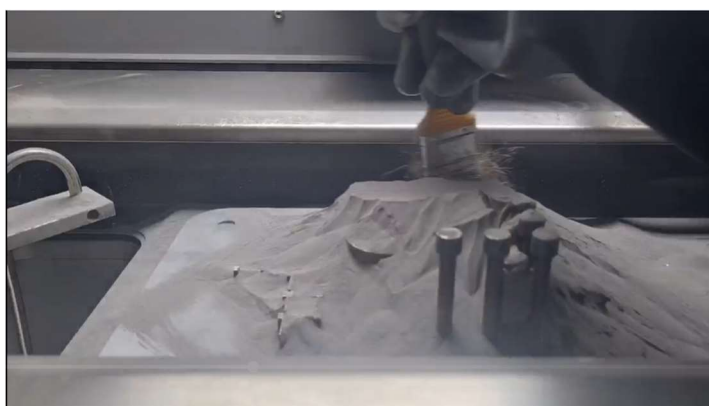
### 6.3.2. Tisk

Samotný proces tisku byl již popsán v kapitole tři. Jelikož je celý proces automatizován, není třeba přílišné obsluhy. Nicméně může dojít k přerušení tisku, ať už nedostatkem materiálu nebo poruchou, a aby nemusela obsluha chodit pravidelně na kontroly, je tiskárna vybavena světelnou signalizací ve formě LED pásky po celém svém obvodu. Jak již bylo výše zmíněno, tiskárna je vybavena modulem QM coating. Kvůli němu je možné, že se dokončení tisku protáhne někdy o celé hodiny, proto je dobré s tím počítat při plánování operací.

### 6.3.3. Postprocessing

Po dokončení tisku je možné výtisk vyjmout téměř ihned, jelikož v porovnání s tiskárnami na polymerní materiály paleta neudrží zvýšené teploty. Obsluha tedy nejprve vyjede se stavěcí komorou nahoru, odhrne prášek z oblasti šroubů a stále v komoře vyklepe přebytečný prášek z výtisku. Takto očištěný výtisk je připravený na postprocessing. I při postprocessingu je šance vystavení

prášku, proto je potřeba použít ochranné pomůcky. Výtisk je třeba nejprve namočit, aby volný prášek při postprocessingu nevířil ve vzduchu. Jelikož je výtisk přivařený pomocí podpěr na stavěcí paletu, je třeba jej nejprve oddělit. Toho lze docílit pomocí dlátka a kladiva, v případě náchylnějších dílů je možné využít drátořež nebo pásovou pilu. Po oddělení výtisků od palety je třeba výtisky připravit pro další postprocessing. Tím rozumíme důkladně je umýt, aby nedošlo ke kontaminaci dalších pracovišť. Tímto krokem jsou výtisky připravené na další zpracování. V procesu zdokumentovaném v této práci by se jednalo o poslední krok, nicméně je dobré podotknout, že může následovat celá řada dalších operací. V závislosti na technologii a potřebách, lze využít technologií na dosažení požadované drsnosti, rozměrů nebo struktury. Těmito technologiemi rozumíme například obrábění nebo tepelné zpracování. V některých případech, kdy je u výtisku větší počet podpěr, může dojít při jejich odstranění ke zkroucení výtisku v důsledku zbytkových pnutí. Proto je třeba před jejich odstraněním podrobit výtisk tepelnému zpracování.



*Obrázek 24 - Ometení výtisku*





Obrázek 25 - Odsekávání výtisků

#### 6.3.4. Čištění

Proces čištění je velice důležitý krok, jelikož na něm může být závislá kvalita celého výtisku. To platí hlavně v případě, kdy dochází ke změně materiálu, kdy by mohlo dojít ke smíchání dvou různých materiálů, což by mělo negativní vliv na konečné mechanické vlastnosti. Tiskárna je připravená pro čištění v momentě, kdy se vyndá výtisk. Veškerý volný prášek se zamete do odpadu. Tento krok se ještě dá dělat přes ochranné sklo, ale dále už je třeba obléct se do ochranného oděvu. Dalším krokem je vysátí přípravné komory, hadic a veškerých volných povrchů. Důležité je také vysát závítové otvory, aby nedošlo k zaseknutí šroubu. Je vhodné použít závitník a párkrát jím závitovou díru projet. Následně je třeba vzít veškeré nástroje a hadice, uschovat je na určené místo a vyměnit za nástroje pro zvolený materiál. Kdyby se používaly stejné nástroje pro různé materiály, došlo by ke kontaminaci. Spolu s nástroji je třeba umýt a vyměnit ochranné rukavice sloužící pro manipulaci uvnitř komory. Samotné vysátí nemusí nutně stačit, proto je komoru třeba vytřít hadrem s vhodným čistícím přípravkem. Často se stává, že prášek ulpívá na stěnách zásobovací a stavěcí komory, proto je dobré s nimi popojet. Dále je třeba vyčistit tiskovou komoru. Tu je nutnost také vysát a vytřít, je zde ale třeba dát si pozor na optická zařízení a kameru. Pod touto komorou je prostor s odtahem spalin, který je po obvodu třeba také vyčistit. Jelikož je možné, že v průběhu čištění se dostal prášek do okolí tiskárny, je třeba po vyčištění tiskárny očistit i okolní povrchy, hlavně povrchy, kterých se obsluha dotýkala a zem v okolí tiskárny. Pro vysávání se používá vodní vysavač, který je po úklidu tiskárny také nutné vyčistit, jinak by mohlo dojít k zatvrdnutí prášku v nádrži.

Pokud se čištění provádí ihned po vysávání, stačí nádrž na vodu pouze vypláchnout. V případě, že se jedná o delší dobu, už mohlo dojít k zatvrdnutí prášku a musí se tedy odsekat.



*Obrázek 26 - Zametení prášku do odpadu*



*Obrázek 27 - Vysávání tiskárny*



V tabulce 5 je uveden přehled sledu operačních úkonů nutných pro dokončení celého procesu. V závislosti na tab. 5 byly vytvořeny tabulky popisující jednotlivé úkony vykonávané v průběhu operačních úseků. Ke každému úseku přísluší souhrnný čas, který bude zpracován v další kapitole. Úsek 00 je přidán pouze pro úplnost a nebude příliš podrobně rozebírán.

č.ú.	Operační úseky
00	Příprava modelu v sw
10	Příprava tisku
20	Tisk
30	Postprocessing
40	Čištění

Tabulka 5 - Přehled sledu operačních úseků

č.ú.	Operační úkony
<b>Příprava tisku</b>	
10	Zapnutí stroje
	Nahrání dat
	Reference os a nuly
	Nastavení overdose faktoru
	Nastavení výšky zásobovací komory
	Oblečení ochranných pomůcek
	Založení palety
	Založení a nastavení nanašeče
	Připojení odpadu
	Naplnění práškem z pytle
	Promíchání prášku
	Přesun do tiskové komory
	Inertizace
	Nastavení první vrstvy
<b>tisk</b>	
20	Tisk
<b>postprocessing</b>	
30	Očištění a vyjmutí palety
	Omytí palety
	Oddělení výtisků od palety
	Důkladné očištění výtisků
<b>Čištění</b>	
40	Zametení volného prášku do odpadu
	Oblečení ochranných pomůcek

	Vysátí přípravné komory a hadic
	Vyčištění závitových děr
	Výměna nástrojů a hadic
	Mytí a výměna rukavic
	Vytření komory čističem
	Vysátí a vytření tiskové komory
	Vysátí odtahu spalin
	Otření volných povrchů
	Vyčištění vysavače

*Tabulka 6 - Přehled operačních úkonů*

## 6.4 Stanovení časové spotřeby jako základ pro technicko-ekonomické zhodnocení

Tato kapitola se zabývá stanovením časové spotřeby procesu, jakožto jedním z faktorů vstupujících do kalkulace nákladů procesu. V současné době probíhá kalkulace bez vstupu časové spotřeby obsluhy. Abychom mohli s těmito daty počítat, bylo vyhotoveno časové vyhodnocení. Toto vyhodnocení probíhalo celkem na dvou kompletních stavbách, dalších dvou přípravách a jednom čištění. Jelikož je proces tisku velice nákladný, nemohl být proces spuštěn jen tak, ale byl měřený během projektu tisku zkušebních těles, proto je množství naměřených dat omezené.

Aby bylo možné stanovit spotřebu práce, bylo ji nejprve nutné objektivně naměřit. K tomu nám poslouží jedna z metod časové studie. Rozlišujeme metody přímého a nepřímého měření. Pro naše účely byla zvolena metoda přímého měření, jelikož metoda nepřímého měření vychází z předem definovaných časů, což je v tomto případě nemožné. Z přímých metod byla zvolena metoda chronometráže, jelikož se díky ní dá získat komplexní přehled o spotřebě času. Je nutno podotknout, že se nejedná o kontinuální výrobu, nýbrž o nárazovou činnost, proto nebylo možné všechny úseky měřit najednou.

Na začátku úseku byla vždy nastavena kamera tak, aby byl na záběru celý operační úsek. Veškeré naměřené časy pak byly zprůměrovány, čímž byla vytvořena časová základna pro výpočet nákladů. Příprava tisku byla naměřena celkem čtyřikrát, přičemž konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce níže. [51, 52]

Příprava tisku	Čas [hod]
t <sub>1</sub>	1,45
t <sub>2</sub>	1,33
t <sub>3</sub>	1,33
t <sub>4</sub>	1,12
Průměrné t	1,3

Tabulka 7 - Časy naměřené při přípravě tisku

Jelikož se některé vzorky schovávaly pro další zpracování, byl postprocessing vykonán jen ve dvou případech viz tab. 8.

Postprocessing	Čas [hod]
t <sub>1</sub>	0,72
t <sub>2</sub>	0,78
<b>Průměrné t</b>	<b>0,75</b>

Tabulka 8 - Časy naměření při postprocessingu

Úsek čištění proběhla celkem třikrát, jelikož při prvním tisku byla již tiskárna uklizena předchozím uživatelem.

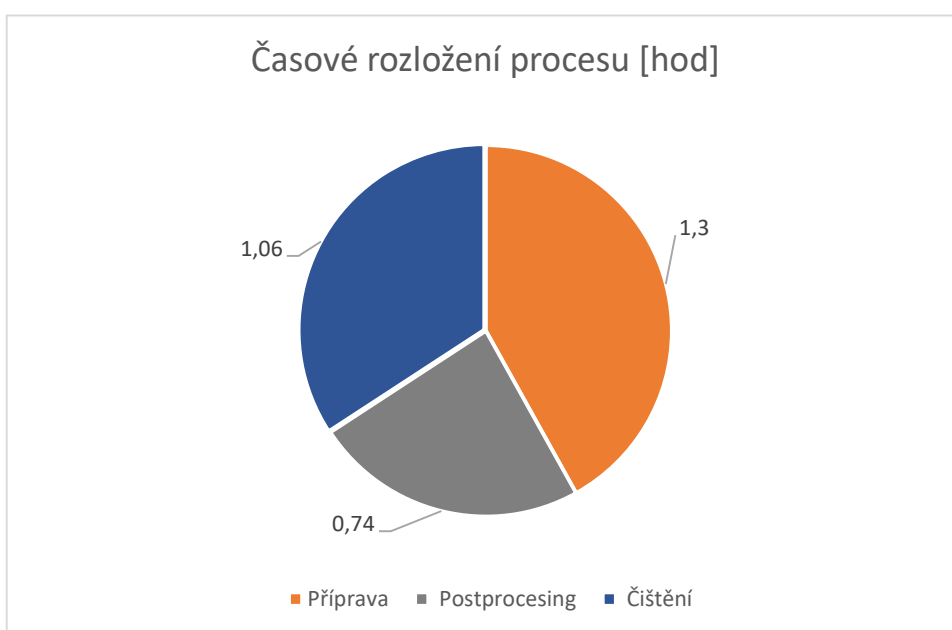
Čištění	Čas [hod]
t <sub>1</sub>	1,18
t <sub>2</sub>	1,00
t <sub>3</sub>	1,02
<b>Průměrné t</b>	<b>1,06</b>

Tabulka 9 - Naměřené časy při čištění

K vytvoření základny bylo třeba ještě průměrné hodnoty sečíst, abychom dostali čas za celý proces. Chybějící časy byly suplovány průměrnou hodnotou daného úseku.

	Čištění	Čas [hod]	Příprava	Čas [hod]	Postprocessing	Čas [hod]	Průměr	Čas [hod]
1	t <sub>1č</sub>	1,18	t <sub>1p</sub>	1,45	t <sub>1po</sub>	0,78	t <sub>1</sub>	3,41
2	t <sub>2č</sub>	1,07	t <sub>2p</sub>	1,33	t <sub>2po</sub>	0,79	t <sub>2</sub>	3,18
3	t <sub>3č</sub>	1,00	t <sub>3p</sub>	1,33	t <sub>3po</sub>	0,72	t <sub>3</sub>	3,05
4	t <sub>4č</sub>	1,02	t <sub>4p</sub>	1,12	t <sub>4po</sub>	0,78	t <sub>4</sub>	2,91
<b>Průměr</b>	<b>t<sub>prům</sub></b>	<b>1,06</b>		<b>1,30</b>		<b>0,75</b>		<b>3,12</b>

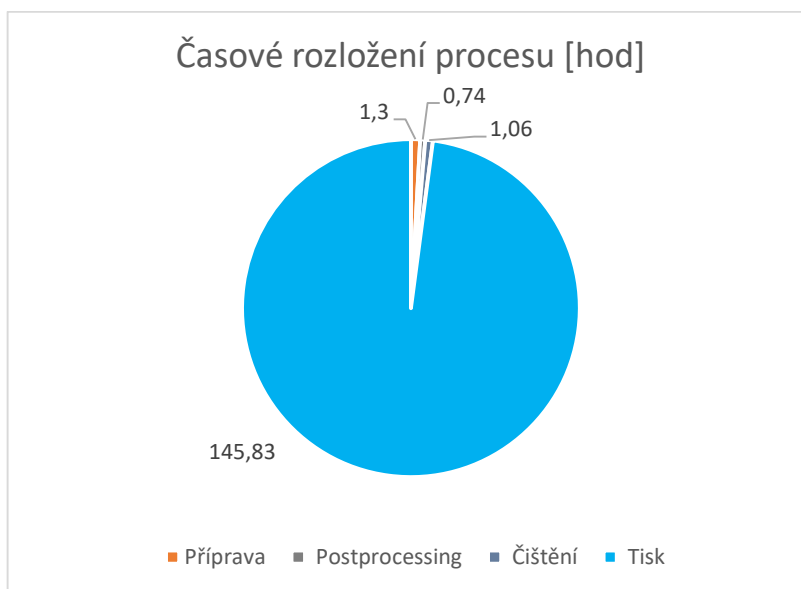
Tabulka 10 - Shrnutí časů operačních úseků a jejich průměrné hodnoty



Obrázek 28 - Diagram rozložení časů

Jak je zřejmé z tab. 10, lidská spotřeba času se pohybuje v rozmezí od 2,91 – 3,41 hodin. Pro kalkulaci bude využita průměrná hodnota 3,12 hodin. Jak z tabulky, tak z grafu je patrné, že časově nejnáročnější je úsek přípravy tisku, dále čištění a poslední je postprocessing.

Aby byl výpočet přesný, je třeba také započíst dobu, po kterou tiskárna běží. Jedná se o dobu od stisknutí tlačítka start, až do doby, než dojde k poslednímu průchodu laseru. Při současném projektu byla doba tisku rovna 145,83 hodin. V níže uvedeném grafu je zobrazeno o jak velkou část procesu se jedná. Z grafu je patrné, že se jedná o majoritní část procesu. To však nemusí být vždy pravda, délka tisku je závislá na množství a složitosti výtisků, s ohledem na náklady je však lepší mít co nejvíce zaplněnou paletu, což značí vyšší dobu tisku.

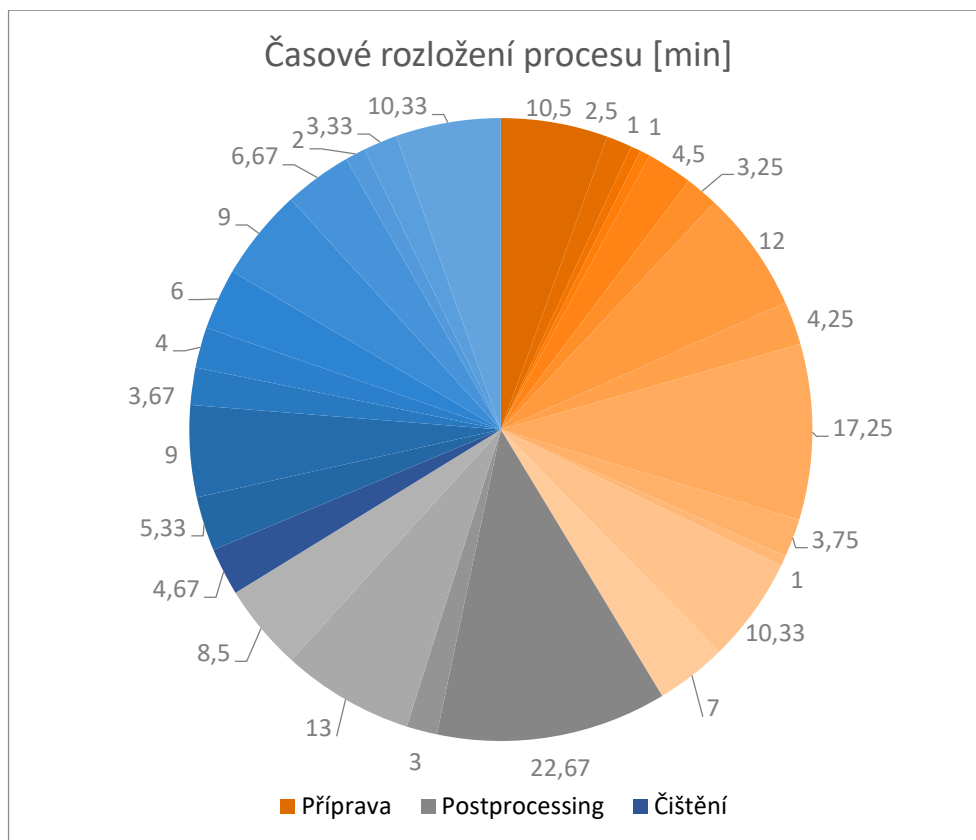


Obrázek 29 - Časové rozložení procesu vč. tisku

Pro názornost byla vytvořena tab. 11, kde bylo všem úkonům přiřazeno časové rozpětí a průměrná hodnota. Rozpětí bylo přiřazeno tam, kde to mělo smysl, tzn. kde nebyly časy stejné anebo kde nebyl dostatek dat pro vytvoření rozpětí. Časy v tabulce jsou uvedeny v minutách.

č.ú.	Operační úkon	Rozpětí tmin-tmax [min]	tpřůměr [min]
00	Příprava modelu v sw [hod]	3-4	3,5
<b>Příprava</b>			
10	Zapnutí stroje		
	Nahrání dat	7-14	10,50
	Reference os a nuly	2-3	2,50
	Nastavení overdose faktoru		1,00
	Nastavení výšky zásobovací komory		1,00
	Oblečení ochranných pomůcek	4-5	4,50
	Založení palety	2-4	3,25
	Založení a nastavení nanašeče	6-16	12,00
	Připojení odpadu	3-7	4,25
	Naplnění práškem z pytle	10-25	17,25
	Promíchání prášku	3-6	3,75
	Přesun do tiskové komory		1,00
	Inertizace	10-11	10,33
	Nastavení první vrstvy	6-8	7,00
<b>Tisk</b>		<b>Vypočtená doba tisku</b>	<b>Reálná doba tisku</b>
20	Tisk [hod]	132,76	145,83
<b>Postprocessing</b>			
30	Očištění a vyjmutí palety	22-24	22,67
	Omytí palety	2-4	3,00
	Oddělení výtisků od palety	10-16	13,00
	Důkladné očištění výtisků	7-10	8,50
<b>Čištění</b>			
40	Zametení volného prášku do odpadu	3-7	4,67
	Oblečení ochranných pomůcek	5-6	5,33
	Vysátí přípravné komory a hadic	7-10	9,00
	Vyčištění závitových děr	3-5	3,67
	Výměna nástrojů a hadic		4,00
	Mytí a výměna rukavic		6,00
	Vytření komory čističem		9,00
	Vysátí a vytření tiskové komory	6-7	6,67
	Vysátí odtahu spalin		2,00
	Otření volných povrchů	3-4	3,33
	Vyčištění vysavače	8-15	10,33

Tabulka 11 - Přehled časových rozpětí a časového průměru úkonů



Obrázek 30 - Časová skladba úkonů

Jak je zřejmé z tab. 10 a 11, některé časy se vzájemně liší více než jiné. Jelikož do procesu vstupuje celá řada vnějších vlivů, je často obtížné říci, které konkrétní faktory měly vliv na daný čas, nicméně je možné vypsát nejběžnější z nich.

U přípravy tisku můžeme začít nahráváním dat. Hlavním faktorem je složitost stavby, přičemž složitější stavby se mohou nahrávat až hodinu. Rovněž má vliv výpočetní výkon počítače v tiskárně. Dalším krokem s výrazným vlivem na čas je nastavování nanašeče. Zde má velký vliv několik faktorů. Nanašeč se nastavuje tak, aby byla mezi ním a paletou nepatrná škvíra, na což má velký vliv deformace palety. V závislosti na prohnutí palety může obsluha strávit u nastavování dlouhé minuty. Lidský faktor zde hraje též důležitou roli: když se obsluze povede napoprvé nastavit vhodnou výšku, je celý krok o poznání kratší. Čas se zde dá ušetřit také tím, pokud je obsluha dostatečně zdatná a zkušená, nemusí si nastavovat výšku nanašeče na kovovém břítu, ale rovnou na gumovém. Nejdélším krokem může být plnění komory práškem. Zde se dá velice snadno nabrat čas, protože manipulace s plným pytlím je velice náročná. Hlavní vliv má to,

jestli je obsluha schopna naplnit zásobovací komoru z jednoho pytle či nikoliv. Jak je již dříve popsáno, pytel se vkládá do přípravné komory, která je pak zaplněna inertním plynem, pokud tedy nepostačuje jeden pytel, je třeba tento proces opakovat. V případě, že by se jednalo o recyklovaný materiál, je doba plnění ještě delší, jelikož dochází k plnění z kontejneru horním ventilem. V závislosti na materiálu může takovéto plnění trvat až hodinu, jelikož prášek padá velice pomalu. Posledním výrazným faktorem je inertizace a nastavování první vrstvy. V závislosti na obsluze zde totiž může dojít ke dvěma scénářům. Prvním scénářem je nastavení první vrstvy ještě v přípravné komoře. Tento postup se využívá, protože je zde lépe vidět na paletu. Nutno však podotknout, že pokud se nastavuje mimo tiskovou komoru, nelze tiskovou komoru inertizovat. Zde nastává druhý scénář. Je možné nastavit první vrstvu v tiskové komoře, kde je na paletu sice hůře vidět, ale je možné pustit inertizaci hned po přejetí paletou do tiskové komory. U nastavování první vrstvy lze také snadno nabrat čas, jelikož je třeba, aby vrstva byla jen lehce průsvitná, a to se ne vždy podaří na první pokus.

Postprocessing obecně je velice citlivý na množství kusů v dávce a složitosti dílů. Pokud je dílů větší množství a/nebo mají složitou geometrii, je obtížné z nich vymést prášek a trvá to delší dobu. Totéž platí pro oddělování a mytí dílů. V případě většího množství čas rychle narůstá.

Proces čištění je, oproti předchozím, nejvíce závislý na lidském faktoru. Proces sám o sobě je velice přímočarý a není zde příliš proměnných. Čištění je závislé na zkušenosti a pečlivosti obsluhy. Pokud je obsluha méně pečlivá, dokáže sice celý proces čištění zkrátit o několik minut, nicméně by to mohlo mít negativní dopad na tisk, respektive na mechanické vlastnosti výtisku, proto je důležité důkladně tiskárnu vyčistit, hlavně v případě změny materiálu, kde by mohlo dojít ke kontaminaci materiálu. Pokud se bude při dalším tisku používat stejný materiál, dá se celkový čas zkrátit například o výměnu nástrojů, hadic a rukavic, jelikož nedochází k již zmíněné kontaminaci. Časově náročnější zde může být čištění vysavače, jelikož při opomenutí/špatném vyčištění dochází k zatvrdnutí prášku v nádrži a vyčištění takovéto nádrže bývá velice náročné.



## 7. Technicko-ekonomické zhodnocení procesu

V této kapitole je popsán nákladový model procesu PBF. Veškeré výpočty a grafy byly prováděny v programu MS Excel. Nejprve budou uvedena vstupní data, poté konkrétní výpočty a na závěr shrnutí nákladového modelu.

### 7.1 Vstupní hodnoty

Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, model vychází z projektu tisku zkušebních těles, na kterém probíhala časová studie sloužící jako podklad pro následující výpočty. V kalkulaci se počítá se všemi nákladovými položkami, které vstoupily do procesu, jako jsou stroje, časová náročnost apod. Konkrétně se jedná o vstupy:

- Ceny použitých strojů
- Náklady na energie
- Náklady na servis
- Náklady na náhradní díly
- Náklady na mzdy
- Náklady na prostor
- Spotřeba času
- Náklady na sw
- Směnnost

Nejvýznamnější nákladovou položkou jsou pořizovací náklady strojů. V kalkulaci počítáme s následujícími stroji:

- Concept Laser M2 Cusing – 22 000 000 Kč
- Generátor plynu – 314 000 Kč
- Prosévačka – 737 964 Kč
- Kompresor – 130 000 Kč
- Pec – 2 399 366 Kč

Tento náklad se do kalkulace promítne ve formě odpisů. Všechny výše uvedené stroje spadají do druhé odpisové skupiny a odepisují se po dobu pěti let. Jelikož zařízení nejsou nová, počítá se v kalkulaci s odpisy od druhého roku a dále.

Concept Laser M2 Cusing				
Cena	22 000 000 Kč	1. rok	další roky	
Odpisová hodnota		2 420 000	4 895 000	Kč/rok
Generátor plynu				
Cena	314 000 Kč	1. rok	další roky	
Odpisová hodnota		34 540	69 865	Kč/rok
Prosévačka				
Cena	737964 Kč	1. rok	další roky	
Odpisová hodnota		81 177	164 197	Kč/rok
Kompresor				
Cena	130 000 Kč	1.rok	Další roky	
Odpisová hodnota		14 300	28 925	Kč/rok
Pec				
Cena	2 393 600 Kč	1.rok	Další roky	
Odpisová hodnota		263 296	532 576	Kč/rok

Tabulka 12 - Hodnoty odpisů strojů

Aby bylo možné přiřadit odpisy k celkovým nákladům na stavbu, bylo nezbytné přepočítat odpisy a servis strojů dle fondu pracovní doby. Pro výpočet byl využit maximální využitelný fond. Ten zní následovně:

- Jednosměnný provoz                      2 040 hod/rok
- Dvousměnný provoz                      3 920 hod/rok
- Třisměnný provoz                        5 700 hod/rok

Jelikož při provozu dochází k odstávkám strojů, u třisměnného provozu byl využitelný fond ponížen o 20 % tedy:

- Třisměnný provoz vč. odstávek        4 560 hod/rok

K lepšímu přepočtu byly odpisy přepočítány na hodinovou sazbu, aby bylo možné efektivně reagovat na měnící se dobu tisku. Po přepočtu vypadá tabulka následovně:

Concept Laser M2 Cusing				
Směnnost	1	2	3	
Odpisová hodnota	2 399,51	1 248,72	1 073,46	Kč/hod
Generátor plynu				
Směnnost	1	2	3	
Odpisová hodnota	34,25	17,82	15,32	Kč/hod
Prosévačka				
Směnnost	1	2	3	

Odpisová hodnota	80,49	41,89	36,01	Kč/hod
<b>Kompresor</b>				
Směnnost	1	2	3	
Odpisová hodnota	14,18	7,38	6,34	Kč/hod
<b>Pec</b>				
Směnnost	1	2	3	
Odpisová hodnota	261,07	135,86	116,79	Kč/hod

Tabulka 13 - Hodnoty odpisů přepočtené dle hodin

Do odpisů vstupuje další položka, kterou je software pro přípravu stavby. Pořizovací cena softwaru je 1 106 700 Kč a spadá do první odpisové skupiny. Přičemž odpisy jsou v první roce v hodnotě 221 340 Kč a v dalších letech 442 680 Kč.

<b>Software</b>				
Směnnost	1	2	3	
Odpisová hodnota	217,00	112,93	97,08	Kč/hod

Tabulka 14 - Odpisy softwaru

Další významnou nákladovou položkou je servis strojů. Náklad na servis se stanovuje z pořizovací ceny a roční náklad na servis byl procentuálně stanoven na 5 %. Stejně jako v případě odpisů je třeba přepočítat náklady na servis na hodinovou položku, aby se lépe stanovovala cena stavby.

<b>Concept Laser M2 Cusing</b>				
Směnnost	1	2	3	
Servis	539,22	280,61	241,23	Kč/hod
<b>Generátor plynu</b>				
Směnnost	1	2	3	
Servis	7,70	4,01	3,44	Kč/hod
<b>Prosévačka</b>				
Směnnost	1	2	3	
Servis	18,09	9,41	8,09	Kč/hod
<b>Kompresor</b>				
Směnnost	1	2	3	
Servis	9,31	4,85	4,17	Kč/hod
<b>Pec</b>				
Směnnost	1	2	3	
Servis	58,67	30,53	26,25	Kč/hod

Tabulka 15 - Servisové položky

Další náklady budou přepočítané dle časové spotřeby na cenu stavby. Časová spotřeba stavby je k nahlédnutí v tab. 16. V tabulce 11 lze vidět, že je rozdíl i v době tisku. V našem případě byl vypočítaný čas 132,76 hodin a reálný 145,83 hodin. To bylo způsobené již zmíněným QM modulem. Při stanovení ceny pro zákazníka je důležité na tento fakt pamatovat.

Celkový čas tisku	148,95	hod
Čas obsluhy	3,12	hod
Tisk	145,83	hod

Tabulka 16 - Časová spotřeba procesu

Pro pracoviště se uvažuje stejný počet zaměstnanců pro každou směnu (jeden zaměstnanec). Platové ohodnocení je započtené včetně veškerých nákladů na zaměstnance a je rovno 80 880 Kč měsíčně. Aby se dala zakázka správně nacenit, je osobní náklad úměrný délce lidské práce na stavbě, v tomto případě tedy 3,06 hodin.

Zaměstnanci		
Počet pracovníků	1	ks
Mzda	60 000	Kč
Osobní náklad	80 880	Kč
Hodinový náklad	481,4	Kč/hod
Náklad za stavbu	1 502	Kč

Tabulka 17 - Přehled nákladů na osobní náklady

K dalším položkám patří například laser, nanašeč a stavební paleta. Jedná se o části, které mají omezenou životnost a v celém cyklu životnosti tiskárny dojde k jejich výměně. V případě nanašeče a palety dochází k častější výměně, než je tomu v případě laseru. U palety se ještě lze setkat s nákladem na oprávnění. Započítává se sem cena provozu obráběcího stroje, nástroj a náklad na obsluhu stroje. Jak je to s životností a cenou jednotlivých dílu je uvedeno níže:

Laser			
Životnost	10 000	hod	
Cena	72 300	Kč	
Cena za stavbu	1054,4	Kč	
Nanašeč			
Životnost	200	hod	nebo 1 stavba
Cena	400	Kč	
Cena za stavbu	400	Kč	
Paleta			

Životnost	50 staveb		
Náklad na renovaci	550	Kč	
Cena	8 316	Kč	
Cena za stavbu	716,32	Kč	

Tabulka 18 - Přehled dílů s omezenou životností

Nezbytným nákladem každé výroby je elektrická energie. Ačkoliv se nejedná o příliš velký náklad v porovnání s předchozími, i zde může dojít k nárůstu nákladů do vyšších částek, jelikož je energie přímo závislá na objemu produkce. Náklad na elektrickou energii je také přímo úměrný trhu s energiemi, a proto se může stát, že by se náklad mohl stát jednou z majoritních položek. Pro výpočet bylo třeba energie rozdělit dle využití stroje. V přiložené tabulce je rozdělení na energie, které se přímo podílejí na tisku a na externí energie. Do první kategorie byla zařazena energie spotřebovaná při fungování laseru, tiskárny (pohybový mechanismus, počítač, světlo), generátor plynu a kompresor. Jelikož generátor a kompresor jedou neustále, byly také vyčleněny do vlastní kategorie. Externí energií je rozuměno energie spotřebovaná na prosévání a tepelné zpracování. Prosévání v této kalkulaci nefiguruje, později však bude provedena zvláštní kalkulace právě v případě využití prosévačky.

Spotřeba energie		
Cena za kW/h	7,8	Kč
Concept Laser M2 Cusing	1,4	kW
Laser	1,4	kW
Doba využití	145,83	hod
Celková spotřeba	2,8	kW
<b>Cena za stavbu</b>	<b>3 184,9</b>	<b>Kč</b>
Generátor plynu	80	W
Kompresor	4	kW
Doba využití	148,95	hod
Celková spotřeba	4,08	kW
<b>Cena za stavbu</b>	<b>4 736,6</b>	<b>Kč</b>
Prosévačka	500	W
Doba využití	4,76	hod
<b>Cena za stavbu</b>	<b>18,6</b>	<b>Kč</b>
Pec	15	kW
Doba využití	7	hod
<b>Cena za stavbu</b>	<b>819</b>	<b>Kč</b>

Tabulka 19 - Přehled spotřeby e. energie

Jelikož nejsou vedeny záznamy o spotřebě elektrické energie, tepla apod, náklad za prostory byl vyhotoven zprůměrováním obvyklých cen industriálních objektů v Praze. Pro kalkulaci byla využita sazba třisměnného provozu. Kalkulace vychází z následujících hodnot:

Náklady na prostory			
Užitná plocha	30	m <sup>2</sup>	
Cena za m <sup>2</sup>	250	Kč	
Hodinová sazba dle směnnosti v Kč	1	2	3
Hns [Kč/hod]	44,1	23	19,7
Cena za stavbu	2 939,8	Kč	

Tabulka 20 - Náklady na prostory

Cena materiálu je u stavby velmi závislá na množství výtisků. Samozřejmě by se mohlo kalkulovat s celkovou kapacitou zásobníku, nicméně už tak drahý tisk by byl pro zákazníka významně dražší, proto je dobré, dle dat z tiskárny, kalkulovat s přesným množstvím materiálu. Cena materiálu je také závislá na druhu materiálu a dodavateli. Konkrétní vstupy jsou v přiložené tabulce níže:

Materiál		
Cena materiálu za kg	2 880	Kč
Spotřeba na stavbu	38,5	kg
Cena za stavbu	110 880	Kč

Tabulka 21 - Náklady na materiál

Aby byla zajištěná dostatečná bezpečnost, čistota apod., je třeba obsluhu stroje podporovat spotřebním materiálem. Pod tím si můžeme představit ochranné obleky, filtry, papírové utěrky, čističe, jednorázové rukavice apod. Tyto položky samy o sobě nejsou příliš nákladné, ale jejich spotřeba je u některých položek značná. Celkový náklad na tyto položky byl vyčíslen na 50 000 Kč za rok a pro jednu stavbu to dělá 76,5 Kč.

Spotřební materiál		
Roční cena	50 000	kč
Hodinová cena	25	kč
Cena za stavbu	76,5	kč

Tabulka 22 - Náklady na spotřební materiál

## 7.2 Kalkulace

Abychom se dostali k celkovému nákladu na stavbu, je třeba sečíst všechny dílčí náklady. Níže budou uvedeny všechny dílčí výpočty a následně celkový náklad.

Odpisy byly nejprve rozděleny do tří skupin podle doby užívání. Tím rozumíme, že tiskárnu, generátor a kompresor využíváme po celou dobu procesu a software a pec je potřeba jen na zlomek celkového času. Rovněž je nutné podotknout, že u softwaru dochází ke kalkulaci dle jednosměnného provozu, zatímco u ostatních dle třisměnného. Proto:

Odpisy		
Concept Laser M2 Cusing	1 073,46	Kč/hod
Generátor plynu	15,32	Kč/hod
Kompresor	6,34	Kč/hod
Doba užívání	148,95	hod
Součet odpisů	163 119,52	Kč
Software	217	Kč/hod
Doba užívání	4	hod
Odpis na stavbu	868	Kč
Pec	143	Kč/hod
Doba užívání	7	hod
Odpis na stavbu	817,6	Kč
Celkový součet odpisů za stavbu	164 805	Kč

Tabulka 23 - Součet odpisových položek

Analogicky dojde k výpočtu servisních nákladů. Jak je již zmíněno výše, servisní náklady jsou stanoveny jako 5 % část z pořizovací ceny. Pro software není servisní položka stanovena. Servisní položka u kompresoru byla evidována a nebyla tedy dopočítána procentuálně a její hodnota je 19 000 Kč ročně.

Servis		
Concept Laser M2 Cusing	241,46	Kč/hod
Generátor plynu	3,44	Kč/hod
Kompresor	4,17	Kč/hod
Doba užívání	148,95	hod
Pec	26,25	Kč/hod
Doba užívání	7	hod
Celkový součet servisních nákladů za stavbu	37 248	Kč

Tabulka 24 - Součet servisních položek

V rámci energií došlo opět k rozdělení dle doby využívání. Jedna skupina, skládající se ze spotřeby energie tiskárny a laseru, je násobena dobou tisku. Druhá skupina, energie spotřebovaná generátorem plynu a kompresoru, je násobena dobou celého procesu. Pec je násobena dobou svého provozu.

Energie		
Concept Laser M2 Cusing	10,92	Kč/hod
Laser	10,92	Kč/hod
Kompresor	4,17	Kč/hod
Doba užívání	145,83	hod
Součet energií	3 184,9	Kč
Generátor plynu	0,6	Kč/hod
Kompresor	31,2	Kč/hod
Doba užívání	148,95	hod
Součet energií	4 736,61	Kč
Pec	117	Kč/hod
Doba užívání	7	hod
Součet energií	819	Kč
Celkový náklad energií za stavbu	8 740,5	Kč

Tabulka 25 - Součet nákladů na energii

Po součtu nákladů za náhradní díly se dostaneme k následujícím hodnotám:

Náhradní díly		
Laser	1 054,40	Kč
Nanašeč	400	Kč
Paleta	716,32	Kč
Celkový součet nákladů za stavbu	2 171,62	Kč

Tabulka 26 - Součet nákladů za náhradní díly

Nákladové položky jako mzdy, materiál, spotřební materiál nebo prostory již byly výše rozepsané, proto zde bude jen souhrnný přehled.

Náhradní díly		
Osobní náklad	1 598,34	Kč
Materiál	110 880	Kč
Spotřební materiál	76,47	Kč
Prostory	2 939,8	Kč

Tabulka 27 - Souhrn osobních nákladů, materiálů, spotřebního materiálu a prostor

Celkový součet nákladů za celou stavbu pak bude vypadat takto:



Celkové náklady		
Odpisy	164 805	Kč
Servis	37 248	Kč
Energie	8 740,54	Kč
Náhradní díly	2 171,62	Kč
Spotřební materiál	76,5	Kč
Prostor	2 939,8	Kč
Osobní náklad	1 598,34	Kč
Materiál	110 880	Kč
Celkový součet nákladů	328 459,94	Kč

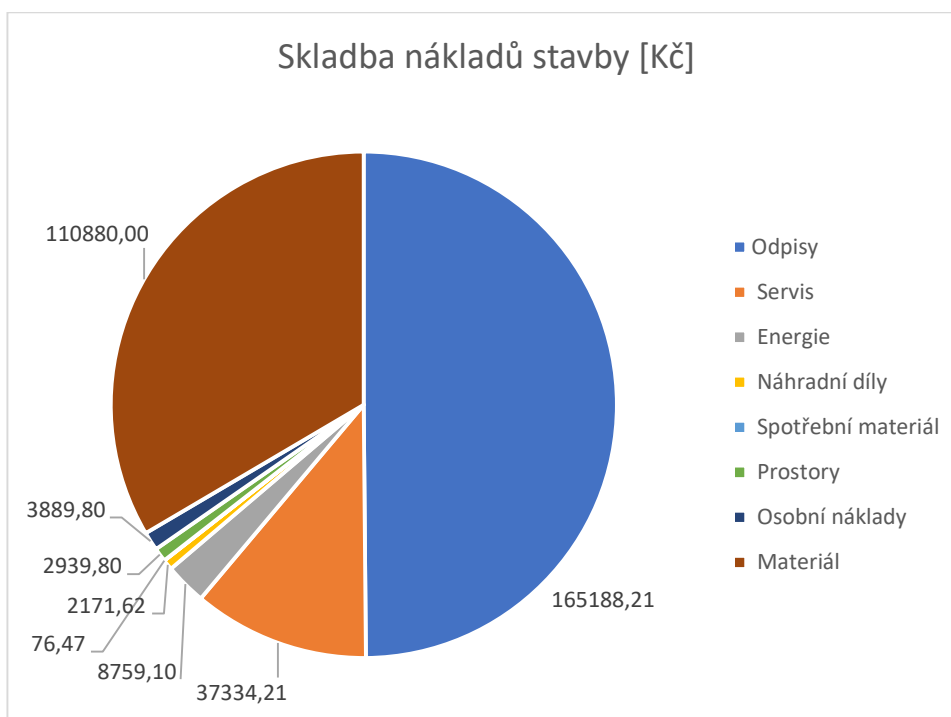
Tabulka 28 - Celkový součet nákladů

Aby byl názornější podíl odpisů a externích vstupů na celkových nákladech procesu, byl vytvořen krátký přehled nákladů bez těchto položek. Rovněž byly přepočítány náklady na jeden kus. Paleta byla tvořena v tomto případě 42 kusy.

Cena stavby bez odpisů	163 654	Kč
Cena stavby	328 459	Kč
Cena za kus	7 820	Kč

Tabulka 29 - Přehled rozepsaných celkových nákladů

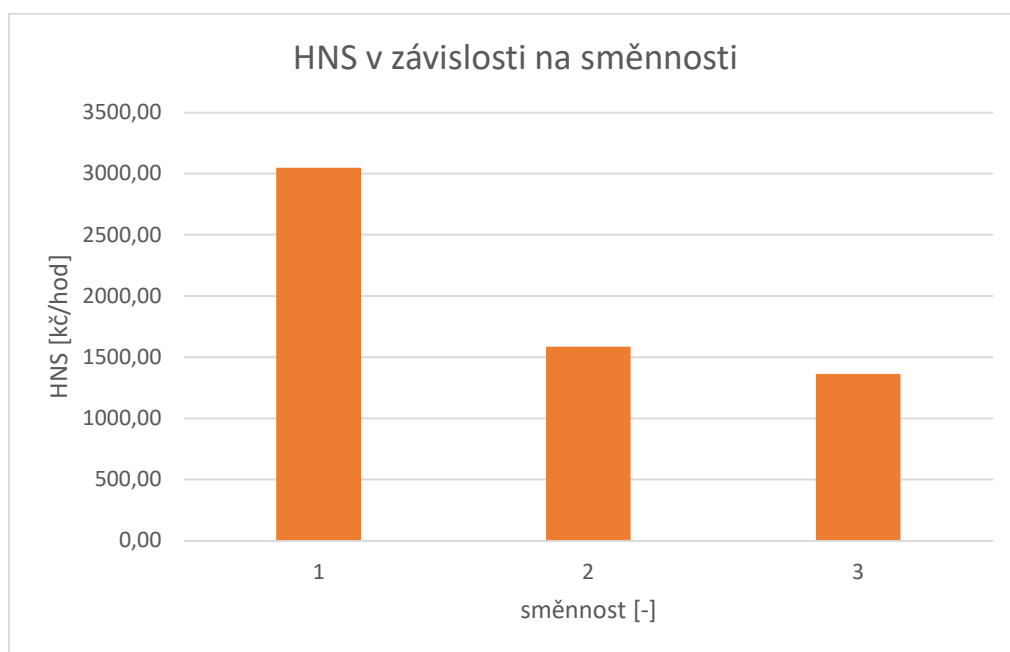
Pro lepší názornost složení nákladů byl vytvořen koláčový diagram, kde je jednotlivé zastoupení nákladů vyjádřeno v procentech.



Obrázek 31 - Diagram procentuálního rozložení nákladů

Z grafu je patrné, že největší nákladovou položkou jsou odpisy. Druhé místo drží náklady na materiál a třetí jsou náklady na servis. Další náklady v součtu tvoří trochu více než 5 %. Je nutno podotknout, že toto rozložení platí pro tento projekt a v případě jiných projektů se může rozložení měnit v závislosti na vstupních datech.

Aby si čtenář udělal představu, jak velký vliv má směnnost při výpočtu nákladů výroby, byl vytvořen graf nákladů v závislosti na směnnosti a hodinové sazbě. Jedná se jen o ilustrační graf, proto byly zahrnuty jen ty náklady, kde to má smysl, jako odpisy, servis nebo náklady na prostory. Další náklady zahrnuty nebyly.



Obrázek 32 - Sloupcový graf závislosti HNS na směnnosti

[53, 54]

Výše uvedená kalkulace se týká pouze tohoto konkrétního projektu, kde byl využit nový prášek. V praxi obvykle dochází k využití recyklovaného prášku s ohledem na snížení nákladů za materiál. Jak se kalkulace změní je uvedeno v následující kapitole.

## 8. Recyklace

Jako základ pro kalkulaci byla provedena analýza spotřeby času při recyklaci. Prosévání obvykle trvá v řádech hodin a je nutná neustálá přítomnost obsluhy. V kalkulaci se počítá s následující časovou spotřebou:

Recyklace		
Připojení kontejnerů	0,25	hod
Inertizace	0,5	hod
Zapnutí prosévání	4	hod
Odpojení kontejnerů	0,1	hod
Prosévání celkem	4,76	hod

Tabulka 30 - Časová spotřeba prosévání

Tab. 30 se však nedá použít univerzálně pro veškeré prosévání, jelikož délka prosévání závisí na celé řadě faktorů. Hlavním z nich je typ prosévačky. Dle typu prosévačky je možné mít ve výbavě různé velikosti odpadu, jiný přívod inertního plynu, jiné možnosti síta apod. Prosévačka využívaná na pracovišti, CL-QMS powder, je stroj velice náročný na obsluhu a časovou spotřebu a v porovnání s jinými typy prosévaček se jedná o horší stroj, jelikož je třeba každých 55 minut zapínat prosévací cyklus a každých 10 minut je třeba kontrolovat, zdali se neucpal přepad. Další neméně významným faktorem je, jak důkladně chceme mít prášek prosetý. Prášek nelze perfektně prosít při prvním prosévání, jelikož část dobrého prášku je odvedena do přepadu spolu se spečenými kusy prášku, štetin a podobně. Z tohoto důvodu je třeba provést více cyklů prosetí, aby se obsah odpadního prášku co nejvíce snížil. Aby obsluha netrávila obsluhou prosévačky více času, než je nezbytně nutné, je dobré si interně ujasnit, jak velké procento odpadu jsme v prášku ochotni akceptovat. Kolik dobrého prášku odejde do odpadu rovněž záleží na několika faktorech. Nejvlivnějším faktorem je druh síta. Čím jemnější síto bude, tím spíše se bude prášek hromadit na sítu a odcházet do přepadu. Tomu napomáhá i tlak inertního plynu, který může při nahromadění prášku rozfouknout hromádku prášku, který pak vnikne do přepadu. Aby se tyto ztráty minimalizovaly, je možné uplatnit několik postupů, které to umožňují. Nejprve je dobré si řádně nastudovat, co od stroje očekávám, aby bylo možné adekvátně stroj vybrat. Pokud by stroj nedosahoval potřebné výkonosti, mohla by časová spotřeba překročit únosnou mez a v takovémto případě by bylo dobré uvažovat o koupi jiného stroje. Dále je

dobré si vyzkoušet jaké síto je dobré na jaký materiál, aby nedocházelo ke zbytečnému hromadění prášku kvůli špatně zvolené velikosti. Na hromadění prášku může mít vliv i štětec použitý při ometání prášku z výtisku. Při opakovaném používání dochází k roztržení štětce a uvolňování vláken. Tato vlákna mohou při prosévání ucpávat otvory v sítu a opět dochází k hromadění prášku. Při prosévání je nutné pravidelně kontrolovat přepad, jelikož když se naplní, celé prosévání postrádá smysl. Aby se minimalizovala frekvence kontrol, je možné přepad nahradit přepadem větším.

Pro kalkulaci je tedy nutné stanovit náklady. Postup je podobný tomu v kapitole sedm, s tím rozdílem, že se připisují náklady na prosévačku a přepočítávají náklady na materiál.

Prosévačka	hns [Kč/hod]	za cyklus prosévání [Kč]
Odpisy	80	383
Energie	4	19
Servis	18	86
Osobní náklady	481	2 291
Náklady na ochrannou atmosféru	61	291
Celkový náklad na cyklus		3 070

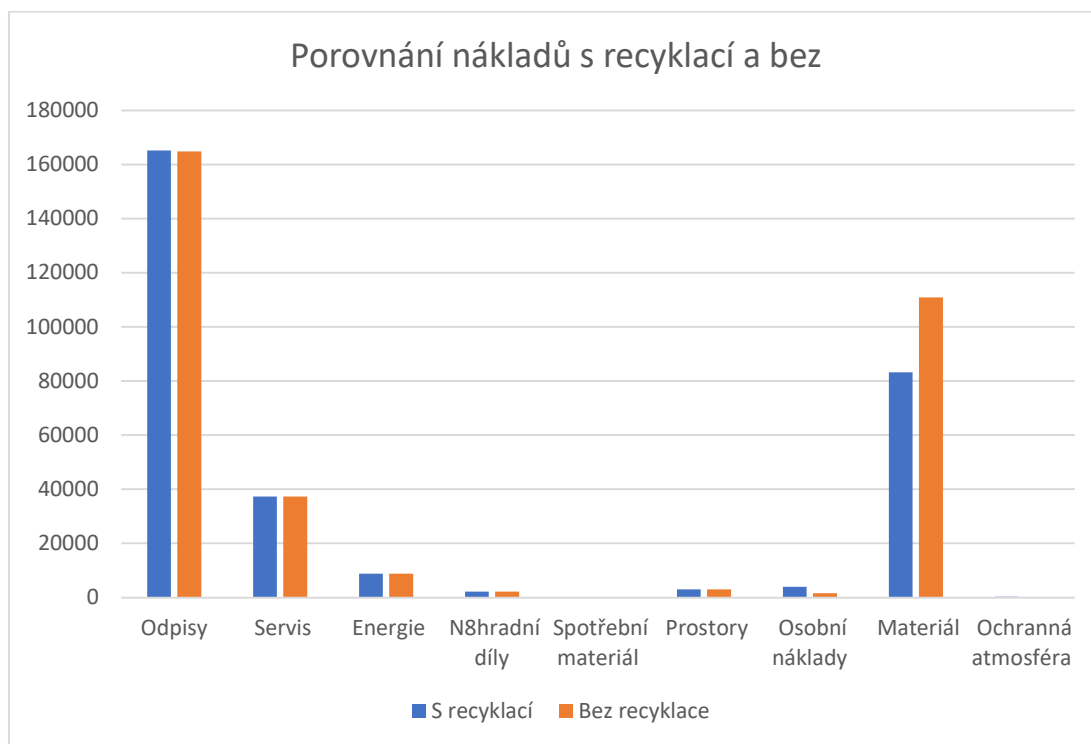
Tabulka 31 - Náklady připadající na prosévačku

Požizovací cena stroje je 737 964 Kč. Odpisy prvního roku byly 81 177 Kč a druhého 164 197 Kč. Spotřeba energie je vyčíslena na 500 W. Jelikož prosévačka nemůže jet bez dozoru, je kalkulace vztažena na jednosměnný provoz.

	Celkové náklady s recyklací [Kč]	Celkové náklady s novým práškem [Kč]
Celkové odpisy	165 188	164 805
Celkový servis	37 334	37 248
Celkové energie	8 759	8 740
Celkové osobní náklady	3 889	1 598
Materiál	83 160	110 880
Náhradní díly	2 171	2 171
Spotřební materiál	76	76
Náklady na místnost	2 939	2 939
Náklady na plyn	290	-
Celkové náklady na stavbu	303 810	328 460

Tabulka 32 - Změna nákladů oproti tisku s novým práškem

Jak je z tab. 32 zřejmé, největší změnou prošly osobní náklady a náklady na materiál. Osobní náklady se zvedly výrazně z toho důvodu, že celkovou dobu obsluhy zvedly více než dvojnásobně. Proto je třeba, v případě nacenění zakázky a stanovení doby dodávky, uvažovat s touto skutečností a počítat, že se předpokládaná doba může o několik hodin protáhnout. Náklad na materiál se vypočítal jako 75 % z ceny nového materiálu. Jak je vidět, jedná se o výraznou úsporu v celkovém součtu nákladů. Jedná se také o hlavní důvod využití prosévaček. V současné době probíhá celá řada studií (např. [55]), ve kterých se zkoumá vliv recyklace na mechanické vlastnosti výtisku. Z výsledků zmíněné studie se dá dojít k závěru, že mechanické vlastnosti mají s opakovanou recyklací tendenci klesat. Je tedy pak na osobním uvážení a potřebách, zdali si mohou dovolit využít recyklovaný materiál a ušetřit, či použít materiál nový.



Obrázek 33- Srovnání nákladů s recyklací a bez

V příloze 3 lze nalézt náhled kalkulačního nástroje. Samotný kalkulační nástroj jsme se po interní dohodě rozhodli nezveřejňovat.

## 9. Závěr

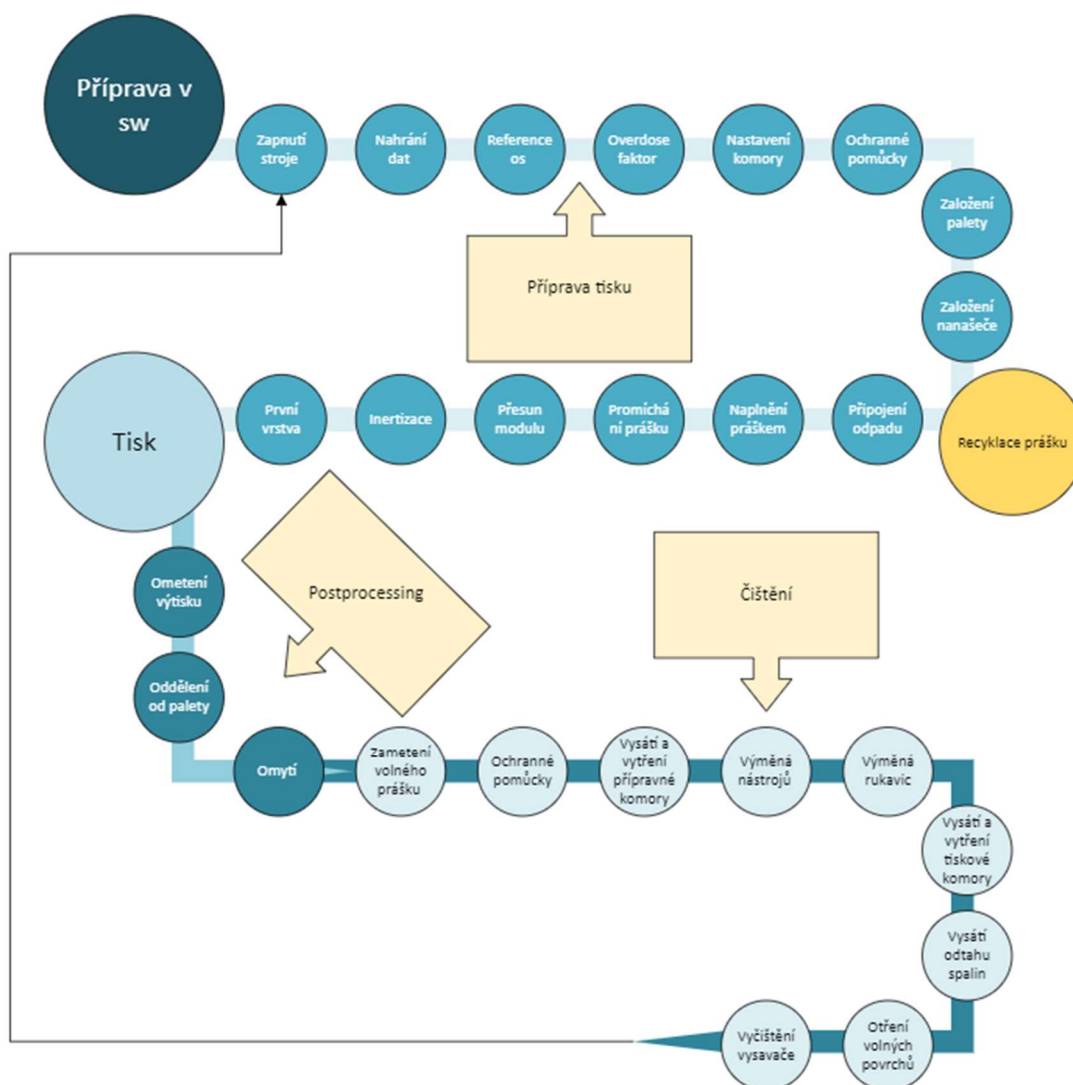
Cílem této diplomové práce bylo představení technologií pro aditivní výrobu s kovovými materiály, shrnutí bezpečnostních rizik a opatření při procesu LB-PBF, charakteristika celého procesu a stanovení časové spotřeby jednotlivých úseků a návržení kalkulačního nástroje pro stanovení nákladů technologie LB-PBF.

V teoretické části je popsána historie PBF technologie a principy technologií aditivní technologie využívajících kovové materiály. U technologie PBF je uveden podrobný princip a výhody a nevýhody technologie. Dále jsou zde popsány možnosti výroby materiálů a druhy nejčastěji používaných materiálů. V poslední kapitole teoretické části je popsána bezpečnost a zdraví při procesu LB-PBF.

V praktické části je nejprve představena použitá tiskárna Concept Laser M2 Cusing, v návaznosti je představen projekt, na kterém byla praktická část realizována. V další části je charakterizován celý proces PBF, na kterém byla provedena časová studie. Na základě časové studie byl vytvořen kalkulační nástroj, který posloužil ke kalkulaci nákladů celého procesu.

Kapitola bezpečnost a zdraví se zabývá představením zdrojů rizika při procesu tisku a jak těmto rizikům předcházet. Největší riziko představuje pro obsluhu a také pro její okolí kovový prášek, jelikož se ve velké většině jedná o výbušné a zdraví škodlivé látky. Z tohoto důvodu je nutné při jakékoliv manipulaci s nimi využívat ochranných pomůcek jako je obličejová maska, rukavice nebo oblek. Pro ochranu okolí je třeba prášek skladovat v prostorách pro to určené a dostatečně zabezpečené, tedy aby nebyl vystaven zdroji tepla, ale ani vodě, a aby nemohlo dojít ke kontaktu s neproškoleným personálem. Při užívání tiskárny a jejího příslušenství je nutné dodržovat postupy uvedené výrobcem a veškeré interní bezpečnostní opatření, jelikož při procesu tisku se obsluha může setkat s elektrickým proudem, laserem, tlakovými lahvemi apod. Z toho pramení celá řada možných úrazů a nebezpečí, jako například popálení, exploze nebo úraz elektrickým proudem. Do přílohy byly přidány plakáty se shrnutím nebezpečí a bezpečnostních opatření na pracovišti.

Charakteristika procesu popisuje veškeré úseky a úkony potřebné k provedení celého procesu tisku. Celý proces je započat přípravou tisku, což zahrnuje nastavení tiskárny a nahrání dat, založení palety, naplnění tiskárny materiálem, nastavení nanašeče a nastavení první vrstvy. Další úsek je úsek postprocessingu, který popisuje očištění výtisku, oddělení od palety a následné omytí výtisků. Úsek čištění zahrnuje zametení, vysátí a vytření veškerého volného prášku z přípravné i tiskové komory a výměnu nástrojů a rukavic.



Obrázek 34 - Sled úkonů procesu PBF

Časová studie ukázala, že obsluha nejvíce času stráví přípravou tisku. Zde je časově nejnáročnější nahrávání dat s ohledem na velikost souboru, nastavení nanašeče, první vrstvy, kde je velký vliv zkušenosti a zručnosti obsluhy, a plnění práškem, kde hraje největší roli to, zdali je možné doplnit potřebné množství

z jednoho pytle či nikoliv. U postprocessingu trvá nejdéle očištění výtisku na paletě, přičemž délka úkonu je závislá na složitosti výtisku. U čištění je nejdelší vysávání a vytírání komor, kde je největším vlivem zručnost a poctivost obsluhy. V porovnání s dobou tisku se lidská spotřeba času může zdát být nicotná, nicméně jedná se o nezbytnou část procesu, proto ji bylo nutné zdokumentovat. Časová spotřeba jednotlivých úseků je:

- Příprava tisku	1,3 hodiny
- Postprocessing	0,74 hodiny
- Čištění	1,06 hodina
- Tisk	145,83 hodin

Časová spotřeba se ovšem může měnit i s použitým materiálem. V závislosti na stavu a druhu materiálu se může lišit způsob plnění zásobovací komory, případně využití ochranného plynu. Pokud se k tisku využívá recyklovaný prášek nebo byl nový prášek místo pytle uskladněn v kontejneru, dochází k plnění tiskárny skrze systém trubic vedených z horní části tiskárny, je tedy nutné nejprve kontejner zvednout nad tiskárnu. V případě ocelového prášku je možné provádět recyklaci přímo uvnitř tiskárny. Toho docílíme přidáním síta nad zásobovací komoru. Tento způsob plnění je časově náročnější o desítky minut, v porovnání s ručním plněním. Časová spotřeba se může rovněž zvětšit při využití jiného ochranného plynu, než který vyrábí nainstalovaný generátor. Například v případě titanového prášku, kdy se využívá argon, je nutné odpojit celý systém dusíkového generátoru a je třeba napojit lahve s argonem, což opět zvedá časovou spotřebu. Druh materiálu ovlivňuje i dobu strávenou čištěním. Pokud dochází k čištění s následným využitím stejného materiálu, lze některé úkony provést zrychleně. Pokud však následuje využití jiného materiálu, je potřeba tiskárnu vyčistit důkladně. Pokud by se tak nestalo, mohlo by dojít k ovlivnění mechanických vlastností výtisku a k případnému selhání funkčnosti dílu.

Pokud se zaměříme na časovou spotřebu recyklace s prosévačkou, zjistíme, že se mnohdy jedná o proces delší než časová spotřeba tisku samotného. V tomto konkrétním případě je vysoká časová spotřeba způsobená strojem. Stroj nelze nechat bez dozoru, a jak je již dříve uvedeno, je třeba ho v pravidelných intervalech kontrolovat, aby nedošlo k přeplnění přepadu, a zároveň je nutné každých 55



minut recyklační cyklus pouštět znovu. Jelikož je málo pravděpodobné, že by došlo k perfektnímu prosetí při prvním cyklu, dochází k výraznému růstu časové spotřeby. Pro snížení časové spotřeby by bylo nejlepší, dle mého názoru, pořídit nový prosévací stroj. Nicméně by se jednalo o nákladnou optimalizaci, proto by bylo třeba zjistit případnou úsporu. Jako levnější alternativa by mohlo posloužit přidání většího přepadu. Přesnější analýza a optimalizace by mohla být předmětem dalších studií, jelikož recyklace prášku má určitě smysl a bylo užitečné časovou spotřebu snížit.

Kalkulační část popisuje, s jakými nákladovými položkami se můžeme setkat u kalkulace nákladů tisku. Ze všech nákladů je největším nákladem odpisová položka, přičemž ta tvoří téměř 50 % celkových nákladů. Dalšími výraznými náklady je materiál, který tvoří 34 % a servis, který tvoří 11 % z celkových nákladů. Nákladové položky jako mzdy, náklady na prostor, energie atd. tvoří trochu více jak 5 %. Pro porovnání byla rovněž vyhotovena kalkulace s využitím recyklačního zařízení, které mělo přímý dopad, jak na časovou spotřebu, tak i na celkové náklady. Časová spotřeba obsluhy se v tomto případě zvedla více jak dvojnásobně, přičemž je možné, že dojde i k výraznější změně. Nicméně při porovnání obou kalkulací lze vidět, že došlo k úspoře 24 650 Kč, což je zapříčiněno hlavně úsporou v oblasti materiálu.

Celková cena procesu se nakonec vyšplhala na 328 460 Kč. Při přepočtu na kusy nás jeden kus vyjde 7 821 Kč. Kovový 3D tisk je oproti plastovému 3D tisku stále velice nákladný. To platí i pro porovnání s konvenčními technologiemi. Ačkoliv cena není silnou stránkou kovového tisku, není třeba na něj zanevřít, jelikož má i své silné stránky, ať už v prototypizaci nebo vyrábění vysoce komplexních dílů. S vývojem aditivní technologie rovněž můžeme očekávat pokles pořizovací ceny, což se do celkového nákladu výrazně promítne a jednoho dne se můžeme třeba dočkat i dílů v ceně konvenčních technologií.

## 10. Seznam zkratek

UV	Ultraviolet
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
L-PBF	Laser-Powder Bed Fusion
SLPR	Selective Laser Powder Remelting
ISO	International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
DED	Direct Energy Deposition
PBF	Powder Bed Fusion
EBM	Electron Beam Melting
SLM	Selective Laser Melting
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
LMF	Laser Metal Fusion
CAD	Computer-Aided Design
STL	Stereolithography
AMF	Additive Manufacturing File
LENS	Laser Engineering Net Shaping
EBF3	Electron Beam Freeform Fabrication
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing
MIG	Metal Inert Gas

BJ	Binder Jetting
LOM	Laminated Object Manufacturing
UAM	Ultrasound Additive Manufacturing
MEX	Material EXtrusion
FDM	Fused Deposition Modelling
FFF	Fused Filament Fabrication
VIGA	Vacuum Inert Gas Atomization
EIGA	Electrode Induction Gas Atomization
PIGA	Plasma Inert Gas Atomization
REP	Rotating Electrode Process
PREP	Plasma Rotating Electrode Process
AM	aditivní technologie
hns	Hodinová nákladová sazba
t	čas
sw	software

## 11. Seznam jednotek

$^{\circ}$	<i>Stupeň</i>
$\mu m$	<i>Mikrometr</i>
$m*s^{-1}$	<i>Metr za sekundu</i>
$kg*h^{-1}$	<i>Kilogram za hodinu</i>
$mm$	<i>Milimetr</i>
$MPa$	<i>Megapascal</i>
$^{\circ}C$	<i>Stupeň celsia</i>
$Kč$	<i>Koruna česká</i>
<i>Hod</i>	<i>Hodina</i>
<i>Min</i>	<i>Minuta</i>
<i>Kg</i>	<i>Kilogram</i>
$m^2$	<i>Metr čtverečný</i>
$kč*hod^{-1}$	<i>Koruna za hodinu</i>
<i>W</i>	<i>Watt</i>
<i>kW</i>	<i>Kilowatt</i>
<i>nm</i>	<i>Nanometr</i>

## 12. Seznam tabulek

Tabulka 1-Porovnání mechanických vlastností vytisklého a odlitého vzorku 316L .....	35
Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti vybraných Al slitin [28] .....	37
Tabulka 3 - Srovnání mechanických vlastností tištěné a tvářené Ti slitiny [6] .....	38
Tabulka 4 - Úrovně nebezpečí dle velikosti částic [44] .....	39
Tabulka 5 - Přehled sledu operačních úseků.....	57
Tabulka 6 - Přehled operačních úkonů.....	58
Tabulka 7 - Časy naměřené při přípravě tisku .....	59
Tabulka 8 - Časy naměření při postprocessingu.....	60
Tabulka 9 - Naměřené časy při čištění.....	60
Tabulka 10 - Shrnutí časů operačních úseků a jejich průměrné hodnoty.....	60
Tabulka 11 - Přehled časových rozpětí a časového průměru úkonů .....	62
Tabulka 12 - Hodnoty odpisů strojů .....	66
Tabulka 13 - Hodnoty odpisů přepočtené dle hodin.....	67
Tabulka 14 - Odpisy softwaru .....	67
Tabulka 15 - Servisové položky.....	67
Tabulka 16 - Časová spotřeba procesu.....	68
Tabulka 17 - Přehled nákladů na osobní náklady .....	68
Tabulka 18 - Přehled dílů s omezenou životností .....	69
Tabulka 19 - Přehled spotřeby e. energie.....	69
Tabulka 20 - Náklady na prostory .....	70
Tabulka 21 - Náklady na materiál.....	70
Tabulka 22 - Náklady na spotřební materiál.....	70
Tabulka 23 - Součet odpisových položek.....	71
Tabulka 24 - Součet servisních položek .....	71
Tabulka 25 - Součet nákladů na energie .....	72
Tabulka 26 - Součet nákladů za náhradní díly .....	72
Tabulka 27 - Souhrn osobních nákladů, materiálu, spotřebního materiálu a prostor .....	72
Tabulka 28 - Celkový součet nákladů.....	73
Tabulka 29 - Přehled rozepsaných celkových nákladů .....	73

Tabulka 30 - Časová spotřeba prosévání.....	75
Tabulka 31 - Náklady připadající na prosévačku .....	76
Tabulka 32 - Změna nákladů oproti tisku s novým práškem.....	76

## 13. Seznam obrázků a grafů

Obrázek 1 - Detail tiskárny Bambi [2].....	12
Obrázek 2 - Tiskárna Betsy (vlevo) a její výtisky (vpravo) [2].....	12
Obrázek 3 - Vybrané patenty AM [3] .....	13
Obrázek 4- vybrané patenty AM [3].....	13
Obrázek 5 - Rozdělení AM technologií dle ISO ASTM 52900 [7] .....	14
Obrázek 6 - Schéma L-PBF systému [8].....	16
Obrázek 7 - Výhody L-PBF [5] .....	17
Obrázek 8 - Nevýhody L-PBF [5].....	18
Obrázek 9 - Schéma EBM systému [6] .....	21
Obrázek 10 - Schéma EBF3 [12].....	22
Obrázek 11- Schéma LENS [11].....	23
Obrázek 12 - Schéma BJ [6].....	24
Obrázek 13 - Schéma UAM [15].....	26
Obrázek 14 - a) šroubový podavač b) pístový podavač c) filamentový podavač [19] .....	28
Obrázek 15 - a);b) VIGA c) EIGA d) PA e) PREP [24].....	33
Obrázek 16 - a) atomizace plynem In718 b) chemická redukce Fe c) atomizace plynem Ti6Al4V d) atomizace plazmou Ti6Al4V e) mechanical alloying Fe18Cr8Ni12MnN [22] .....	34
Obrázek 17 - Tiskárna Concept Laser M2 Cusing [48] .....	48
Obrázek 18 - ukázka tištěných vzorků.....	48
Obrázek 19 - Procesní graf .....	49
Obrázek 21 - Orientační schéma tiskárny .....	50
Obrázek 20 - Detail přípravné komory.....	50
Obrázek 22 - Odkrytá tisková komora.....	51
Obrázek 23 - Plnění materiálem.....	53
Obrázek 24 - Ometení výtisku.....	54
Obrázek 25 - Odsekávání výtisků.....	55
Obrázek 26 - Zametení prášku do odpadu .....	56
Obrázek 27 - Vysávání tiskárny .....	56
Obrázek 28 - Diagram rozložení časů.....	60

Obrázek 29 - Časové rozložení procesu vč. tisku.....	61
Obrázek 30 - Časová skladba úkonů .....	63
Obrázek 31 - Diagram procentuálního rozložení nákladů.....	73
Obrázek 32 - Sloupcový graf závislosti HNS na směnnosti.....	74
Obrázek 33- Srovnání nákladů s recyklací a bez.....	77
Obrázek 34 - Sled úkonů procesu PBF .....	79



## 14. Zdroje

- [1] CHAPMAN, Arun. The complete history of 3D printing. *UltiMaker* [online]. 29. červenec 2022 [vid. 2024-06-15]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/learn/the-complete-history-of-3d-printing/>
- [2] BEAMAN, Joseph J. Historical background. In: Igor YADROITSEV, Ina YADROITSAVA, Anton DU PLESSIS a Eric MACDONALD, ed. *Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals* [online]. B.m.: Elsevier, 2021 [vid. 2024-06-15], Additive Manufacturing Materials and Technologies, s. 1–14. ISBN 978-0-12-824090-8. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-824090-8.00002-0
- [3] ROTHFELDER, Richard, Florian NAHR, Lova CHECHIK, Dominic BARTELS a Michael SCHMIDT. A Brief History of the Progress of Laser Powder Bed Fusion of Metals in Europe. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. 2023, **145**(100801) [vid. 2024-06-15]. ISSN 1087-1357. Dostupné z: doi:10.1115/1.4062788
- [4] YADROITSEV, Igor a Ina YADROITSAVA. A step-by-step guide to the L-PBF process. In: Igor YADROITSEV, Ina YADROITSAVA, Anton DU PLESSIS a Eric MACDONALD, ed. *Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals* [online]. B.m.: Elsevier, 2021 [vid. 2024-06-19], Additive Manufacturing Materials and Technologies, s. 39–77. ISBN 978-0-12-824090-8. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-824090-8.00026-3
- [5] MILEWSKI, John O. *Additive Manufacturing of Metals* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2017 [vid. 2024-06-15]. Springer Series in Materials Science. ISBN 978-3-319-58204-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-58205-4
- [6] YANG, Li, Keng HSU, Brian BAUGHMAN, Donald GODFREY, Francisco MEDINA, Mamballykalathil MENON a Soeren WIENER. *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2017 [vid. 2024-06-15]. Springer Series in Advanced Manufacturing. ISBN 978-3-319-55127-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-55128-9
- [7] *ISO/ASTM 52900:2015(en), Additive manufacturing — General principles — Terminology* [online]. [vid. 2024-06-16]. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>
- [8] *Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review - C. Körner, 2016* [online]. [vid. 2024-06-21]. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1080/09506608.2016.1176289>
- [9] GALATI, Manuela a Luca IULIANO. A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **19**, 1–20 [vid. 2024-06-22]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2017.11.001
- [10] SVETLIZKY, David, Mitun DAS, Baolong ZHENG, Alexandra L. VYATSKIKH, Susmita BOSE, Amit BANDYOPADHYAY, Julie M. SCHOENUNG, Enrique J. LAVERNIA a Noam ELIAZ. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications.

- Materials Today* [online]. 2021, **49**, 271–295 [vid. 2024-06-22]. ISSN 1369-7021. Dostupné z: doi:10.1016/j.mattod.2021.03.020
- [11] Figure 5. The scheme of the LENS technology [16]. *ResearchGate* [online]. [vid. 2024-06-22]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/The-scheme-of-the-LENS-technology-16\\_fig4\\_326961466](https://www.researchgate.net/figure/The-scheme-of-the-LENS-technology-16_fig4_326961466)
- [12] PAGE, Jared. Electronic Beam Freeform Fabrication (EBF3) | WhiteClouds. *WhiteClouds* [online]. 5. říjen 2021 [vid. 2024-06-22]. Dostupné z: <https://www.whiteclouds.com/3dpedia/ebf3/>
- [13] ZIAEE, Mohsen a Nathan B. CRANE. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, **28**, 781–801 [vid. 2024-06-22]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.05.031
- [14] KRISTIANV. Revoluční nástroj pro aditivní výrobu kovových dílů. *Additive Systems* [online]. 21. září 2022 [vid. 2024-06-22]. Dostupné z: <https://additivesystems.cz/binder-jetting-jako-revolucni-nastroj-aditivni-vyroby-kovovych-dilu/>
- [15] FRIEL, R. J. a R. A. HARRIS. Ultrasonic Additive Manufacturing – A Hybrid Production Process for Novel Functional Products. *Procedia CIRP* [online]. 2013, **6**, Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), 35–40 [vid. 2024-06-22]. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2013.03.004
- [16] TEAM, Spatial. *Ultrasonic Additive Manufacturing Explained* [online]. [vid. 2024-06-23]. Dostupné z: <https://blog.spatial.com/ultrasonic-additive-manufacturing>
- [17] NGO, Tuan D., Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate T. Q. NGUYEN a David HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2018, **143**, 172–196 [vid. 2024-06-22]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012
- [18] RAMAZANI, Haidar a Abdolvahed KAMI. Metal FDM, a new extrusion-based additive manufacturing technology for manufacturing of metallic parts: a review. *Progress in Additive Manufacturing* [online]. 2022, **7(4)**, 609–626 [vid. 2024-06-24]. ISSN 2363-9520. Dostupné z: doi:10.1007/s40964-021-00250-x
- [19] SUWANPREECHA, Chanun a Anchalee MANONUKUL. A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding. *Metals* [online]. 2022, **12(3)**, 429 [vid. 2024-06-24]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met12030429
- [20] BOYCE, Brad L., Bradley C. SALZBRENNER, Jeffrey M. RODELAS, Laura P. SWILER, Jonathan D. MADISON, Bradley H. JARED a Yu-Lin SHEN. Extreme-Value Statistics Reveal Rare Failure-Critical Defects in Additive

- Manufacturing. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2017, **19**(8), 1700102 [vid. 2024-06-25]. ISSN 1527-2648. Dostupné z: doi:10.1002/adem.201700102
- [21] FISHER, David. *Additive Manufacturing of Metals* [online]. Millersville, PA, UNITED STATES: Materials Research Forum LLC, 2020 [vid. 2024-06-20]. ISBN 978-1-64490-063-5. Dostupné z: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=6029039>
- [22] POPOVICH, Anatolij a Vadim SUFIAROV. Metal Powder Additive Manufacturing. In: [online]. 2016, s. 215–236. ISBN 978-953-51-2480-1. Dostupné z: doi:10.5772/63337
- [23] HERZOG, Dirk, Vanessa SEYDA, Eric WYCISK a Claus EMMELMANN. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* [online]. 2016, **117**, 371–392 [vid. 2024-06-26]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2016.07.019
- [24] SUN, Pei, Zhigang ZHANG, Ying ZHANG a Yang XIA. Review of the Methods for Production of Spherical Ti and Ti Alloy Powder. *JOM* [online]. 2017, **69**(10), 1853–1860 [vid. 2024-06-26]. ISSN 1543-1851. Dostupné z: doi:10.1007/s11837-017-2513-5
- [25] HAGHDADI, Nima, Majid LALEH, Maxwell MOYLE a Sophie PRIMIG. Additive manufacturing of steels: a review of achievements and challenges. *Journal of Materials Science* [online]. 2021, **56**(1), 64–107 [vid. 2024-06-26]. ISSN 1573-4803. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-020-05109-0
- [26] JAIN, harsh. 316 Stainless Steel (UNS S31600) - Composition, Properties, & Uses. *ThePipingMart Blog* [online]. 5. prosinec 2022 [vid. 2024-06-26]. Dostupné z: <https://blog.thepipingmart.com/grades/316-stainless-steel-material-properties-composition-uses/>
- [27] ROMETSCH, Paul A., Yuman ZHU, Xinhua WU a Aijun HUANG. Review of high-strength aluminium alloys for additive manufacturing by laser powder bed fusion. *Materials & Design* [online]. 2022, **219**, 110779 [vid. 2024-06-27]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2022.110779
- [28] *Metal Materials for 3D Printers and Additive Manufacturing /3D Systems* [online]. 16. leden 2017 [vid. 2024-06-27]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/materials/metal>
- [29] ZHU, Zhiguang, Zhiheng HU, Hang Li SEET, Tingting LIU, Wenhe LIAO, Upadrasta RAMAMURTY a Sharon Mui LING NAI. Recent progress on the additive manufacturing of aluminum alloys and aluminum matrix composites: Microstructure, properties, and applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2023, **190**, 104047 [vid. 2024-06-27]. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmactools.2023.104047

- [30] LIU, Shunyu a Yung C. SHIN. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design* [online]. 2019, **164**, 107552 [vid. 2024-06-27]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.107552
- [31] *SS\_316L\_Safety\_data\_sheet\_EN.pdf* [online]. [vid. 2024-06-28]. Dostupné z: [https://www.eos.info/11\\_safety-data-sheets/Metal%20Safety%20Data%20Sheets/SS\\_316L\\_Safety\\_data\\_sheet\\_EN.pdf](https://www.eos.info/11_safety-data-sheets/Metal%20Safety%20Data%20Sheets/SS_316L_Safety_data_sheet_EN.pdf)
- [32] *GESTIS Substance Database* [online]. [vid. 2024-06-28]. Dostupné z: <https://gestis-database.dguv.de/data?name=008210>
- [33] TAXELL, Piia a Pasi HUUSKONEN. Toxicity assessment and health hazard classification of stainless steels. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* [online]. 2022, **133**, 105227 [vid. 2024-06-28]. ISSN 0273-2300. Dostupné z: doi:10.1016/j.yrtph.2022.105227
- [34] Substances which, in contact with water, emit flammable gases. In: UNITED NATIONS *Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS)* [online]. B.m.: UN, 2006 [vid. 2024-06-28], *Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS)*, s. 89–91. ISBN 978-92-1-155774-9. Dostupné z: doi:10.18356/12ca7d5a-en
- [35] *GESTIS Substance Database* [online]. [vid. 2024-06-28]. Dostupné z: <https://gestis-database.dguv.de/data?name=008100>
- [36] *GESTIS Substance Database* [online]. [vid. 2024-06-28]. Dostupné z: <https://gestis-database.dguv.de/data?name=008170>
- [37] SOL, Flam. SECTION 4: First aid measures. nedatováno, (1907).
- [38] *CoCr-MP1\_Safety\_data\_sheet\_5-1-0\_07-23\_en-1\_compressed-2.pdf* [online]. [vid. 2024-06-28]. Dostupné z: [https://www.3dengg.com/wp-content/uploads/2024/01/CoCr-MP1\\_Safety\\_data\\_sheet\\_5-1-0\\_07-23\\_en-1\\_compressed-2.pdf](https://www.3dengg.com/wp-content/uploads/2024/01/CoCr-MP1_Safety_data_sheet_5-1-0_07-23_en-1_compressed-2.pdf)
- [39] *GESTIS Substance Database* [online]. [vid. 2024-06-28]. Dostupné z: <https://gestis-database.dguv.de/data?name=007270>
- [40] EOS CopperAlloy CuNi30. nedatováno, (9030).
- [41] *GESTIS Substance Database* [online]. [vid. 2024-06-28]. Dostupné z: <https://gestis-database.dguv.de/data?name=008240>
- [42] *NiAl-IN625\_Safety\_data\_sheet\_EN.pdf* [online]. [vid. 2024-06-28]. Dostupné z: [https://www.eos.info/11\\_safety-data-sheets/Metal%20Safety%20Data%20Sheets/NiAl-IN625\\_Safety\\_data\\_sheet\\_EN.pdf](https://www.eos.info/11_safety-data-sheets/Metal%20Safety%20Data%20Sheets/NiAl-IN625_Safety_data_sheet_EN.pdf)
- [43] *GESTIS Substance Database* [online]. [vid. 2024-06-28]. Dostupné z: <https://gestis-database.dguv.de/data?name=008230>

- [44] 14:00-17:00. ISO/ASTM 52931:2023. *ISO* [online]. [vid. 2024-06-27]. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/74641.html>
- [45] MOYLAN, Shawn, John SLOTWINSKI, April COOKE, Kevin JURRENS a M. Alkan DONMEZ. *Lessons learned in establishing the NIST metal additive manufacturing laboratory* [online]. NIST TN 1801. B.m.: National Institute of Standards and Technology. 2013 [vid. 2024-06-28]. Dostupné z: doi:10.6028/NIST.TN.1801
- [46] CHEN, Rui, Hong YIN, Ivan S. COLE, Shirley SHEN, Xingfan ZHOU, Yuqian WANG a Shichuan TANG. Exposure, assessment and health hazards of particulate matter in metal additive manufacturing: A review. *Chemosphere* [online]. 2020, **259**, 127452 [vid. 2024-06-28]. ISSN 0045-6535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127452
- [47] *Best Practices for Handling and Storing Metal Powder for 3D Printing | 3D Printing Metal Powder / Truer* [online]. 20. červenec 2023 [vid. 2024-06-28]. Dostupné z: <https://am-printing.com/best-practices-for-handling-and-storing-metal-powder-for-3d-printing/>
- [48] *Provozní návod M2 cusing Single-Laser / Dual-Laser*. 2018.
- [49] *Concept Laser M2 - Colibrium Additive - Katalog - Misan* [online]. [vid. 2024-07-15]. Dostupné z: <https://www.misan.cz/concept-laser/katalog-detail/m2-concept-laser-m2/>
- [50] *GE Additive rebrands as Colibrium Additive | GE Aerospace News* [online]. [vid. 2024-07-15]. Dostupné z: <https://www.geaerospace.com/news/press-releases/other-news-information/ge-additive-rebrands-colibrium-additive>
- [51] *Analýza a normování práce je pro velkou část českých firem stále aktuálnějším tématem | API Akademie* [online]. [vid. 2024-07-16]. Dostupné z: <https://www.e-api.cz/25840n-analyza-a-normovani-prace-je-pro-velkou-cast-ceskych-firem-stale-aktualnejsim-tematem>
- [52] *Elektronická učebnice - ELUC* [online]. [vid. 2024-07-16]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1345>
- [53] ZELENKA, Antonín a Mirko KRÁL. *Projektování výrobních systémů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01302-2.
- [54] SCHOLZ, Pavel, Michal STANEK a Kateřina ROUHOVÁ. *Popis hodnotícího modelu – nákladová část*. 2020
- [55] MATUŠŮ, Martin, Jakub ROSENTHAL, Jan PAPUGA, Jan ŠIMOTA, Ludmila DŽUBEROVÁ, Vladimír MÁRA a Libor BERÁNEK. Fatigue analysis of additively manufactured specimens from AlSi10Mg with different levels of powder recycling. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2024, **54**, International Conference on Structural Integrity 2023 (ICSI 2023), 135–142 [vid. 2024-07-26]. ISSN 2452-3216. Dostupné z: doi:10.1016/j.prostr.2024.01.065

## 15. Seznam příloh

Příloha 1 - Plakát bezpečnostních opatření při 3D tisku s kovovými materiály

Příloha 2 - Plakát s bezpečnostními riziky

Příloha 3 – Náhled nástroje pro kalkulaci nákladů v MS Excel



FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE

ÚSTAV TECHNOLOGIE  
OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ  
A METROLOGIE

## Bezpečnostní opatření při 3D tisku s kovovými materiály

Při tisku z kovových materiálů je obsluha ohrožena práškem, ať už jeho částicemi nebo jeho možnou reaktivitou a toxicitou. Tyto faktory mohou vést k závažným zdravotním problémům. Níže je uvedeno jak s těmito faktory pracovat.

### Větrání



Čerstvý vzduch je dobrý vzduch. Aby se v místnosti částice neakumulovaly, je nutné dobře větrat, takže před tiskem zapněte ventilační zařízení

### Příprava tiskárny



Tiskárnu připravujte v souladu s bezpečnostními pokyny uvedené výrobcem a interními směrnicemi firmy, aby nedošlo k nebezpečné situaci

### Čištění



Je nutné provádět čištění pracovních prostor po každém tisku. Používejte metody mokrého čištění nezametejte nasucho a nepoužívejte kompresor

### Nebezpečí popálení



Nebezpečí zranění od horkých povrchů! Povrchové plochy mohou být velmi horké. Před prací v glove-boxu počkejte až výrobek dostatečně vychladne



### Nebezpečí exploze

V důsledku nedostatečné inertizace komory může dojít k explozi, proto dbejte zvýšené pozornosti při plnění komory

### Nebezpečí laserového záření



Nebezpečí poranění laserovým zářením!

Laserové záření je velice nebezpečné pro zrak a pokožku, vyvarujte se lesklým povrchům, které mohou vést k nežádoucím odrazům

### Nebezpečí samovznícení



Některé druhy materiálů jsou vysoce reaktivní a samovznětlivé, je tedy důležité vyhnout se při manipulaci s nimi zápalným a elektrostatickým zdrojům

### Nebezpečí třaskavého plynu



Některé kovové prášky reagují s vodou při vzniku vodíku. Je tedy důležité kontrolovat hladinu vody v odlučovači, větrat a vlhké zbytky nechat řádně vysušit

## Manipulace s práškem

Při všech činnostech, při nichž přijdete do kontaktu s kovovými prášky, usazeninami spalin ze svařování, filtračními zbytky a jejich prachem, noste bezpodmínečně nutné ochranné prostředky. Musí se zamezit zvíření prášku a také se vždy musí dodržet údaje v bezpečnostních listech použitých kovových prášků

### První pomoc



**Při požití** – vyvolat zvracení, hodně pít

**Při kontaktu s kůží** – omýt PEG a poté vodou

**Při vdechnutí** – přísun čerstvého vzduchu

**Při kontaktu s okem** – 15 minut pod tekoucí vodou

**Vždy vyhledat lékařskou pomoc!**

**V případě nebezpečí pro osoby nebo rizika škod na stroji se musí ihned stisknout tlačítko NOUZOVÉ VYPNUTÍ.**



### OCHRANNÉ POMŮCKY

**V místnosti s tiskárnou a při práci s tiskárnou je vždy nutné nosit ochranné pomůcky**



rukavice  
pracovní oděv  
dýchací polomaska P3  
brýle, těsně přiléhající  
ohnivzdorný ochranný oděv  
tepelně izolační rukavice  
celo obličejová dýchací maska

Standardní OOP

Rozšířená OOP

# 3D tisk s kovovými prášky: Bezpečnostní rizika

## Potenciální rizika



*Jaká potenciální nebezpečí jsou spojena s 3D tiskem z kovového prášku? Jaké kovy jsou v prášku? Jaké mají vlastnosti kovů vliv na zdraví? Mohou reagovat se vzduchem? Jaké je pracovní prostředí?*

### Potenciální nebezpečí může zahrnovat:

- Vdechování prášku a jeho kontakt s kůží
- Statická elektřina, požár a výbuch
- Výkonné lasery

### Co brát v potaz:

- Umístění tiskárny
- Předepsané postupy týkající se příjmu a likvidace kovových prášků, provozu a činnosti údržby

### Vhodné pracovní prostředí:

- Tisknete v oblasti s negativním tlakem s ventilačním systémem v prostoru odděleně od ostatních pracovišť
- Vhodný protipožární systém

## Pracovní činnost



*Mohla by manipulace způsobit ohrožení? Jak pracujete s kovovými prášky? Jaká je pravděpodobnost kontaktu s práškem? Můžete udělat něco, abyste snížili tuto pravděpodobnost? Probíhá se v okolí nějaká další riziková činnost?*

### Předtisková příprava:

#### Vyšší potenciál nebezpečí:

- Ruční vkládání prášků do stroje

#### Nižší potenciál nebezpečí:

- Nepřímé doplňování prášku
- Příjem a skladování nádob s práškem

### V průběhu tisku:

- Další rizikové činnosti v okolí
- Sledování průběhu tisku (tisk s kovovými prášky se obvykle provádí v uzavřeném prostoru v uzavřené komoře, proto je zde možnost vystavení emisím nízká)

### Po tisku:

#### Vyšší potenciál nebezpečí:

- Odstranění vytištěného předmětu z tiskárny
- Přemístění tištěného předmětu z pracovní oblasti

#### Nižší potenciál nebezpečí:

- Odstranění prášku v uzavřeném prostoru
- Finální úprava v uzavřeném prostoru

### Čištění a údržba:

#### Vyšší potenciál nebezpečí:

- Čištění tiskového prostoru a výměna filtrů

#### Nižší potenciál nebezpečí:

- Čištění nástrojů

## Bezpečnostní opatření



*Na základě procesu tisku, jaká bezpečnostní opatření lze zavést, aby došlo ke snížení rizika? Jaké jsou klíčové konstrukční a provozní požadavky na bezpečnost? Při výběru mějte na paměti riziko požáru, výbuch atp.*

### Předtisková příprava:

- Uzavřená místnost s ventilačním systémem v blízkosti pracoviště, kde dochází k manipulaci s práškem

### V průběhu tisku:

- Tisk probíhá v uzavřené komoře a riziko vystavení nebezpečí je tedy nižší než přímé vystavení

### Po tisku:

- Opatření uvedená v předtiskové přípravě
- Pro čištění a dokončování použijte box s rukavicemi
- Odvětraná stanice pro vysypávání prášku

### Čištění a údržba:

- Odsávací systém pro manipulaci s práškem mimo box
- Vysavač s vodním filtrem
- Uzemnění a propojení zařízení pro statickou, požární a elektrickou bezpečnost
- Lepivé podložky při vstupu a výstupu z místnosti

## Obecná nařízení



*Jaké postupy a zásady jsou na vašem pracovišti? Stanovili jste plán pro nakládání s odpady? Zvážíli jste co dělat v případě úniku prášku?*

- Začlenění 3D tisku kovového prášku do programů bezpečnosti práce
- Vypracování standardních provozních postupů a proškolení pracovníků
- Nekonzumujte potraviny a nápoje v pracovních prostorách
- Omezte přístup na nezbytné pracovníky

### Pro všechny fáze tisku platí:

- S filtry pracujte tak, jak je uvedeno výrobcem a při montáži zkontrolujte těsnění
- Používejte značení, které upozorňují pracovníky na případná nebezpečí a vhodná opatření
- Při výběru čisticích materiálů, zařízení a vybavení zvažte reaktivitu vašeho základního materiálu, vybavení a metod
- Časté čištění pracovních prostor mezi tisky
- Používejte metody mokrého čištění nezametejte nasucho a nepoužívejte kompresor
- Zacházejte se všemi odpadními materiály včetně čisticích či ochranných pomůcek v souladu se všemi platnými předpisy

## Ochranné pomůcky



*Pokud výše uvedená opatření nevedou k účinné kontrole nebezpečí, jaké osobní ochranné prostředky lze použít? Disponujete osobními ochrannými prostředky OOPP pro jiné rizikové situace?*

Používejte OOPP, které jsou vhodné pro činnosti ve vašem okolí (například výměna prášku na stroji vedle vaší pracovní stanice může vyžadovat, abyste používali stejnou úroveň OOPP). Přesto, že během tisku je riziko nízké, pracovní plochy mohou být stále kontaminovány kovovými prášky. Pokud je tisk přerušen, používejte OOP na úrovni potřebné při otevřeném stroji. Dodržujte správné postupy výměny OOP. Nenoste OOP mimo pracovní prostory. Mezi možností osobních ochranných pracovních prostředků patří např:

- Nitrilové nebo jiné odolné rukavice
- Laboratorní plášť nebo kombinéza
- Ochranné brýle nebo obličejové štíty
- Ochranu dýchacích cest



15.3. Příloha 3 – Náhled nástroje pro kalkulaci nákladů v MS Excel

3D tiskárna							
smělnost				1	2	3	
stroj	počet	1 ks					
	životnost	5 let					
	cena	22 000 000 Kč					
energie	odpisy hodnota	2 420 000 Kč	4 895 000 Kč/rok				
	náklady na elektrickou energii		21,84 Kč/h				
	cena za kwh		7,8 Kč				
	spotřeba elektrické energie		2,8 kw	408,32 kw			
cena elektrické energie za stavbu			3184,93 Kč				
náhradní díly	laser						
	životnost	10000 h					
	cena	72300 Kč					
	cena na hodinu	7,23 Kč/h					
		1,4 kw					
	cena za stavbu			1054,4 Kč/stavba			
	navašec						
	životnost	200 h		1 stavba			
	cena	400 Kč					
	cena za stavbu			2,69 400 Kč			
stavební palety							
životnost	50 stavb						
náklady na úpravu palety	550 Kč						
cena	8316 Kč						
cena za stavbu			4,81 716,32 Kč				
materiál	materiál						
	cena materiálu	4000 Kč/kg	2880 Kč/kg při větším odběru				
	objem tiskárny	50 kg					
	spotřeba na 1 stavbu	35,00 38,50 kg					
cena na stavbu			744,41 110880 Kč	recyklace 83160 Kč	75%		
provoz	smělnost						
	maximální časový fond		2040	2040	3920	4560	
	náklady na hodinu servis+ odpisy		1315 Kč/h	2939 Kč/h	1529 Kč/h	1315 Kč/h	
	celkový náklad na provoz		5995000,0 Kč/rok	5995000,0 Kč/rok	5153596,5 Kč/rok	5995000,0 Kč/rok	
	celkový náklad na stavbu		195823,5 Kč/stavba	437723,2 Kč/stavba	227794,7 Kč/stavba	195823,5 Kč/stavba	
	počet pracovníků	1 ks					
	mzdy	60000 Kč					
	osobní náklady	80998 Kč					
	os. Nákl./den	3851,4 Kč					
	náklady na hodinu práce/os	481,4 Kč					
roční náklady na osobu	982114,3 Kč/rok		982114,3 Kč/rok	1887200 Kč/rok	2195314,3 Kč/rok		
náklady na stavbu			1502,1 Kč/stavba				
Náklady na místnost							
plocha	provozní plocha	30 m2		2040	3920	4560	
	cena za m2	7500 Kč	250 Kč				
	cena za místnost		90000 Kč/rok				
	cena za stavbu		2939,80 Kč/stavba	6571,3 Kč/stavba	3419,8 Kč/stavba	2939,8 Kč/stavba	
	cena za hodinu		19,7 Kč/h	44,1 Kč/h	23,0 Kč/h	19,7 Kč/h	
celkové náklady včetně mezd/ stavba			316501,0 Kč	recyklace 288781,0 Kč			
generátor plynu							
smělnost				1	2	3	
stroj	počet	1 ks					
	životnost	5 let					
	cena	314000 Kč					
energie	odpisy hodnota	34540 Kč	69865 Kč/rok				
	náklady na elektrickou energii		2736,0 Kč/rok	0,6 Kč/rok			
	cena za kwh		7,8 Kč				
	spotřeba elektrické energie		80,0 w				
elektrická energie na stavbu			89,4 Kč				
provoz	maximální časový fond		2040	2040	3920	4560	
	náklady na hodinu		19,4 Kč/h	42,5 Kč/h	22,4 Kč/h	18,8 Kč/h	
	celkový náklad na provoz		88301 Kč/rok	39503 Kč/rok	87917 Kč/rok	85565 Kč/rok	
	celkový náklad na stavbu		2884,3 Kč			2794,9 Kč	
proševáčka							
smělnost				1,0	2,0	3,0	
stroj	počet	1,0 ks					
	životnost	5,0 let					
	cena	737964,0 Kč		inertní plyn		61,1 Kč	
energie	odpisy hodnota	81177,0 Kč	164197,0 Kč/rok			290,7128246 Kč/rok	
	náklady na elektrickou energii		3,9 Kč/h				
	cena za kwh		7,8 Kč				
	spotřeba elektrické energie		500,0 w				
elektrická energie na stavbu			18,6 Kč				
provoz	maximální časový fond		2040,0	2040,0	3920,0	4560,0	
	osobní náklady		2291,6 Kč				
	náklady na hodinu		102,5 Kč/h	98,6 Kč/h	51,3 Kč/h	44,1 Kč/h	
	celkový náklad na provoz		209051,2 Kč/rok				
celkový náklad na stavbu			3070,1 Kč				
software							
smělnost				1	2	3	
stroj	počet	1 ks					
	životnost	5 let					
	cena	1106700,0 Kč					
provoz	odpisy hodnota	221 340 Kč	442680 Kč/rok				
	maximální časový fond		2040,0	2040,0	3920,0	4560,0	
	náklady na hodinu		217,0 Kč/h	217,0 Kč/h	112,9 Kč/h	97,1 Kč/h	
	celkový náklad na provoz		442680,0 Kč/rok				
celkový náklad na stavbu			868,0 Kč				
kompresor							
smělnost				1,0	2,0	3,0	
stroj	počet	1,0 ks					
	životnost	5,0 let					
	cena	130000,0 Kč					
energie	odpisy hodnota	14300,0 Kč	28925,0 Kč/rok				
	náklady na elektrickou energii		31,2 Kč/h				
	cena za kwh		7,8 Kč				
			4,0 kw				
elektrická energie na stavbu			4867,2 Kč				
provoz	maximální časový fond		2040,0	2040,0	3920,0	4560,0	
	náklady na hodinu		41,7 Kč/h	23,5 Kč/h	12,2 Kč/h	10,5 Kč/h	
	celkový náklad na provoz		190197,0 Kč/rok				
	celkový náklad na stavbu		6212,7 Kč			1565,4 Kč	
provozní spotřební materiály							
provoz	cena	50000,0 Kč					
	hns	25 Kč/hod					
	cena za stavbu		76,5 Kč				
Pec							
smělnost				1,0	2,0	3,0	
stroj	počet	1,0 ks					
	životnost	5,0 let					
	cena	2393600,0 Kč					
energie	odpisy hodnota	263296,0 Kč	532576,0 Kč/rok				
	náklady na elektrickou energii		117,0 Kč/h				
	cena za kwh		7,8 Kč				
			15,0 kw		105,0 kw		
cena za stavbu			819 Kč				
provoz	maximální časový fond		4560,0	2040,0	3920,0	4560,0	
	náklady na hodinu		260,0 Kč/h	319,7 Kč/h	166,4 Kč/h	143,0 Kč/h	
	celkový náklad na provoz		1185776,0 Kč/rok				
	osobní náklady		1820,3 Kč				
celkový náklad na stavbu			96,28 Kč			817,6 Kč	

maximální Fn			2040	3920	5700	kvůli odstávkám
dle smělnosti			1	2	3	-
odpisy	2 420 000	4895000	2399,51	1248,72	1073,46	kč/h
servis	0,05	22 000 000	539,22	280,61	241,23	kč/h

odpisování	2. skupina	doba odpisování	5 let	1 rok	další roky	11%	22%
------------	------------	-----------------	-------	-------	------------	-----	-----

celkový čas tisku	148,95 h
čas obsluhy	3,12 h
řesk	145,83 h

cena stavby vč. recyklace	303 809 Kč
cena stavby bez odpisů - recyklace	163 271 Kč
cena stavby bez odpisů	163 654 Kč
cena stavby vč. Sw...	328 459 Kč
cena za kus	7820,452118 Kč

maximální Fn			8760	2040	3920	4560
dle smělnosti			1	2	2	3
odpisy	34 540	69865	34,25	17,82	15,32	kč/h
servis	0,05	314 000	7,70	4,01	3,44	kč/h

celkový čas tisku	148,95 h
čas obsluhy	3,12 h
řesk	145,83 h
řesávání	4,76 h

maximální Fn			2040	3920	4560	
dle smělnosti			1	2	3	
odpisy	81 177	164197	80,49	41,89	36,01	kč/h
servis	0,05	737964,0	18,09	9,41	8,09	kč/h

maximální Fn			2040	3920	4560	
dle smělnosti			1	2	3	
odpisy	221 340	442680	217,09	112,93	97,08	kč/h

celkový čas tisku	148,95 h
čas obsluhy	3,12 h
řesk	145,83 h
řesávání	4,76 h
příprava v sw	4 h

maximální Fn			8760	2040	3920	4560
dle smělnosti			1	2	2	3
odpisy	14 300	28925	14,18	7,38	6,34	kč/h
servis	1,00	19 000	9,31	4,85	4,17	kč/h

celkový čas tisku	148,95 h
čas obsluhy	3,12 h
řesk	145,83 h
doba tepelného zpracování	7 h

maximální Fn			8760	2040	3920	4560
dle smělnosti			1	2	3	-
odpisy	263296,0	532576,0	261,07	135,86	116,79	kč/h
servis	0,05	2393600,0	58,67	30,53	26,25	kč/h