

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2018

**JANA
KOUBOVÁ**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Koubová** Jméno: **Jana** Osobní číslo: **439036**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití aditivních technologií v Průmysl 4.0

Název bakalářské práce anglicky:

The use of additive technology in Industry 4.0

Pokyny pro vypracování:

1. Popis aditivních technologií
2. Problematika průmysl 4.0
3. Aplikace aditivních technologií v kombinaci s Průmyslem 4.0

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

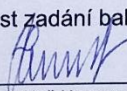
Ing. Aleš Herman, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

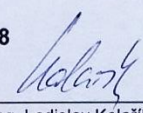
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

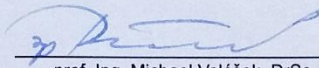
Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2018**


Ing. Aleš Herman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


doc. Ing. Ladislav Kolářik, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

9.5.2018

Datum převzetí zadání

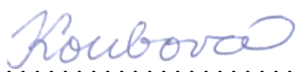
Koubová

Podpis studentky

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Využití aditivních technologií v Průmysl 4.0* vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a zdrojů.

Dne 5. srpna 2018


.....

Jana Koubová

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a odborný dohled. Mé poděkování patří též doc. Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D. za spolupráci při získávání údajů pro výzkumnou část práce a Ing. Petru Zikmundovi, Ph.D. za poskytnutí vzorků a informací.

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou aditivních technologií, Průmysl 4.0 a tím, jak se aditivní technologie mohou v Průmyslu 4.0 uplatnit. Jsou popsány kroky aditivního procesu a uveden přehled typů aditivních technologií. Dále je popsán koncept Průmysl 4.0 a hlavní technologické předpoklady pro jeho naplnění. Jsou popsány teoretické předpoklady pro vhodnost aditivních technologií pro Průmysl 4.0 a uvedeny 3 příklady reálných aplikací. V praktické části je zkoumána kvalita recyklovaného prášku pro technologii laserového spékání.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, aditivní technologie, aditivní proces, postprocessing, Průmysl 4.0, chytrá továrna, aplikace aditivních technologií, kovový prášek, recyklace prášku

ABSTRACT

This thesis deals with issues of additive technology, Industry 4.0 and how additive technology can be applied within Industry 4.0. The steps of additive process are described and an overview of additive technologies is provided. This thesis also describes the concept of Industry 4.0 and the main technological advancements needed for its realization. It describes theoretical advantages of additive technology making it apt for Industry 4.0 and gives 3 examples of real applications. In practical part the quality of recycled metal powder for laser melting is evaluated.

KEY WORDS

3D printing, additive technology, additive process, postprocessing, Industry 4.0, smart factory, application of additive technology, metal powder, powder recycling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOUBOVÁ, Jana. *Využití aditivních technologií v Průmysl 4.0*. Praha 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie. 59 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.

Obsah

PROHLÁŠENÍ.....	
PODĚKOVÁNÍ	
ABSTRAKT.....	
1. Úvod a cíl práce	7
1.1 Úvod.....	7
1.2 Cíl práce.....	7
2. Aditivní technologie.....	8
2.1 Popis aditivních technologií.....	8
2.2 Aditivní proces	8
2.3 Zásady pro aditivní vyrábění.....	10
2.3.1 Orientace části.....	10
2.3.2 Podpory a jejich odstranění	10
2.3.3 Dutiny a odlehčování součástí.....	10
2.4 Typy aditivních technologií.....	11
2.4.1 Vat Photopolymerization	11
2.4.2 Fused Deposition Modeling (FDM)	12
2.4.3 Material Jetting	13
2.4.4 Binder Jetting	13
2.4.5 Powder Bed Fusion.....	14
2.4.6 Direct Energy Deposition (DED)	15
2.4.7 Sheet Lamination.....	15
2.5 Výhody aditivních technologií.....	16
2.5.1 Rychlost	16
2.5.2 Redukce počtu výrobních kroků.....	16
2.5.3 Úspora materiálu.....	16
2.5.4 Univerzálnost.....	16
2.6 Postprocessing	17
2.6.1 Odstranění podpor	17
2.6.2 Úprava textury povrchu	18
2.6.3 Úpravy přesnosti součástí	18
2.6.4 Estetické úpravy	18
2.6.5 Netepelné úpravy vlastností	18
2.6.6 Tepelné úpravy vlastností	19
2.7 Hybridní technologie	19
2.8 Zavedení aditivní výroby v průmyslu.....	19
2.9 Využití aditivní výroby.....	20
2.9.1 Medicína.....	20
2.9.2 Letectví a kosmonautika	21
2.9.3 Automobilový průmysl	21

3. Průmysl 4.0	22
3.1 Úvod.....	22
3.2 Koncept Průmysl 4.0.....	22
3.2.1 Počítačové propojení.....	22
3.2.2 Interoperabilita	23
3.2.3 Virtualizace.....	23
3.2.4 Digitální továrny	23
3.3 Technologické předpoklady	23
3.3.1 Systémová integrace	23
3.3.2 Big Data	24
3.3.3 Autonomní roboty	24
3.3.4 Komunikační infrastruktura.....	25
3.3.5 Datová úložiště a cloudové výpočty	25
3.3.6 Aditivní technologie	26
3.3.7 Rozšířená realita	26
3.3.8 Senzory	27
3.3.9 Kybernetika a umělá inteligence.....	27
3.3.10 Nové technologie	28
4. Aplikace aditivních technologií v Průmyslu 4.0	29
4.1 Obecné předpoklady	29
4.2 Perspektivní materiály pro aditivní technologie	29
4.2.1 Kovové materiály.....	29
4.2.2 Chytré materiály.....	29
4.2.3 Tištěná hydraulika a elektronika	30
4.2.4 Speciální materiály a aplikace	30
4.3 Aditivní technologie vhodné pro Průmysl 4.0	31
4.4 Příklady využití aditivní technologie v Průmyslu 4.0	31
4.4.1 ARBURG.....	31
4.4.2 Voodoo Manufacturing	33
4.4.3 Concept Laser.....	35
5. Hodnocení vlastností kovového prášku	39
5.1 Popis stroje RENISHAW AM250	39
5.2 Popis technologie.....	40
5.3 Popis výrobního procesu	40
5.4 Problematika prášku	43
5.4.1 Problémy spojené s manipulací s práškem	43
5.4.2 Problematika recyklace prášku	43
5.5 Charakteristika prášku SS 316L-0407 dle výrobce	44
5.6 Testování	45
5.6.1 Elektronový mikroskop.....	46
5.6.2 Prosévací zkouška.....	52
6. Závěr.....	54
7. Seznam zkratk	56
8. Zdroje	57

1. Úvod a cíl práce

1.1. Úvod

Aditivní technologie zažívají v posledních letech rozmach a to nejen na poli prototypování, ale i jako prostředek pro výrobu finálních dílů. Obzvláště zajímavým odvětvím jsou aditivní technologie využívající kovy. Vývoj těchto technologií v posledních 20 letech pokročil tak daleko, že takto vytvořené součásti mohou svými vlastnostmi konkurovat součástí vyrobeným konvenčními technologiemi. Aditivní technologie také otvírají nové možnosti v designu součástí a topologické optimalizaci standardních designů. Doposud byly aditivní technologie využívány hlavně pro kusovou a malosériovou výrobu, jako samostatné výrobní jednoty neintegrováné do výrobních linek.

Zároveň probíhá vlna automatizace a digitalizace výroby, která vede k zefektivnění a zrychlení výrobních procesů ve všech odvětvích a při použití různých technologií. Tyto změny mají dopad nejen na průmysl, ale i na běžný život. Transformace, které právě probíhá je někdy označována jako čtvrtá průmyslová revoluce, v rámci průmyslu a s ním spojených odvětví se používá termín Průmysl 4.0.

Aditivní technologie jsou pravidelně uváděny jako jedna z klíčových technologií pro Průmysl 4.0., tedy jako součást plně automatizovaných a digitalizovaných výrobních procesů, bez informací ohledně toho, jak je lze do procesu zakomponovat. Příklady uvedené v této práci demonstrují, jak lze takové integrace dosáhnout a jak se tak mohou aditivní procesy vyrovnat konvenčním procesům v rámci produktivity.

1.2. Cíl práce

Cílem této práce je popsat vlastnosti aditivních technologií a to, jak korespondují s vizí Průmysl 4.0. Dále je cílem najít příklady využití aditivních technologií ve výrobě, která odpovídá konceptu Průmyslu 4.0 nebo se mu v některých aspektech blíží. V praktické části je cílem provést zhodnocení vlastností dlouhodobě recyklovaného kovového prášku se slitiny SS 316L-0407 používaného v zařízení používající aditivní technologii laser melting.

2. Aditivní technologie

2.1. Popis aditivních technologií

Aditivní technologie jsou technologie, které jsou schopny rychle a efektivně vytvořit fyzický model z dat získaných z 3D modelu vytvořeného pomocí modelovacího softwaru. Data modelu jsou rozdělena na jednotlivé řezy malé tloušťky, které jsou postupně nanášeny přídavky materiálu na sebe a tím vytvoří finální produkt. Čím menší je tloušťka nanášené vrstvy, tím bližší je geometrie součásti k digitálnímu modelu. Komerční aditivní technologie používají nanášení ve vrstvách, proto jsou finální vlastnosti aditivně vytvořené součásti závislé na směru stavby části. [1]

2.2. Aditivní proces

Aditivní proces lze obecně popsat v několika krocích, jak je schematicky zobrazeno na obr. 2.1.

Prvním krokem je získání datového modelu s definovanou vnější geometrií, případně plného digitálního modelu součásti. Tato data lze získat buď z 3D modelovacího softwaru nebo i pomocí laserového a optického skenování již existujících objektů.

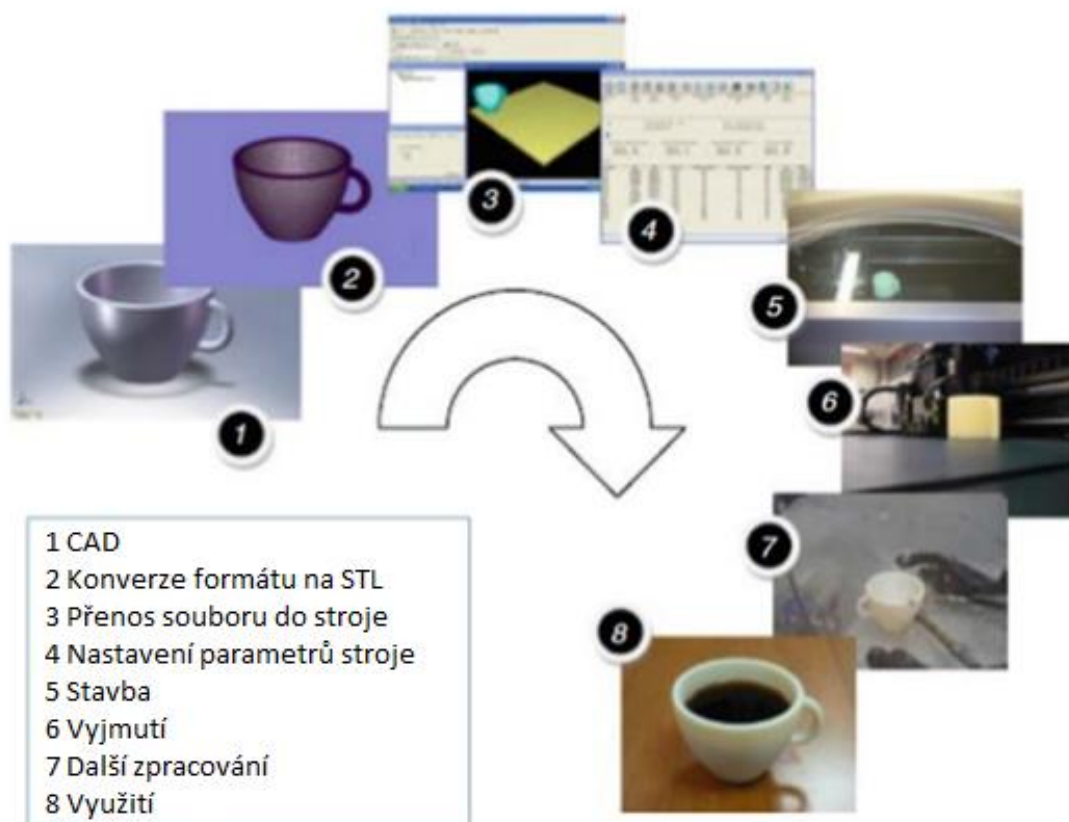
Druhým krokem je převedení dat do formátu STL, který se stal standardem v oblasti aditivní výroby. Tento formát popisuje vnější uzavřené povrchy a slouží jako podklad pro vytvoření řezů. Převodem dat do STL formátu se vymažou jakákoliv data o konstrukční geometrii a povrch výrobku se aproximuje pomocí trojúhelníkových plošek. Minimální velikost těchto plošek je obvykle dána v CADu a zpravidla se určuje taková, aby minimální odchylka trojúhelníkové plošky od skutečného modelu byla menší než rozlišení přístroje pro aditivní výrobu. Některé nedostatky formátu STL, jako to, že nenesou žádné další informace o materiálu, barvě, jednotce rozměru atp., byly napraveny v novém AMF formátu, který je nyní standardním formátem podle ASTM a ISO norem. Dále je třeba tento soubor dat v podporovaném formátu převést do zařízení pro aditivní výrobu a upravit jeho velikost a orientaci pro dobrou stavbu. Velikost a orientaci upravujeme hlavně kvůli požadavkům na stavbu více výrobků najednou a také abychom vzali v potaz případné smrštění materiálu při chladnutí nebo nanášení dalších vrstev v postprocessingu, jak se označuje následné zpracování ke zvýšení kvality výsledného produktu. Pomocí vizualizace, která je možná na většině zařízení, je také podstatné ujistit se, že přenos dat proběhl v pořádku a výrobek má požadovaný tvar.

Následuje příprava stroje pro výrobu, tedy volba vhodných parametrů, např. rychlosti, tloušťky vrstev a teploty. U strojů pro omezené množství typů materiálů je většinou množství nastavitelných materiálů omezené. Naopak u strojů, které mohou pracovat s velkou škálou materiálů je nastavení složitější. Díky nastavení parametrů lze také upřednostnit rychlost stavby před rozlišením finálního produktu, tedy vytvářet větší vrstvy.

U složitých průmyslových zařízení je obvykle k dispozici výchozí nastavení doporučené dodavatelem a je také běžnou praxí ukládat si nastavení, která v minulosti vyprodukovala součásti požadovaných vlastností pro pozdější referenci. Pokud jsou parametry nastaveny chybně, dojde i tak většinou ke stavbě součásti, nicméně kvalita takové části je obvykle neakceptovatelná. Před začátkem stavby musí také operátor zkontrolovat kvalitu a množství materiálu pro stavbu, a pokud je součástí stavby základní deska, pak ji připevnit do stroje a zkontrolovat její přesnou pozici. Části tohoto procesu mohou být částečně či plně automatizovány.

Pokračuje se samotnou stavbou aditivně vytvářené součásti. Tato fáze je značně autonomní a zpravidla nevyžaduje dozor ani zásahy obsluhy stroje.

Dalším krokem je vyjmutí součásti ze stroje (zpravidla se základní deskou) a oddělení výrobku od základní desky. Design aditivně vytvářené části (a její umístění) by měl být takový, aby vyžadovala minimální zásahy. Před samotným použitím součásti je nicméně někdy nutný postprocessing, který má za úkol zlepšit vlastnosti součásti, kvalitu povrchu a odstranit případné podpěry, pokud je design dané součásti pro stavbu vyžadoval. Zároveň může součást vyžadovat další úpravy jako nanášení povrchových vrstev nebo barvy před finálním uvedením do provozu. [1]



2. 1 Proces aditivní výroby v krocích [1]

2.3. Zásady pro aditivní vyrábění

Jednotlivé zásady pro návrh podpor a designu součásti se liší při použití různých metod aditivní výroby. Dále uvedené principy můžeme generalizovat pro většinu aditivních výrobních procesů. [1]

2.3.1. Orientace části

Orientace součásti ve stavebním prostoru může mít dopad na přesnost reprodukce dat z CADu. Zvolení správné orientace je proces, který vyžaduje lidský vstup, jelikož u složitých geometrií nemusí být zřetelný ideální směr stavby. Je proto třeba učinit rozhodnutí po zvážení zachování geometrie důležitých funkčních prvků, časové (ekonomické) náročnosti stavby, počet nezbytných podpor pro danou orientaci součásti a případné možnosti poškození funkčních ploch, pokud by navazovaly na základní desku. Pro většinu aditivních procesů je pravidlem, že povrchy orientované vzhůru mají lepší výsledné vlastnosti než ty orientované dolů. [1]

2.3.2. Podpory a jejich odstranění

Ačkoliv vliv podpor na fyzikální vlastnosti hotové součásti je stále vyšetřován, jsou nezbytným prvkem pro vytváření převislých povrchů, jelikož brání deformaci způsobené vlastní vahou povrchu a také deformaci zkroucením vlivem velkého teplotního gradientu. Podpory mohou mít mřížkovou strukturu pro ušetření materiálu a celkové zrychlení stavby. [2]

Optimalizace součásti tedy nezahrnuje pouze optimalizaci tvaru pro funkčnost, ale také orientaci součásti ve stavebním prostoru, případně úpravu geometrie pro minimalizaci potřeby podpor. Důvod pro minimalizaci počtu podpor je ekonomika stavby a zároveň náročnost odstranění podpor a následné úpravy povrchu po odstranění podpor. Odstranění podpor může ovlivnit orientaci. Pokud by se při jedné orientaci součásti nacházely podpory uvnitř součásti na těžko dostupných místech, musíme dát přednost té orientaci, kde budou podpory z vnější strany a tedy odstranitelné. [1]

2.3.3. Dutiny a odlehčování součástí

U některých součástí s tlustými stěnami lze nahradit vnitřní prostor dutými prvky, např. s mřížkovou strukturou. Tím se sníží doba stavby, cena materiálu a dojde ke snížení celkové váhy výrobku.

U součástí, které obsahují vnitřní uzavřené dutiny je třeba při práškové výrobě, stejně tak i při výrobě vytvrzováním tekutin ponechat otvory pro následné odstranění média po samotné stavbě. [1]

2.4. Typy aditivních technologií

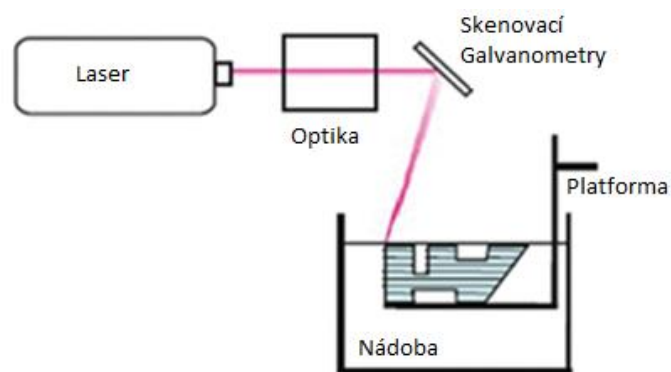
2.4.1. Vat Photopolymerization

Soubor technologií využívající polymerizace tekutého fotopolymeru při vystavení UV a viditelnému záření v nádobě. Po ozáření proběhne ve fotopolymeru chemická reakce a dojde ke změně skupenství z kapalného na pevné. Tyto metody dosahují vysoké kvality a přesnosti povrchu. [1] [3]

Pro proces fotopolymerizace se používají 3 základní konfigurace:

a) Vector scan

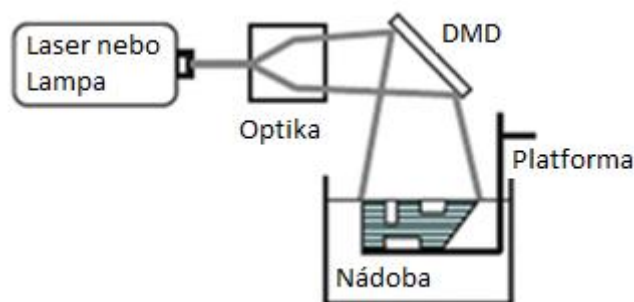
Bodový přístup. Paprsek se pohybuje po vektorech a tím se vytvrzuje daný řez. Tento přístup je typický pro komerční stereolitografické stroje. Výrobek spočívá na platformě, která se s každou další vrstvou potápí hlouběji do nádoby. K vytvrzování dochází na hladině tekutého fotopolymeru, kde laser skenuje plochu řezu. Schéma metody je zobrazeno na obr. 2.2 [1]



2. 2 Schéma metody vektorového skenování [1]

b) Mask projection

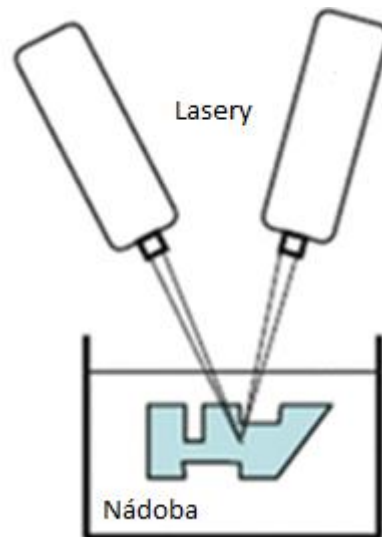
Vytvrzuje se celá vrstva najednou. Ozařují se celé jednotlivé řezy, tzv. masky, jak je vidět na obr. 2.3. Hlavní výhodou této metody je rychlost stavby. Dynamické promítání masek na hladinu může být realizováno LCD obrazovkami, prostorovými světelnými modulátory nebo DMD. [1]



2. 3 Schéma metody projekce masek [1]

c) Two-photon

Tento přístup zaručuje vysokou přesnost, jelikož se vytvrzuje bod po bodu v průsečíku dvou paprsků. Fotoiniciátor začne fotopolymerizovat pouze pokud je zasažen dvěma fotony. Zvýšení přesnosti je způsobeno tím, že pouze uprostřed paprsků je hustota fotonů taková, aby došlo k zasažení stejné fotomolekuly dvěma fotony. Metoda je schematicky vyobrazena na obr. 2.4.[1]



2. 4 Schéma metody dvou fotonů [1]

2.4.2. Fused Deposition Modeling (FDM)

Nejdostupnější a nejrozšířenější metoda založená na vytlačování termoplastu či kompozitu. Vytlačovaný materiál opouští extruder v polopevném stavu a musí zcela ztuhnout ve tvaru, v jakém byl vytlačen a též přilnout ke spodní vrstvě. Extrudér se pohybuje v horizontální ploše a zastavuje či spouští vytlačování materiálu podle dat pro stavbu. Po dokončení vytlačování materiálu v jedné vrstvě se buď posune extrudér o tloušťku vrstvy vzhůru, nebo musí o tutéž tloušťku poklesnout pracovní deska.

Vstupní materiál se v případě polymeru natavuje v zahřívací komoře, kam se přivádí ve formě filamentu. Přívod filamentu je zajištěn posouvacím kolečkem. Přísun nového filamentu také zajišťuje dostatečný tlak pro vytlačování. Nejčastějším materiálem pro FDM technologii je ABS plast. V případě keramiky je z extrudéru vytlačována keramická pasta, která rychle tvrdne a po stavbě mohou být výrobky vypáleny ve vysokoteplotní peci. [1] [3]

2.4.3. Material Jetting

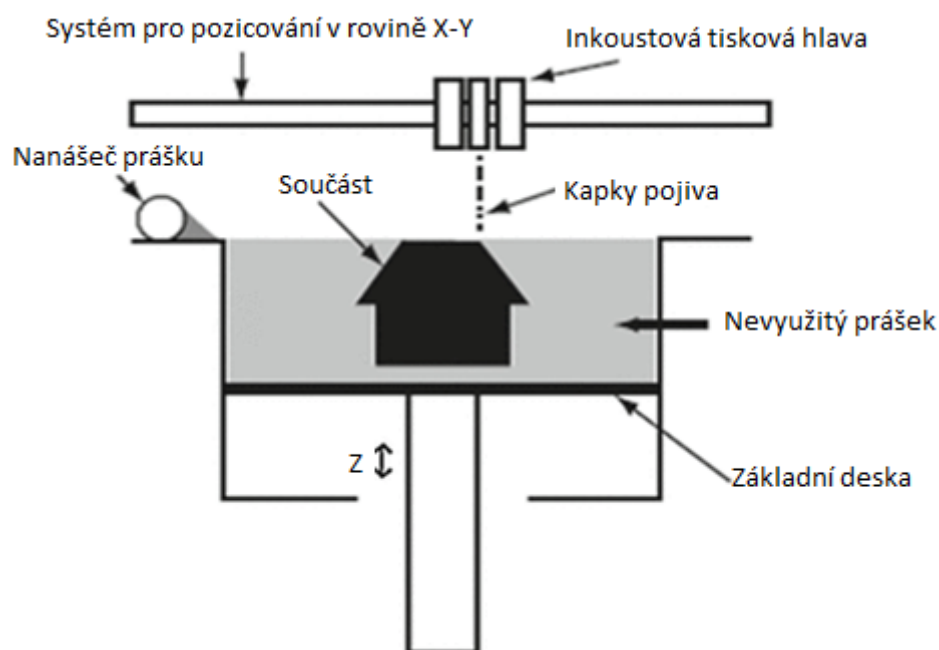
Jedná se o nanášení materiálu tryskáním z tiskové hlavy na podložku. Materiály, které mohou být tímto způsobem nanášeny, jsou vosky, kovy, tekuté polymery a keramika. Jedná se o technologicky náročnou metodu. První náročnou částí je formulace kapalného materiálu pro tryskání, ať už ohřátím, rozpouštěním, přidáním částic do transportní tekutiny nebo mícháním polymeru s polymerizačním iniciátorem. Mohou být přidány i další látky, aby daná tekutina měla požadované vlastnosti pro nanášení. Další náročnou částí je tvorba kapek při procesu tryskání a jejich následný dopad a uložení na povrchu součásti.

Výhodou je možnost dosažení vysoké přesnosti a též možnost použití více barev či materiálů během jedné stavby. [1] [3]

2.4.4. Binder Jetting

Metoda spočívá v kapkovém nanášení pojidla na práškové lože základního materiálu, přičemž dochází ke tvorbě kompaktní vrstvy ve tvaru řezu vyráběné součásti. Po nanesení pojiva v malých kapkách pro jednu vrstvu se základní deska práškového lože posune směrem dolů o tloušťku vrstvy a navrch je nanášena nová vrstva prášku. Proces se opakuje, dokud není stavba dokončena. Schéma procesu je na obr. 2.5.

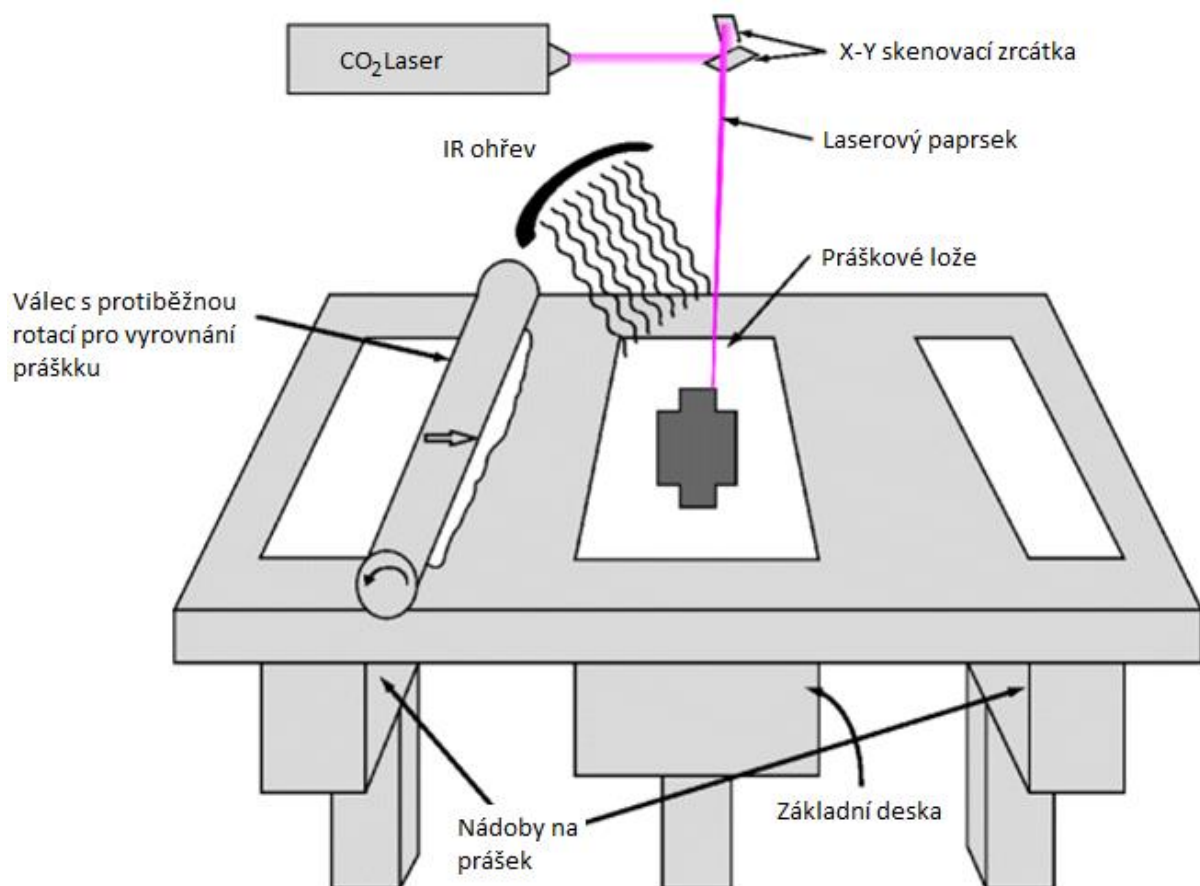
Pro výrobu touto metodou je možné použít řadu prášků z kovu, keramiky či polymeru. Výsledné vlastnosti součásti nezávisí pouze na materiálu, ale z velké části i na použitém pojidle. [1] [3]



2. 5 Schéma technologie Binder Jetting [1]

2.4.5. Powder Bed Fusion

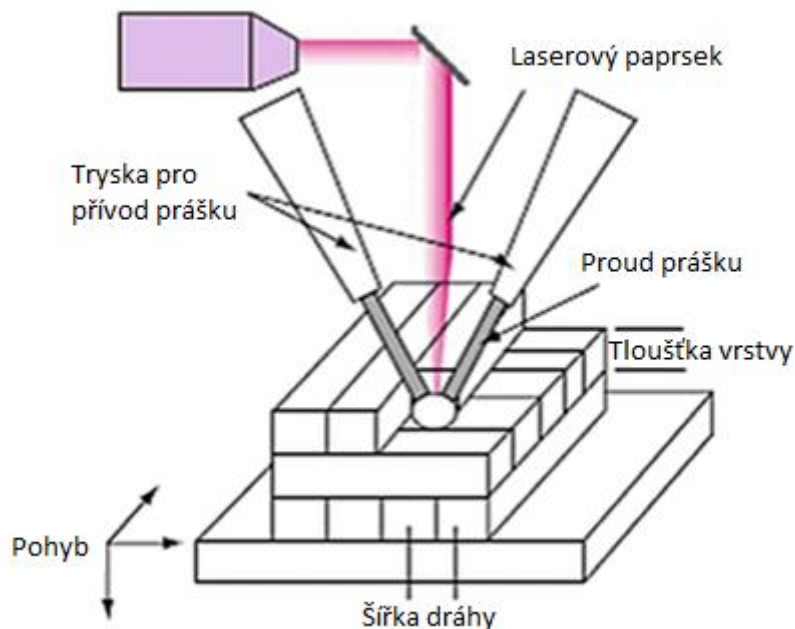
Částice v práškovém loži jsou spojovány jedním nebo více zdroji teplené energie v přesně určených oblastech. Po vytvoření vrstvy dojde k posunu základní desky dolů. Následně je na povrch přidán a uhlazen další prášek pro novou vrstvu. Metoda je vhodná pro širokou škálu materiálů, jako jsou kovy, plasty, keramika a kompozity. Procesům, které používají jako zdroj energie laser, říkáme Laser Sintering (LS). Sintering je pojem označující spojení částic prášku bez jejich tavení, tedy v pevném stavu při použití vysokých teplot. Do této kategorie se řadí procesy jako Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Laser Melting a další, které se efektivně používají jako synonyma pro tuto metodu, jejíž schéma je na obr. 2.6. [1] [3]



2. 6 Schéma technologie Powder Bed Fusion [1]

2.4.6. Direct Energy Deposition (DED)

Při procesech DED je materiál taven přímo při jeho nanášení. Nejčastějším materiálem používaným pro tuto metodu jsou kovové prášky a dráty, ačkoliv může fungovat i pro polymery, keramiku a kompozity s kovovou maticí. Energie, obvykle z laseru či elektronového paprsku, je soustředěná do jednoho místa, kde dojde k tavení základní desky nebo předchozí vrstvy a vznikne malé místo s tavnou lázní. Prášek se taví kontaktem s touto lázní a chladne jakmile se paprsek přesune. Někdy může být vstupní materiál taven již před dopadem. Pohybem paprsku se vytváří tenká vrstva pevného materiálu navařená na předešlou vrstvu. Schéma technologie s práškem jako vstupním materiálem je na obr. 2.7. Velkou výhodou je možnost použití této metody i k opravám poškozených dílů a také pro hybridní stroje, které kombinují aditivní a subtraktivní technologie. [1] [3]



2. 7 Schéma technologie Direct Energy Deposition pro prášky [1]

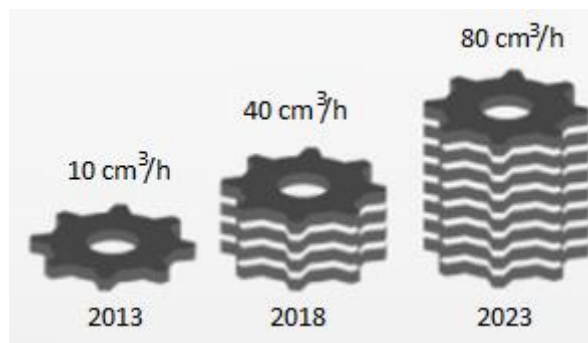
2.4.7. Sheet Lamination

Jedná se o spojování tenkých plátů, které byly do tvaru daného řezu vyřezány před spojením. Metodu lze použít pro papír, kompozity i kovové plechy. Pro spojování těchto plátů se používají různé metody, jako je lepení, tepelné spojování, upínání a ultrazvukové svařování. [1] [3]

2.5. Výhody aditivních technologií

2.5.1. Rychlost

Zvýšení rychlosti výroby není závislé pouze na rychlosti stavby jako takové (CNC zpravidla ubírá materiál mnohem rychleji, než ho aditivní výroba přidává), ale zároveň odpadají nebo se značně zkracují některé části výroby oproti konvenčním technologiím, např. příprava výroby jako takové, příprava modelů a forem, upínání atp. Rychlost výroby aditivními technologiemi spolu s vývojem technologií vzrůstá. Předpokládaný růst rychlosti stavby je vyobrazen na obr. 2.8. [1]



2. 8 Předpokládaný růst rychlosti tisku kovů [4]

2.5.2. Redukce počtu výrobních kroků

Tvarově složité součásti musí být někdy konvenčními technologiemi vyráběny ve více krocích, nebo dokonce nemohou být vyrobeny jako jeden výrobek a musí být rozděleny do vyrobitelných částí, které se později spojí do konstrukčního celku. Všechny tyto kroky u aditivní výroby odpadají, neboť součást se zpravidla staví v jednom kroku nezávisle na její složitosti. [1]

2.5.3. Úspora materiálu

Oproti subtraktivním metodám jako je CNC obrábění dochází u aditivní výroby k velké úspoře materiálu, neboť kromě materiálu samotné části je potřeba pouze malé množství na podpory, případně na malý přídavek pro obrobení povrchu v postprocessingu. Aditivní technologie jsou proto velmi vhodné pro práci se vzácnými kovy a drahými slitinami. [1]

2.5.4. Univerzálnost

Čím větší je složitost součásti, tím výhodnější je použití aditivní technologie oproti jiným konvenčním technologiím. Při dodržení základních zásad pro stavbu v aditivním stroji a velikosti stavebního prostoru je geometrie součásti téměř neomezená. Díky tomu lze experimentovat s bionickými strukturami a mřížkovými strukturami. [1]

2.6. Postprocessing

Postprocessing je důležitou součástí výroby součásti aditivní metodou a je nezbytný pro přípravu součásti pro použití. Pro různé typy aditivních technologií se postprocessing liší. Postprocessing je zároveň jedním z klíčových faktorů, ve kterém se liší různí výrobci při použití stejné technologie. [1]

2.6.1. Odstranění podpor

Podpory mohou být buď přirozené, zbytkový stavební produkt obklopující součást, nebo umělé podpory, pevné struktury, které jsou součástí designu pro tisk. Umělé podpory se využívají u procesů, kde stavební materiál není zároveň podporou pro stavbu a zároveň např. u práškového tištění kovů pro zamezení deformace. Umělé podpory mohou být vyrobeny ze stejného materiálu jako součást, nebo z jiného materiálu, který je zpravidla snadněji odstranitelný. [1]

Odstranění přirozených podpor

Uplatňuje se při procesech, kde je při stavbě celá součást obklopená stavebním materiálem, který musí být po stavbě odstraněn. Při procesech zahrnujících vysoké teploty je vhodné počkat s odstraněním okolního materiálu až po zchladnutí, aby se zabránilo deformacím způsobeným nerovnoměrným chladnutím.

Obvykle je dále celý blok (součást a obklopující materiál) vyjmut ze stroje a přenesen na pracoviště, kde je okolní materiál odstraněn pomocí štětců, stlačeného vzduchu, jemným otryskáním a dalšími metodami. Pro odstranění prášku v dutinách a kanálcích a prášku, který se při stavbě připekl na povrch součásti, se používají dentální nástroje nebo nástroje pro práci se dřevem. Čištění vnitřních otvorů a dutin je velmi pracné a zdouhavé, kvůli jejich špatné přístupnosti.

U některých nových přístrojů je automatické odstranění volného prášku integrované přímo do výrobní komory. Tyto systémy využívají vakuum a vibrace. [1]

Odstranění umělých podpor

Podpory ze stejného materiálu jako tisk jsou v případě, že materiálem je polymer, snadno manuálně odstranitelné. Na povrchu součásti zůstávají stopy po odstraněných podporách, a proto je někdy vyžadována další úprava povrchu. Pro podpory z kovu nebo keramiky je odstranění náročnější a je potřeba použít nástroje jako pily, brusky a další.

Podpory ze speciálního materiálu jsou snadněji odstranitelné. Pro plasty se používají jiné plasty, které mají nižší teplotu tání a mohou být odtaveny, nebo takové, které jsou rozpustné ve vodě nebo jiném rozpouštědlu. Pro kovy se používají slitiny s nižší teplotou tavení, anebo slitiny, které mohou být rozpuštěny v chemické lázni. [1]

2.6.2. Úprava textury povrchu

Nežádoucími vlastnostmi povrchu aditivně vytvořených součástí je schodovitost, přilnutí prášku, vzory od pohybu trysky a také pozůstatky po odstranění podpor. Ačkoliv schodovitost může být částečně odstraněna nastavením tenčích vrstev, může být požadováno další zpracování povrchu v závislosti na požadované kvalitě povrchu.

Pro výsledný matný povrch se používá kuličkování a pro výsledný hladký nebo leštěný povrch se využívá mokré nebo suché pískování a ruční leštění.

Další možnou úpravou je nátěr, který zároveň řeší porozitu povrchu a zmírňuje schodovitý efekt. [1]

2.6.3. Úpravy přesnosti součástí

Přesnost součástí závisí na zvolené metodě aditivního procesu. Některé procesy mohou dosáhnout tolerance v měřítku mikronů, jiné se s přesností pohybují kolem 1mm. Pravidlem je, že čím větší a rychlejší stavba, tím horší výsledná přesnost. Je nutno brát v potaz také smrštění součástí po zchladnutí a pozici součástí ve stavěcím prostoru. Některé vady přesnosti lze minimalizovat následným obrobením. [1]

2.6.4. Estetické úpravy

Pro součásti na viditelných místech nebo umělecké objekty vytvořené aditivní technologií je možné použít celou řadu úprav povrchu. Pro úpravu povrchu lze použít již zmíněné metody jako pískování, otryskání, kuličkování a leštění. Pro změnu barvy povrchu lze některé součásti barvit ponořením do barev. Tento proces pracuje velmi dobře u částí vytvořených metodou práškového lože, které mají na povrchu přirozenou porozitu, která napomáhá přilnavosti barvy. Další možnou úpravou povrchu je povlakování prvky jako je chrom, nikl, měď a slitiny. [1]

2.6.5. Netepelné úpravy vlastností

Součásti vytvořené vytlačováním nebo metodou práškového lože mají často na povrchu porózní strukturu, která může být později vyplněna materiálem s žádanými vlastnostmi majícími kladný vliv na sílu, tažnost, odolnost proti teplotě, odolnost proti vzplanutí atd.

Pro části z polymerů vytvářených pomocí UV záření je častou operací po stavbě vytvrzování, jelikož mnoho fotopolymerů není v lázni vytvrzeno úplně. Tyto části jsou pak ve stroji zalité UV i viditelným zářením a tím dojde ke kompletnímu vytvrzení povrchu i podpovrchových částí součástí. [1]

2.6.6. Tepelné úpravy vlastností

Fotopolymery mohou být po stavbě a vytvrzování ošetřeny i tepelně v nízkoteplotní peci za účelem dovytvrzení a zlepšení mechanických vlastností.

U kovových výrobků se používá tepelné ošetření hlavně k formování žádaných mikrostruktur a k eliminaci zbytkových napětí. Některé procesy byly vytvořeny tak, aby se zachovala zrnitá struktura, ale byla ošetřena zbytková napětí a zvýšena tažnost.

Některé procesy pracují tak, že je nejprve aditivně vytvořena součást z kovového prášku a pojiva a ta je v postprocessingu vypálena v kovovou nebo keramickou součást. [1]

2.7. Hybridní technologie

Trendem posledních let je vývoj a výroba strojů pro hybridní výrobu, které v sobě kombinují aditivní a subtraktivní výrobní technologie. Subtraktivní složka zpřesňuje výrobní proces a zajišťuje požadovanou kvalitu povrchu, např. ofrézováním povrchu. Zpravidla platí, že větší část výroby ve stroji tvoří aditivní část s minimální účastí subtraktivní metody.

Existují i výrobní procesy, kde je poměr opačný a to hlavně pro velké součásti. Zde se nejprve vyrobí a obrobí velké vrstvy, které se poté aditivně spojí. Tento proces se využívá hlavně, pokud je výrobek tak velký, že by v obráběcím centru omezil pohyb a dosah nástroje. [1]

2.8. Zavedení aditivní výroby v průmyslu

Před zavedením aditivní technologie do výrobního procesu je nutné provést ekonomickou analýzu. Při současném stavu technologie je aditivní výroba vhodná spíše pro menší série nebo tam, kde jsou plně využité její přednosti nedosažitelné jinou technologií.

Největším nákladem je zakoupení aditivního stroje, jehož cena se pro průmyslové aplikace pohybuje kolem 20 milionů korun. Dalším nákladem, který nelze zanedbat, je náklad na vstupní materiál s ohledem na jeho degradaci s časem. Dále je nutno započítat náklady na manipulaci a postprocessing.

Investici však nelze zavrhnout pouze s ohledem na výslednou vyšší cenu součásti, pokud lze díky úpravě v designu součást vylepšit a tím zproduktivnit další výrobní proces. [5] Dalším příkladem pak může být výroba vložky, která neumožňuje při chybě operátora obrábět a tím zabrání havarijnímu stavu, který je velmi nákladný. V takovém případě se může investice vrátit téměř okamžitě. [6]

2.9. Využití aditivní výroby

Ačkoliv na svém počátku byla aditivní výroba využívána hlavně k tvorbě modelů pro vizualizaci finálních produktů, dnes najde uplatnění i při výrobě finálních součástí v různých odvětvích průmyslu. Hlavními odvětvími, které se zasloužila o rozšíření aditivních technologií, jsou medicína, letectví, kosmonautika a automobilový průmysl. [1]

2.9.1. *Medicína*

V oblasti medicíny najde využití především možnost aditivních technologií vytvářet zcela jedinečné výrobky z CAD dat přizpůsobené jednotlivým pacientům.

Prvním využitím aditivních technologií v medicíně byla výroba modelů pro přípravu lékařů a pomocného personálu na náročnou operaci. Výhodou modelů je možnost replikace tvaru podle CT pacienta a barevné zvýraznění různých částí modelu pro snadnější orientaci.

Dalším využitím za pomoci dat z CT skenu je výroba protéz a náhrad, které oproti univerzálním protézám způsobují menší pooperační bolest a komfortnější užívání. Takovéto náhrady lze vyrábět z titanu nebo cobaltchromu a dalších slitin. Ačkoliv aditivní technologie zpracovávající kovy nejsou bez dalších úprav vhodné pro výrobu kloubních náhrad, porozita jejich povrchu se osvědčuje u náhrad kostí, kde napomáhá osidlování povrchu implantátu kostními buňkami. Příkladem kostního implantátu, kde dojde k využití výhod aditivních technologií je např. obličejový implantát z titanu, který je vyobrazen na obr. 2. 9. [1]



2. 9 Obličejový implantát z titanu [7]

2.9.2. Letectví a kosmonautika

Letectví bylo jedním z oborů, kde se aditivní technologie začaly využívat nejdříve, jelikož nabízejí možnost vytvářet komplexní geometrie. Letectví a kosmonautika jsou také odvětvími, kde jsou tradičně vyšší investice do inovací. Možnosti aditivních technologií, které jsou přínosné pro tato odvětví, jsou: vytváření odlehčených topologicky optimalizovaných struktur, vytvoření chladicích systémů pro extrémní teploty, možnost vytvářet multifunkční geometrie, nízkopočtová a nízkoobjemová výroba specializovaných dílců a prototypů bez nutnosti tvorby forem a upínek a možnost vytvoření náhradní součásti z digitálního modelu místo jejich skladování. [1]

2.9.3. Automobilový průmysl

S automobilovým průmyslem se pojí velké objemy výroby a obvykle tam proto není aditivní výroba vhodná, ale našla si svoje místo v prototypování spojeném s vývojem nových produktů. Zároveň se uplatňuje pro některé prvky automobilů s nízkým počtem vyrobených kusů, tedy hlavně pro některé prvky luxusních automobilů, jako je přívod chladicí kapaliny pro Audi W12 na obr. 2.10., anebo náhradní prvky již nevyráběných historických modelů. Velké využití je též v závodním odvětví automobilového průmyslu, ať už k testování zmenšených modelů, nebo pro některé prvky závodních vozů.



2. 10 Část pro Audi W12 vytvořená metodou práškového lože [8]

3. Průmysl 4.0

3.1. Úvod

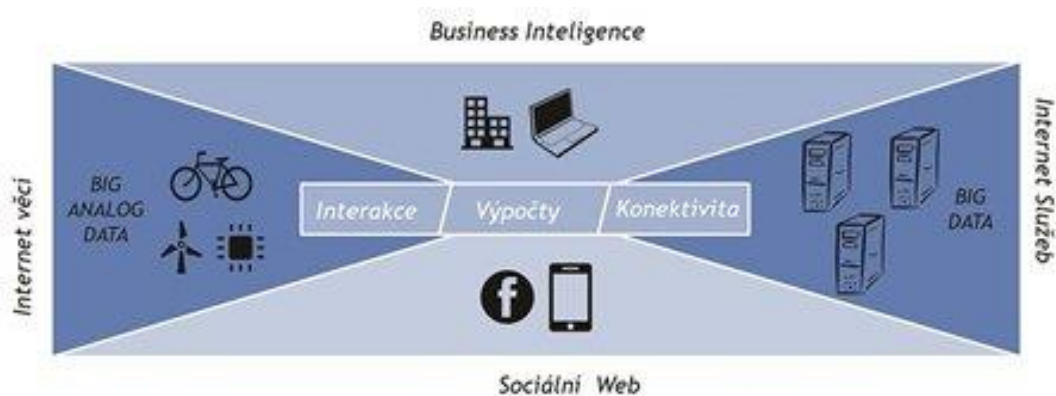
Průmysl, ekonomika i způsob života se rapidně mění s rozmachem informačních technologií, kyberneticko-fyzických systémů a umělé inteligence. Změny tím způsobené jsou tak rozsáhlé, že se pro ně zavedlo označení 4. průmyslová revoluce. Průmysl 4.0 je české označení iniciativy pro podporu manifestace 4. průmyslové revoluce v průmyslu pocházející z expertní studie *Národní iniciativa Průmysl 4.0*, která vychází z obdobné platformy v SRN *Industrie 4.0*, která byla představena v dokumentu na veletrhu v Hannoveru v roce 2013. Obdobné projekty a označení vznikly i v dalších státech, např. v Rakousku *Produktion der Zukunft*, ve Švédsku *Produktion 2030* a ve Velké Británii *High Value Manufacturing*. Tyto iniciativy se zaměřují na stejný problém, a to na přijetí nové filosofie kombinace, integrace a propojení různých technologií za jejich exponenciálního rozvoje. [9] [10]

3.2. Koncept Průmysl 4.0

3.2.1. Počítačové propojení

Předpokládá se přeměna výroby z menších samotných automatizovaných jednotek na integrovaná automatizovaná a optimalizovaná výrobní prostředí. Tzn. úplné propojení strojů, výrobků, senzorů, polotovarů, IT systémů a dalších podnikových jednotek pomocí počítačů a internetu do jedné inteligentní sítě podél hodnotového řetězce. Tyto sítě můžeme též nazvat kyberneticko-fyzické systémy.

Propojení Internetu věcí, Internetu lidí a Internetu služeb a Technologie velkých dat poskytuje také prostor pro vývoj zákaznického servisu. Propojení znázorňuje obr. 3.1. [9] [10]



3. 1 Inteligentní entita v kyberprostoru [10]

3.2.2. Interoperabilita

Je schopnost kyberneticko-fyzického systému a všech účastníků výrobního procesu spolu komunikovat prostřednictvím Internetu věcí a Internetu lidí v reálném čase. [9] [10]

3.2.3. Virtualizace

Je proces propojení fyzických objektů a systémů s virtuálními modely a simulátory. Rozhodování probíhá paralelně a autonomně v subsystémech, které spolu komunikují. Řízení přestává být pouze vertikální, ale používají se vertikálně i horizontálně integrované IT systémy. [9] [10]

3.2.4. Digitální továrny

Digitální továrny jsou někdy též označovány jako „inteligentní továrny“. Jejich základním prvkem jsou kyberneticko-fyzikální systémy. Digitální továrny budou schopny relativně samostatně reagovat na okamžitou měnící se poptávku, provádět autoregulaci v podobě kontrol a oprav a aktivně optimalizovat výrobní proces, který v nich probíhá. Fyzické objekty, stroje a polotovary budou mít svoje virtuální duplikáty, které budou figurovat v simulacích používaných k rozhodovacím a řídicím procesům. Díky pružné výrobě bude možné vyrábět i malé výrobní dávky přizpůsobené požadavkům zákazníka. V digitálních továrnách nebudou lidé zastávat manuální práci, ale budou nepostradatelní v kreativních úkonech. Zároveň budou vzrůstat požadavky na kvalifikaci a odbornost pracovníků.

Inovace potřebná pro vznik digitální továrny může přijít zvenčí nebo zevnitř firmy, ale návrh řešení musí zpravidla obstarat firma sama tak, aby inovace odpovídala poptávce na výrobu a nedocházelo k prostojům drahého zařízení. Při spojování různých systémů je třeba zvolit jeden páteřní systém, na který navazují a s kterým spolupracují další odvětví, aby se zamezilo duplicitě dat. Správný chod digitální továrny závisí na propojení obchodu a výroby, proto je důležitým prvkem stanovení prognóz a simulací k zajištění plynulého chodu včetně dodávek materiálu atp. [9] [11]

3.3. Technologické předpoklady

3.3.1. Systémová integrace

Integrace skrze komunikaci každého prvku s každým, pokud je to potřeba. Autonomní subsystémy spolu komunikují, kooperují a koordinují činnosti. Řízení se mění z centrálního na decentralizované, kde někdy chybí jakákoli centrální řídicí autorita. Aby mohla být tato komunikace a integrace zajištěna, musí být prvky, které se nedokáží samy reprezentovat reprezentovány softwarovými agenty, kteří je v procesu zastupují. Propojují se dva světy, svět fyzických objektů a svět virtuální. Musí být vyvíjeno softwarové prostředí, které tuto komunikaci a systémovou integraci umožní společně se zpracováním velkého množství dat v reálném čase.

Integrace má 3 pilíře:

1) Vertikální integrace výrobních systémů

Jedná se o provázání řízení v rámci samotného výrobního podniku. Důraz je kladen na znalost řídicí techniky a automatizace a vývoj informačních systémů.

2) Horizontální informace

Propojuje účastníky dodavatelsko-odběratelského řetězce až k zákazníkovi za účelem zvýšení flexibility, optimalizace výše zásob a snížení nákladů.

3) Integrace všech inženýrských procesů

Jde o speciální integraci horizontálního charakteru v rámci celého životního cyklu produktu. Existují softwarové nástroje pro návrh samotného produktu, linky a dokonce i továrny v digitálním prostředí a jejich testování. To značně zrychluje uvedení do provozu. Obdobně lze otestovat i řídicí systém napojením na digitální linku. [9]

3.3.2. Big Data

Analýza „velkých dat“ (10^{15} bytů a více) je součástí Průmyslu 4.0. Jedná se o různá data, ze kterých je možné analýzou vytěžit praktické informace a znalosti. Jedním z velkých problémů v této oblasti je nedostatek odborníků pro danou tematiku. Zdroji pro velká data jsou data z internetu, ze senzorů, ze sociálních sítí, atd. Zpracování těchto dat se provádí za účelem optimalizace.

Oblast analýzy dat je nenáročná na materiálové zdroje, které jsou pouze výkonná výpočetní technika zapojená do rychlých sítí. Náročná je na lidské zdroje, proto je snaha vyvinout metody strojového učení a rozpoznávání pro automatickou analýzu dat. [9]

3.3.3. Autonomní roboty

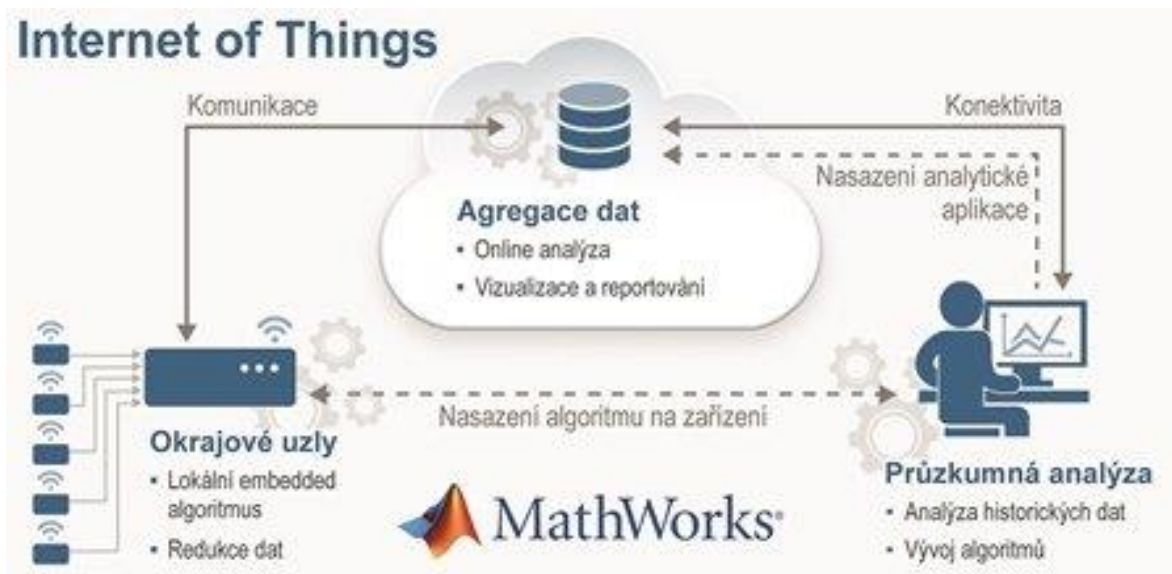
Vývoj autonomních robotů má za účel zvýšení produktivity práce. V současné době jsou rozšířené roboty, které jsou uzpůsobeny pro specifické úkony v rámci výrobního procesu ve hromadné výrobě. Na autonomní roboty se zaměřuje zejména automobilový průmysl. Počáteční investice jsou vysoké a je třeba zaměstnat také kvalifikovanou obsluhu. Výhodou novějších univerzálnějších robotů je možnost přeprogramovat je pro jiný účel v závislosti na požadavcích odběratelů. Možností pro snížení nákladů na pořízení robotů v budoucnu je organizace servisu pro zapůjčení robotů podnikům včetně know-how. [9]

3.3.4. Komunikační infrastruktura

Narůstající požadavky na přenos dat ze senzorů a komunikujících zařízení. Je potřeba zajistit spolehlivé a bezpečné vysokorychlostních sítí, jak pevné tak bezdrátové. Pro komunikaci v rámci Internetu věcí, tedy mezi jednotlivými zařízeními, je časté využití rádiového spektra. V budoucnu se počítá s rozvojem optických komunikačních systémů ve volném prostředí. Kromě bezdrátového přenosu se budou uplatňovat vysokokapacitní komunikační trasy pro práci s velkými daty a cloudovými úložišti. [9]

3.3.5. Datová úložiště a cloudové výpočty

Data získaná z Internetu věcí, informačních systémů a výrobních strojů jsou ukládána v datových úložištích, kde mohou být zpracována pomocí cloudových výpočtů. Klíčová je možnost vzdáleného přístupu k datům pomocí internetu. Úložiště mohou být veřejná, soukromá, nebo hybridní, která kombinují veřejnou a soukromou složku. Další možností jsou hybridní úložiště, která sdílí několik podniků dohromady. Je třeba ověřit, zda poskytovatel dodržuje deklarované parametry, což lze udělat pomocí stávajících certifikací pro datová centra, které definují dostupnost, bezpečnost a vhodnost pro daný typ dat. Menší firmy, kterým se nevyplatí zřizovat vlastní datová centra, mohou využít služeb datových a výpočetních center. Roste riziko zneužití nebo odzizení dat v důsledku využívání center v různých geografických oblastech s odlišným legislativním rámcem pro manipulaci s daty. Do budoucna lze očekávat nárůst uživatelů i kapacity cloudů a datových úložišť, která budou využívána nejen podniky a jednotlivci, ale i autonomními zařízeními. Dále budou vznikat i komunitní cloudy pro skupinu podniků a jednotlivců se stejnými zájmy, či ve stejném odvětví. Propojení infrastruktury pro sběr a zpracování dat je vidět schematicky na obr. 3.2. [9]



3. 2 Schéma internetu věcí [12]

3.3.6. Aditivní technologie

Aditivní technologie odbourává náročnou technologickou přípravu výroby, ale zároveň vyžaduje, aby konstrukce byla provedena se zřetelem na technologické možnosti aditivní výroby. Data o konstrukci výrobku tedy neobsahují pouze tvar, ale i parametry. Klasický řetězec „konstrukce - příprava výroby – výroba“ se tedy stává kratším řetězec „konstrukce – výroba“, kde příprava je rozdělena do dat o konstrukci a vyšší inteligence výrobního stroje. Aditivní výroba ovšem nezkracuje proces pouze ve stadiu výroby, ale již ve stadiu vývoje a prototypování a je tak možné výrazně zkrátit proces uvedení výrobku na trh. Umožňuje též vyrábět tvarově odlišné díly bez nutnosti hardwarových či softwarových změn na pracovišti a je tedy ideální pro výrobu výrobků speciálně uzpůsobených každému zákazníkovi.

Aditivní procesy mají přesně definované parametry, jako je rychlost stavby v závislosti na zastavěném prostoru, předvídatelnou přesnost výrobku a tvarových ploch a množství potřebného materiálu. Díky těmto znalostem je možné optimalizovat skladové hospodářství a řízení zakázek. Aditivní výroba také znamená úsporu v energetice, např. při výrobě kovových dílů pro přesné strojírenství lze očekávat energetickou úsporu 30-50%.

Spolu s úplnou digitalizací procesu je možné spravovat systém vzdáleně. Ideálně tedy dojde k propojení internetových rozhraní, logistických systémů, automatizace, predikce a simulace výroby anákladů na ni a také kontrolních mechanismů do jednoho dodavatelského řetězce. [9] [13] [14]

3.3.7. Rozšířená realita

Rozšířená realita si klade za úkol rozšířit lidské vnímání o dodatečné informace, které buď nejsme schopni sami vnímat, nebo se může jednat o další informace vhodné například pro usnadnění montáže pracovníkům atd. Rozšířená realita přidává vizuální vjemy. U základních systémů se může jednat o textový popis umístěný kdekoli v zorném poli. U pokročilejších pak i 2D a 3D objekty a je umístěna do prostoru sledovaných objektů nebo místo nich.

Používají se dva principy pro kombinaci reálného vjemu s přidanou složkou:

a) Video see-through

Přidané vjemy jsou vkládány na obrazovku zařízení, které je třeba držet v ruce či jinak připevnit. Obraz může být zpožděný proti realitě, ale zato se jedná o přesnější augmentaci.

b) Optical see-through

Vizuální informace jsou přidávané přímo do cesty vizuálního vjemu uživatele, který má volné ruce např. pro manipulaci se součástmi. Při rychlých změnách pohledu může nastat chyba synchronizace.

V průmyslu se zatím rozšířená realita používá zřídka nebo jen na testovacích pracovištích. Uplatnění našla v zábavě a pro výcvik hasičů a armády.

V budoucnu je pravděpodobné využití rozšířené reality pro zefektivnění úkonů, které zahrnují lidskou práci. Upřednostňován bude Optical see-through v podobě brýlí, které nechávají ruce volné pro manipulaci. Některé scénáře pro využití rozšířené reality zahrnují např. skladové a logistické operace, doprava, montáž, servis zařízení, automatický překlad manuálů, vizualizace dat o předmětech z Internetu věcí a likvidace a recyklace výrobků. [9]

3.3.8. Senzory

Senzory jsou klíčovým prvkem automatizace a jsou nezbytné pro zajištění bezpečné interakce člověka se strojem. Senzory zajišťují snímání fyzikálních veličin, rozpoznání chemického složení a přísun obrazových a spektrálních informací. Senzory jsou nezbytné pro automatizovaný výrobní proces, jelikož poskytují data o daném procesu a tím i jeho kontrolu. Pokud mají mít moderní přístroje schopnost autoregulace, musí mít přístup i k informacím o veličinách ovlivňujících.

Žádané změny v oboru, které by přinesly posun, jsou: nahrazení elektromechanických snímačů tvarů a dimenzionálních veličin optickými metodami, pokrok na poli strojového a robotického vidění, nástup optovláknových snímačů, biochemické metody snímání chemického složení a možnosti prediktivní diagnostiky. Cílem pro sensoriku je poskytnout kvalitativně nové nástroje pro měření, snímání a zobrazování, čehož nelze docílit jen inkrementálním zlepšováním. Optická měřicí technologie postupně vytlačuje dotykovou, jelikož poskytuje více informací v kratším čase, ale jsou i oblasti, kde lze z technických důvodů použít pouze dotykovou metodu. [9] [15]

3.3.9. Kybernetika a umělá inteligence

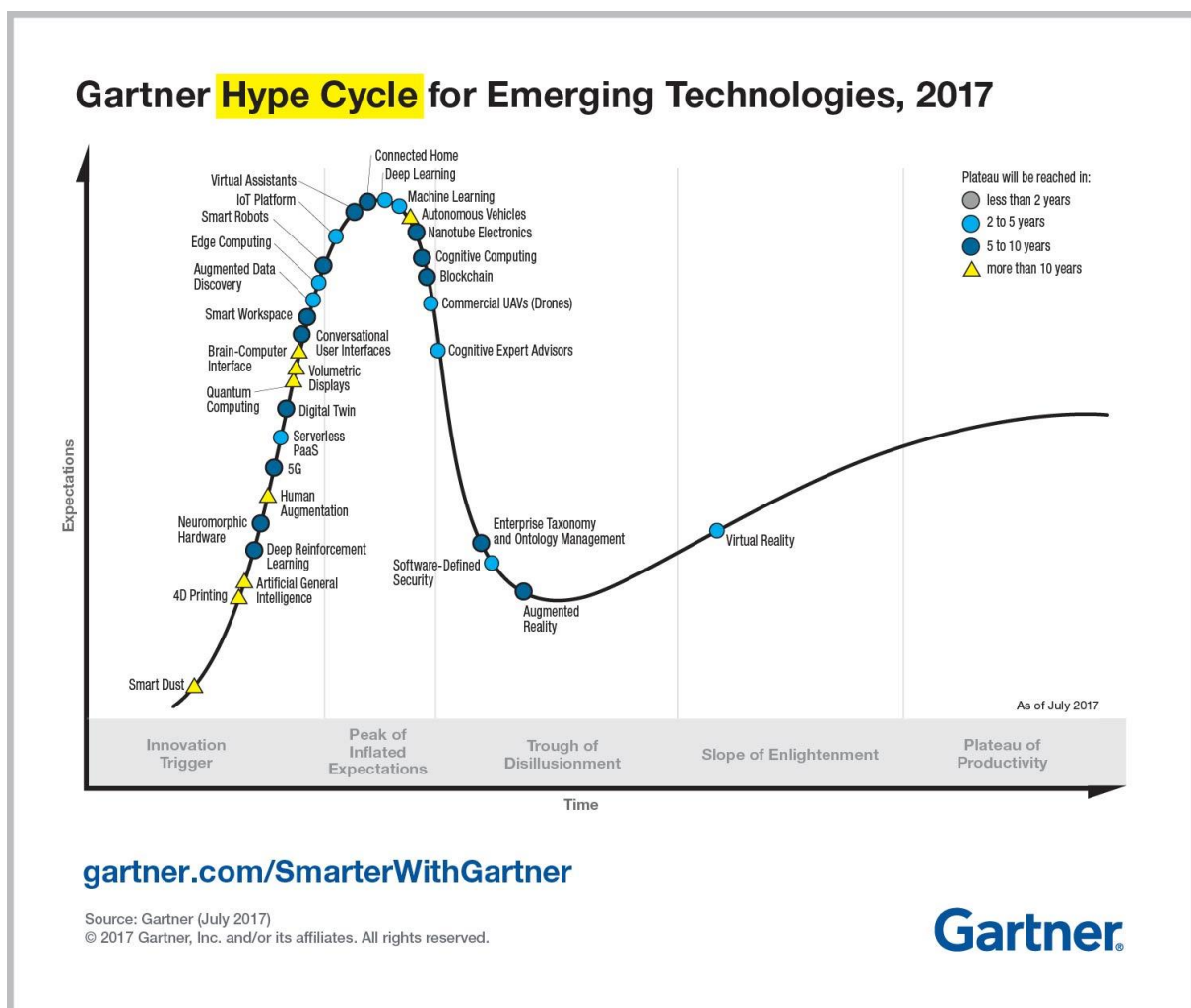
Poskytují teoretické principy pro organizaci, řízení, rozhodování a učení v komplexních systémech, kde spolu komunikuje soubor volně sdružených autonomních systémů. Základním teoretickým východiskem je studium multiagentních systémů. Zde se řeší chování systémů pro dosažení globálních cílů a využití sémantických informací. Je k dispozici mnoho algoritmů automatického řízení strojů, jen málo z nich je však uplatněno v praxi. Umělá inteligence podporuje techniky a technologie pro přístrojové učení a interakce člověk stroj. Velký rozvoj zažívá i strojové učení za podpory analýzy velkých dat. V budoucnu umožní agentové plánování zefektivnění výroby. Též budou rozvíjeny a uplatňovány metody automatického řízení za účelem úspor a optimalizace. [9]

3.3.10. Nové technologie

Rozvoj nových technologií se koncentruje kolem lidského života v oblasti digitálního obchodu a digitálního pracoviště, tzn. digitální humanismus. Dochází také k transformaci intenzivního rozvoje nových technologií na extenzivní, který je založen na kombinaci stávajících technologií. [9]

Na hype křivce společnosti Gartner, která je pro ilustraci na obr. 3.3, je možné sledovat vývoj nových technologií a v jakém se nacházejí stádiu v jejich vývoji a využití v průmyslu. V nových technologiích lze v posledních letech sledovat 3 hlavní trendy a to umělou inteligenci, digitální platformy a technologie, které se propojují s lidským vnímáním světa.

Z křivky pro rok 2017 plyne, že na vrcholu očekávání jsou technologie jako Internet věcí, hluboké učení, autonomní vozidla, virtuální asistenti, chytré domovy a chytré roboty. Na počátku křivky se ukazují nové technologie, inovace, které dosáhnou normalizace za 5 a více let. Mezi takové technologie patří chytré pracoviště, kvantové počítače, rozhraní mozek-počítač, lidská augmentace a další. [16]



2. 11 Hype křivka nových technologií pro rok 2017 [16]

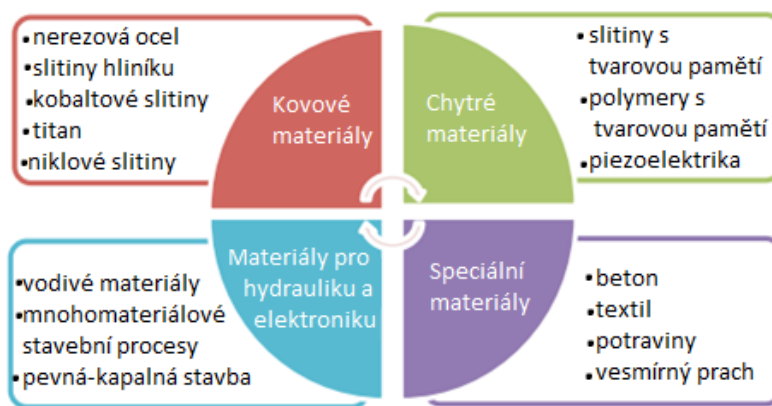
4. Aplikace aditivních technologií v Průmyslu 4.0

4.1. Obecné předpoklady

V konceptu Průmyslu 4.0 je kladen důraz na kustomizaci, pro niž se z hlediska nákladů a pracnosti výroby hodí nejvíce právě aditivní technologie. Jelikož Průmysl 4.0 vyžaduje automatizaci a optimalizaci procesů, je pravděpodobné, že se v konceptu Průmyslu 4.0 budou používat i hybridní technologie, případně budou výrobky přesunuty mezi jednotlivými pracovišti. [17]

4.2. Perspektivní materiály pro aditivní technologie

Přehled perspektivních materiálů podle kategorií i s příklady je obr. 4.1.



4. 1 Perspektivní materiály pro aditivní technologie v Průmyslu 4.0 [17]

4.2.1. Kovové materiály

Oblastí ve které může dojít ke zlepšení současných aditivních technologií je vývoj nových materiálů pro aditivní výrobu. I když je již možné vyrábět z různých kovů a slitin, je nasnadě dále se zabývat mikrostrukturou a jejím ovlivněním při výrobním procesu, jelikož ačkoliv se mechanické vlastnosti aditivně vyrobených součástí blíží součástem vyrobeným odléváním, ještě nedospěly do stádia, které by bylo průmyslově uspokojivé. V éře průmyslu 4.0 proto můžeme očekávat zlepšení ze strany materiálového inženýrství i kovových aditivních technologií. [17]

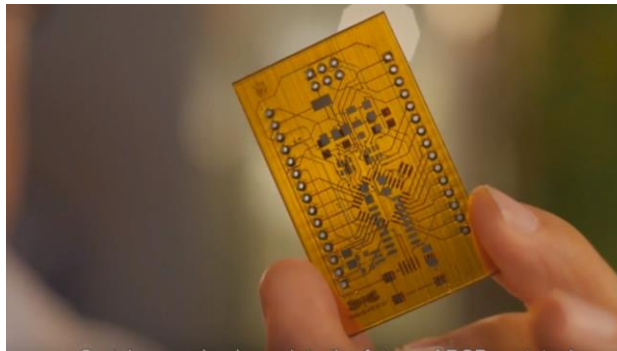
4.2.2. Chytré materiály

Chytré struktury mění svůj tvar nebo vlastnosti v závislosti na vnějších podmínkách. Materiály, z nichž se tyto struktury vyrábějí, chytré materiály, jsou také někdy označovány jako 4D materiály, jelikož mění své vlastnosti v čase. Jedná se především o slitiny a polymery s tvarovou pamětí. Tyto materiály nalézají využití v robotice, řízeném sekvenčním skládání a výrobě samostatně se vyvíjejících struktur. Samostatně se vyvíjející struktury z polymerů s tvarovou pamětí se nyní díky jejich biokompatibilitě vyvíjejí pro medicínské aplikace. [17]

4.2.3. Tíštěná hydraulika a elektronika

Jednou z inovativních technologií v aditivní výrobě je kombinace stavby z pevného a kapalného materiálu, které jsou tištěny zároveň za použití FDM technologie. Tímto způsobem mohou být vyráběny hydraulické mechanismy za sníženého počtu výrobních kroků.

Další z novinek je tištění vodivých materiálů, které umožňuje zabudování elektrických obvodů přímo do součástí či prvků, poté mluvíme o tzv. „vestavěné elektronice“. Již existují stroje pro rychlou výrobu prototypů profesionálních vícevrstvých desek s plošnými spoji. Jedním z nich je DragonFly 2020 od izraelského výrobce Nano Dimension, jehož produkt je na obr. 4.2. Pro firmu vyjde pořízení a provozování těchto strojů levněji než zadávání výroby mimo firmu. Ušetření na nákladech by v budoucnu mohlo vést i ke snižování cen elektroniky. Tento proces může být aplikován též na výrobu neplošných elektrických obvodů a objektů se zabudovanými elektrickými obvody, což je průlomový moment, neboť umožní výrobu elektronických součástí libovolných tvarů nedosažitelných současnými technologiemi. [17] [18]



4. 2 Deska plošných spojů vyrobená aditivní metodou [19]

4.2.4. Speciální materiály a aplikace

Pozornosti se též dostává aplikacím v civilním inženýrství, kde se pracuje hlavně s betonem. V nynější době jsou stavby pomocí škálovaného aditivního procesu spíše raritou. S rozmachem dostupných tiskáren se aditivní technologie stávají pomocníkem i ve šperkařství, oděvním průmyslu a v ojedinělých případech i v potravinářství.

Další možnou aplikací pro aditivní technologie je robotizovaná výroba s jejich pomocí v procesu kolonizace vesmíru. Nejen v rámci úspory váhy materiálu nutného pro aditivní výrobu náhradních a potřebných součástí proti transportu samotných částí, z nichž některé by nemusely být využity, ale i jako způsob využití ve vesmíru dostupných materiálů pro stavbu infrastruktury na kolonizovaném vesmírném tělese. [17] [20]

4.3. Aditivní technologie vhodné pro Průmysl 4.0

V Průmyslu 4.0 bude převládat zaměření na aditivní technologie zpracovávající kovy a na hybridní technologie, jelikož kovové součásti jsou nejpodstatnější z hlediska průmyslových aplikací.

Hybridní technologie jsou příkladem extenzivních inovací, kde dochází ke kombinaci dvou známých metod za účelem odbourání přebytečných kroků a tedy zjednodušení výrobního procesu z hlediska automatizace. Další zlepšení touto kombinací zahrnují zlepšení přesnosti, reprodukovatelnosti, tvarové volnosti a volby a úspory materiálů. Pro efektivní stroj využívající hybridní technologii je nutností možnost přepnutí mezi aditivní a subtraktivní metodou bez zásahu obsluhy. Pokud možno chceme realizovat výrobu v takovém stroji na jedno upnutí. Úspora při použití hybridních technologií je nejen časová, ale též na nákladech a použitém nářadí. Možným problematickým místem sloučení aditivní a subtraktivní technologie je v případě použití kovového nebo jiného prášku jako vstupního materiálu možné ohrožení obráběcí části stroje z hlediska čistoty. Vzhledem k velmi malým částicím prášku hrozí zanášení komponent obráběcího stroje nebo ložisek.

Pro adekvátní začlenění těchto technologií do průmyslové výroby v rámci konceptu Průmysl 4.0 je potřeba zaměření na souběžný vývoj nových CAD nástrojů, nástrojů pro strukturální analýzy, CAM systémů, systémů topologické optimalizace a přídavných jakostních kontrol.

[17] [21] [22]

4.4. Příklady využití aditivní technologie v Průmyslu 4.0

4.4.1. ARBURG

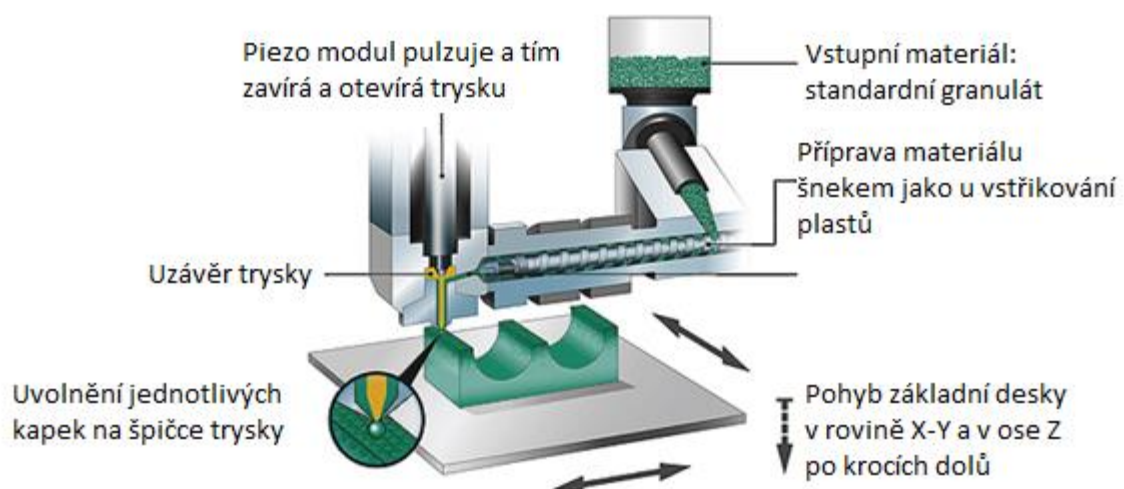
Jednou ze společností, která úspěšně zařadila aditivní výrobu do automatizovaného procesu je původem německá firma ARBURG, která má mateřský závod v Lossburgu, ale poskytuje služby a podporu téměř ve 100 zemích světa. Firma se zabývá především technologií zpracování plastů, a v jejich řešeních pro výrobu dle konceptu Průmyslu 4.0 figuruje i aditivní výroba na pozici finální kustomizace výrobku. Na příkladu individuálně přizpůsobitelných kancelářských nůžek demonstruje, jak realizovat kusovou výrobu i na výrobcích masového charakteru. Proces pracuje na kombinaci stroje ALLROUNDER, zařízení freeformer a automatizačních zařízení. [23] [24]

Popis procesu

Před začátkem procesu jsou specifikovány požadavky na úchyty nůžek a kustomizovatelnou část. Tato data jsou uložena a na nůžkách přístupná pomocí DCM kódu, který je součástí nůžek a obsahuje informace o daném kusu. Tento kód je na nůžkách vytvořen laserem po fázi vstřikování. Na začátku procesu je kovový komponent nůžek vložen do stroje ALLROUNDER 370 E, kde je vstřikováním vyrobena rukojeť podle dané specifikace. Takto vyrobené nůžky jsou posléze pomocí sedmiosého robota firmy KUKA přesunuty do stroje freeformer, kde je vyrobena kustomizovatelná část (viz obr. 4.3). Čas pro výrobu jednoho páru je cca 60s. Proces je plně automatizovatelný. Robot zajišťuje též nakládku a vykládku konstrukčního prostoru. Další výhodou je to, že vstupní materiál pro aditivní proces je stejný jako pro vstřikování, tedy plastové granule (viz obr. 4.4). [23] [24]



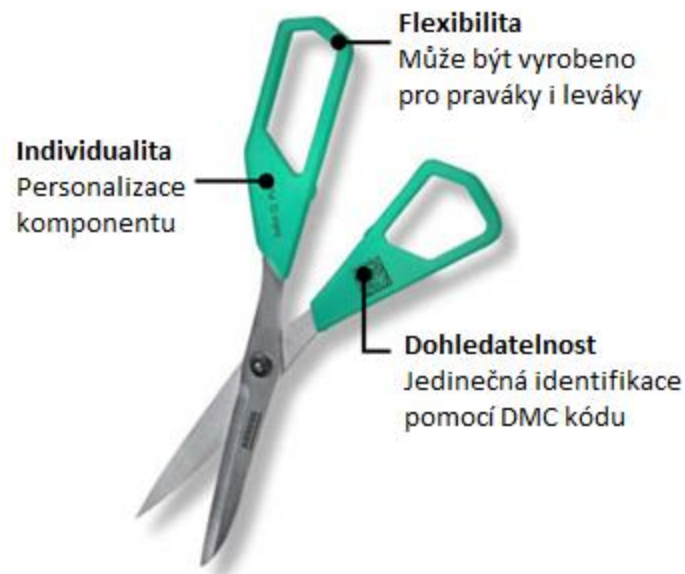
4. 3 Automatizovaná linka v místě transportu ze stroje ALLROUNDER do stroje freeformer [25]



4. 4 Proces zpracování vstupního materiálu před uvolněním tryskou [24]

Popis produktu

Výsledkem je produkt, který je v souladu s konceptem Průmyslu 4.0. Má části, které jsou plně přizpůsobené potřebám uživatele, ale tyto kusové specifikace jsou zakomponovány do rychlého výrobního procesu. Výrobek je vyobrazen a popsán na obr. 4.5. Každý výrobek obsahuje odkaz na informace o jeho specifikacích, výrobním procesu a životním cyklu. Tyto informace jsou přístupné odkudkoli pomocí chytrého telefonu. [23] [24]



4. 5 Popis produktu společnosti ARBURG [23]

4.4.2. Voodoo Manufacturing

Společnost Voodoo, start-up z Brooklynu, který se zaměřuje na výrobu plastových produktů aditivní technologií. Jejich cílem je zefektivnit a zrychlit aditivní výrobu natolik, aby byla schopná konkurovat vstřikováním plastů. Jejich dosavadní koncept spočíval v hromadném tištění na velkém množství tiskáren zároveň. Problémem v plynulosti výroby spočíval v obsluze tolika tiskáren manuálně. Proto v roce 2017 představila společnost koncept plně automatizované linky pro 3D tisk, Projeck Skywalker. Aplikace robotické paže do procesu může zvýšit produktivitu výroby až o 400% a potenciální ušetření na nákladech ve velikosti až 90% v následujících 3-5 letech. Využití továrny bez robotických paží je zhruba 30-40%. S využitím robotizace se využití může zvednout až na 90-95%. Už v počátcích podnikání počítala firma se škálováním výroby pomocí robotizace. Jejich vizí je škálovat výrobu z dosavadních 160 tiskáren na tisíce. Dle výpočtů by se měly investice do robotické paže společnosti vrátit do 6 měsíců. [26]

Popis procesu

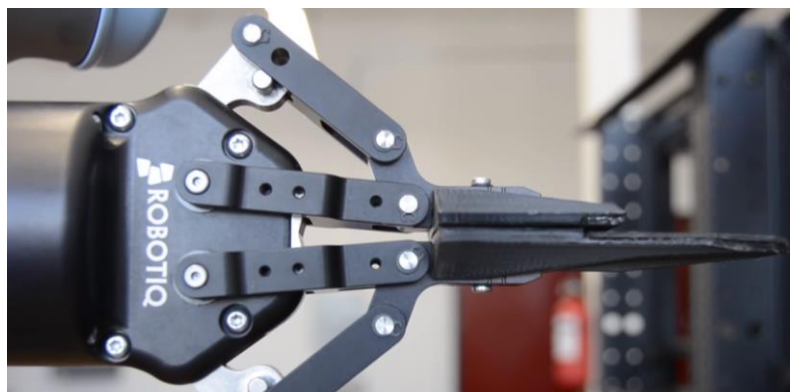
Ve fázi, kterou interně nazývají „sklizení“, sbírá robotická paže základní desky s produkty ze shluku 9 tiskáren a přemísťuje je na dopravníkový pás, jak je vidět na obr. 4.6. Po vyjmutí a přemístění zaplněné desky vloží paže novou základní desku do tiskárny. Pomocí softwaru pak do tiskárny přijde pokyn k pokračování výroby. To umožňuje neustálou výrobu i přes noc a masivní zvýšení produktivity.



4. 6 Shluk 9 3D tiskáren obsluhovaných robotickou paží [27]

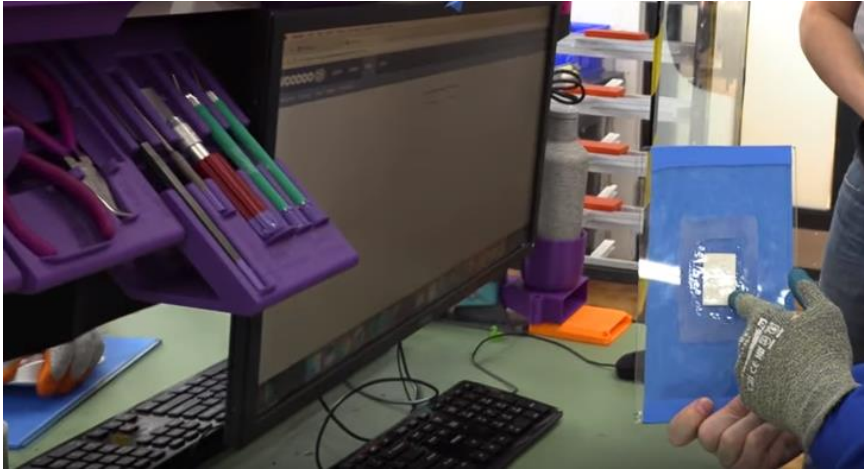
[26]

Proces využívá robotickou paži UR10 od firmy Universal Robots, která je navržena tak, že může bezpečně pracovat i v blízkosti lidí a je připravena pro rychlé zavedení do výroby. Tato paže unese náklad až do 10 kg a má radius dosahu až 130 cm. K dispozici je též mnoho kompatibilních nástavců, z nichž pro tuto aplikaci byl zvolen uchopovací nástavec ROBOTIQ (viz obr. 4.7). [28] [29]



4. 7 Uchopovací nástavec ROBOTIQ [28]

Dalším konceptem Průmyslu 4.0, který továrna využívá je umístění RFID čipu na stavěcí desku, takže v manuální části odstranění podpor a kontroly kvality součásti, lze načíst čip z desky do počítače a zobrazit data k danému produktu, který se na desce nachází. Umístění čipu je patrné na obr. 4.8. [30]



4. 8 Umístění RFID čipu na spodní straně základní desky [30]

Firma plánuje další automatizaci právě v oblasti postprocessingu, kontroly kvality a balení a transportu produktů. [28]

4.4.3. Concept Laser

Firma Concept Laser se zapojila do konceptu Průmyslu 4.0 s novými modulárními stroji, které mohou být propojené dle přání zákazníka a vytvořit tak „aditivní továrnu budoucnosti“ pro kovové materiály, která bude současně splňovat požadavky na „chytré továrny“ Průmyslu 4.0. Tento systém výrobních zařízení pojmenovala firma M LINE FACTORY. Odklon od samostatně stojících aditivních strojů přináší rychlejší, průmyslovější a ekonomičtější řešení vhodné i pro sériovou výrobu s vysokou opakovatelností. U samostatně stojících aditivních strojů vzniká mnoho prostojů a nedochází tak k plnému využití stroje. [31]

M LINE FACTORY

M LINE FACTORY je prvním konceptem, který se zabývá dohromady nejen stavbou součásti, ale i přípravou na ni a postprocessingem. Proces probíhá ve dvou oddělených jednotkách, M LINE FACTORY PRD pro stavbu a M LINE FACTORY PCG pro přípravu a postprocessing, které mohou být postaveny samostatně nebo v kombinaci a samostatně stojící jsou na obr. 4.9. Možnost oddělení umožňuje paralelní průběh procesů místo sekvenčního a tím další zvýšení produktivity. Jednotka pro stavbu pracuje s aditivní technologií na bázi práškového lože a může být vybavena 1 až 4 lasery o výkonu 400W nebo 1000W a pracovním prostorem s maximálním rozměrem 400 x 400 x 425 mm². [31]



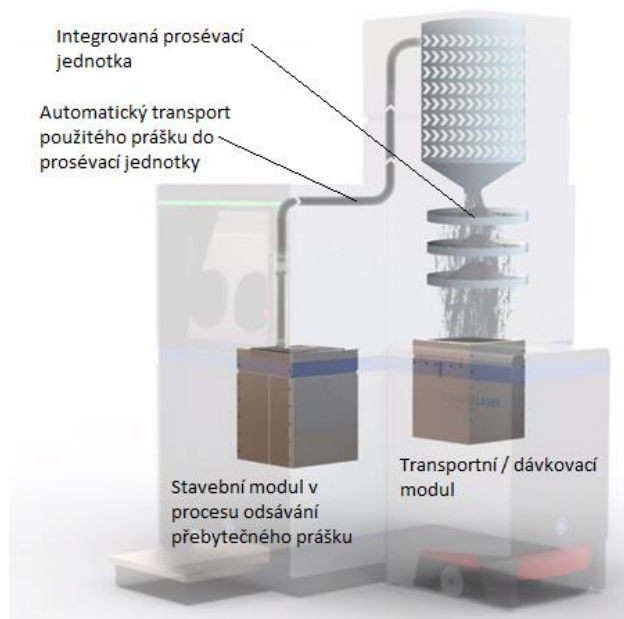
4. 9 Samostatně stojící jednotky konceptu M LINE FACTORY [31]

Vnitřek výrobní jednotky se skládá ze tří samostatných modulů (viz obr. 4.10). Modul v levé části je dávkovací modul, střední modul je stavební modul a modul v pravé části je modul pro přebytečný prášek. Tyto moduly mohou být jednotlivě přesunuty tunelovým systémem do transportéru a odpadá tedy nutnost přerušovat stavbu, pokud je potřeba vyměnit pouze jeden z okrajových modulů. Tento systém pro přesun se používá i pro přesun stavebního modulu do jednotky pro následné zpracování. Po přesunu je modul nahrazen dalším modulem pro stavbu a začíná stavba nové části. [31]



4. 10 Uspořádání modulů v produkční jednotce [31]

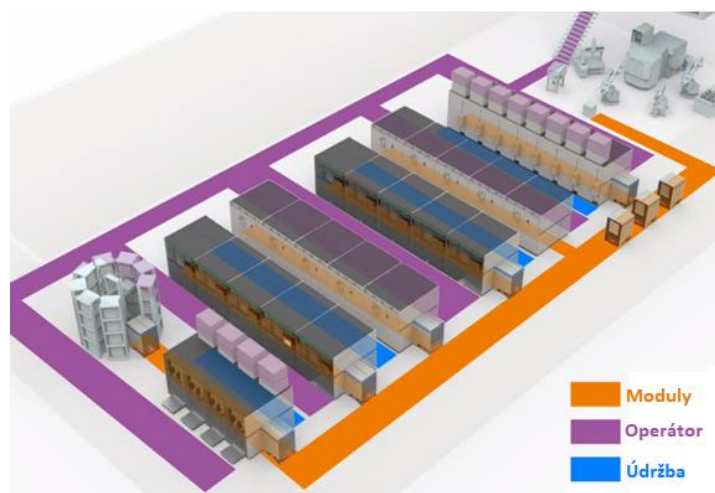
Stavební modul s hotovou částí obklopenou stavebním materiálem je přesunut do stroje M LINE FACTORY PCG pro očištění od okolního materiálu, které probíhá automaticky odsátím prášku, který prochází přes integrovaný prosévací systém (viz obr. 4.11) do transportního modulu. To vytváří ideální model práškového managementu, kde v žádné z fází procesu nepřichází operátor do styku s práškem. [31]



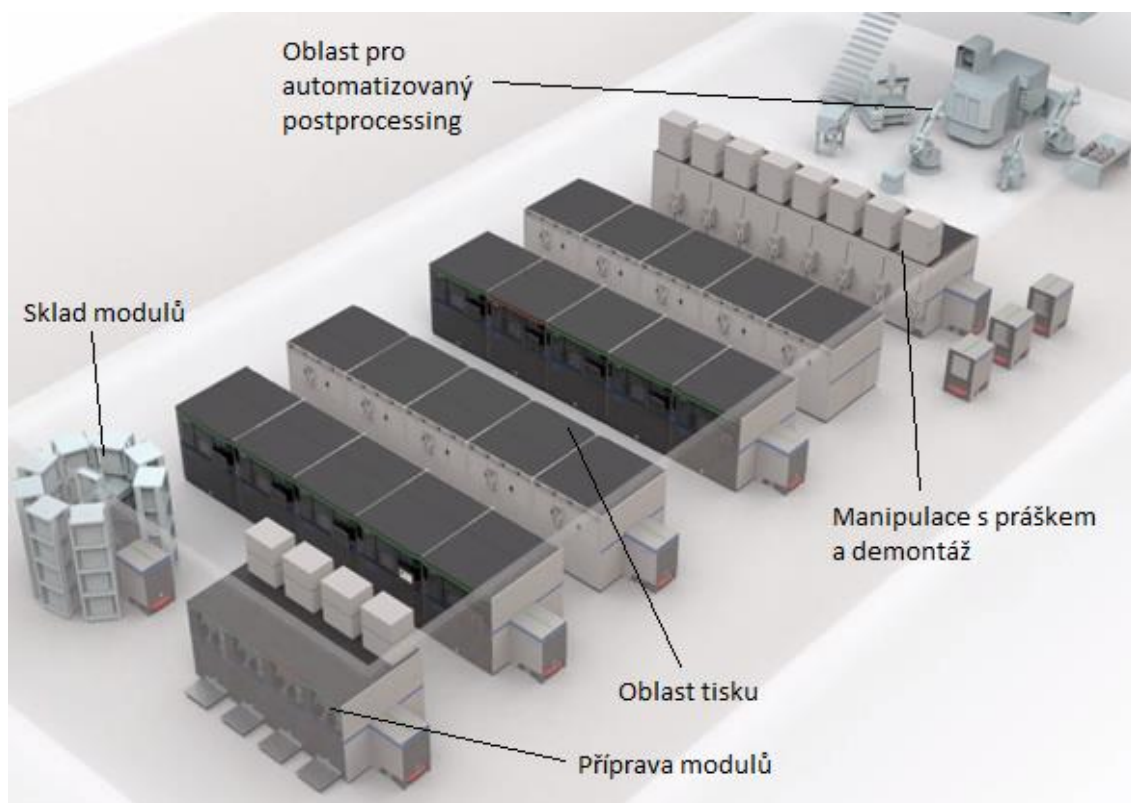
4. 11 Jednotka pro processing s vyznačeným integrovaným prosévacím systémem [31]

Po odsátí prášku je základní deska se součástí dočasně uložena uvnitř stroje a na stavební modul je nainstalována nová základní deska, čímž je připraven pro další stavbu. Po odstavení stavebního modulu je přistaven modul transportní, do něhož je umístěna deska se součástí a je připravena k převozu na další výrobní pracoviště. V tomto stroji také probíhá prosévání přebytečného prášku zachyceného ve výrobním stroji, poté co je modul naplněn. [31]

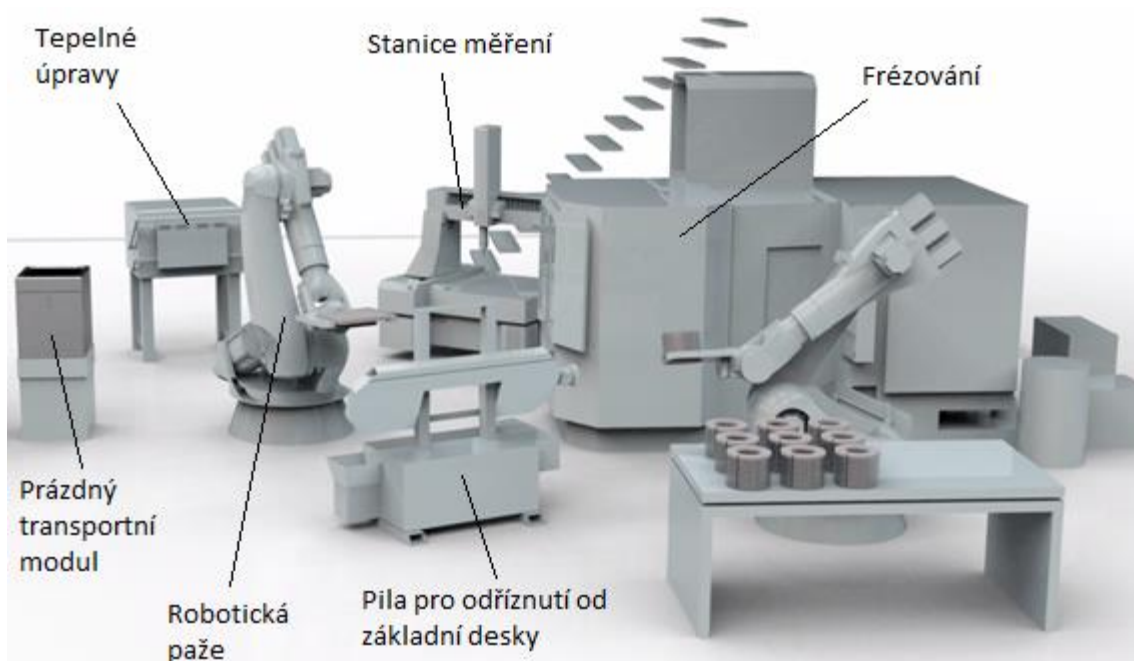
Tyto stroje jsou připravené pro integraci do výroby dle Průmyslu 4.0 a počítá se i se zabudováním diagnostiky a čidel do vnitřního prostoru. Na obr. 4.13 je vizualizace plně automatizované aditivní továrny. Na obr. 4.12 je vyznačen koncept ploch pro bezpečný oddělený pohyb modulů, operátorů a přístupu pro údržbu. Na obr. 4.14 je návrh možného rozložení strojů pro postprocessing součástí. [31]



4. 12 Vyznačení oddělených ploch pro pohyb v aditivní továrně 4.0 [31]



4. 13 Vizualizace aditivní továrny 4.0 a její rozdělení dle operací [31]



4. 14 Možný návrh pro automatizovaný postprocessing s vyznačením jednotlivých stanišť [31]

5. Hodnocení vlastností kovového prášku

Management prášku a jeho kvalita pro opětovné použití je jednou z klíčových otázek pro automatizaci aditivních procesů a pro ekonomičnost stavby. Jak ukázal výzkum materiálů pro aditivní technologie v RTI při Fakultě strojní ZČU v Plzni, pro některé aplikace je kvalita prášku natolik důležitá, že pro vysoce zatěžované tenkostěnné díly je vhodné používat výhradně nový prášek, aby bylo zabráněno výskytu abnormalit ve struktuře. Pro objemnější díly lze použít recyklovaný prášek, jelikož nežádoucí vměstky jsou příliš malé na to, aby měly výrazný vliv na spolehlivost součásti. [32]

V této části práce se budu zabývat hodnocením prášku z nerezové oceli 316L vyráběné společností Renishaw, který byl odebrán po použití v tiskárně RENISHAW AM250. Pro použití v tiskárnách RENISHAW je doporučeno používat prášky s velikostí částí 15-45 mikronů. [33]

5.1. Popis stroje RENISHAW AM250

Stroj disponuje tiskovou plochou 250x250x300 mm³ a může vytvářet vrstvy o tloušťce 20 až 100 mikronů. Pro vytváření kovových částí z kovového prášku procesem laserového spékání slouží vysoce výkoné vláknové lasery. Zásobník prášku má uzavírací ventily pro doplnění materiálu v průběhu výroby. Zásobník je odnímatelný. Zásobník na přebytečný prášek je též opatřený ventily. Nepoužitý materiál je tedy možné prosít a znovu použít pro výrobu. Proces probíhá v kontrolované ochranné atmosféře. Ve stroji jsou bezpečné systémy pro zpracování emisí a zbytkového prášku. Ztráta materiálu při procesu je minimální, protože 98% materiálu, který obklopuje součást při stavbě lze znovu využít po zpracování v Renishaw systému pro upravování prášku. [33]

Při procesu stavby je ve stavebním prostoru vytvořena inertní atmosféra, což je velmi důležité, aby část nebyla kontaminována molekulami vzduchu a nedošlo k ovlivnění chemických a fyzikálních vlastností části. Nejprve je v prostoru vytvořeno vakuum a následně je naplněn argonem. Při procesu stavby je obsah kyslíku udržován pod 0,1%. [33]

Technické specifikace

rychlost stavby	5 až 20 cm ³ /h
rychlost scanování	až 2000 mm/s
rychlost nastavení polohy	7000 mm/s
průměr laserového paprsku na povrchu	70 μm
výkon laseru	200 nebo 400 W
vnější rozměry stroje	1700 x 800 x 2025 mm (LxWxH)

5. 1 Tabulka s některými technickými specifikacemi stroje RENISHAW AM 250 [33]



5. 2 Stroj RENISHAW AM 250 [33]

5.2. Popis technologie

Renishaw používá pro své aditivní stroje technologii spékání práškového kovu (anlicky „metal **powder bed fusion** technology“), což je oficiální název uznávaný ASTM International, ačkoliv v praxi se používají názvy jako layer melting, laser sintering, **laser melting** nebo metal AM. Pomocí yterbiového vláknového laseru dochází k tavení prášků tvořených velmi malými částicemi ve vybraných oblastech nanešené vrstvy prášku, tzv. práškovém loži. [33]

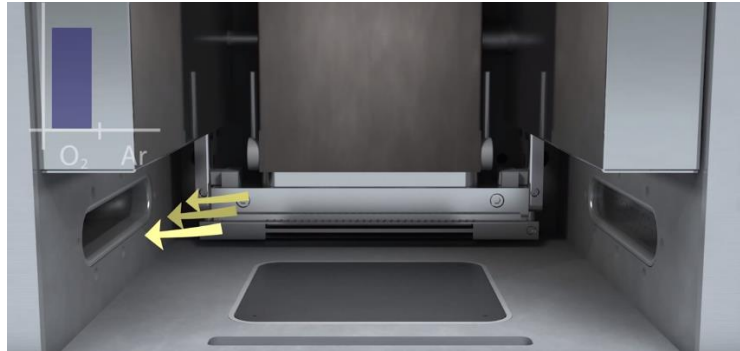
5.3. Popis výrobního procesu

Proces stavby začíná připevněním zásobníku na prášek ke stavbě a následném vložení základní desky do pracovního prostoru, jak je znázorněno na obr. 5.3. [34]

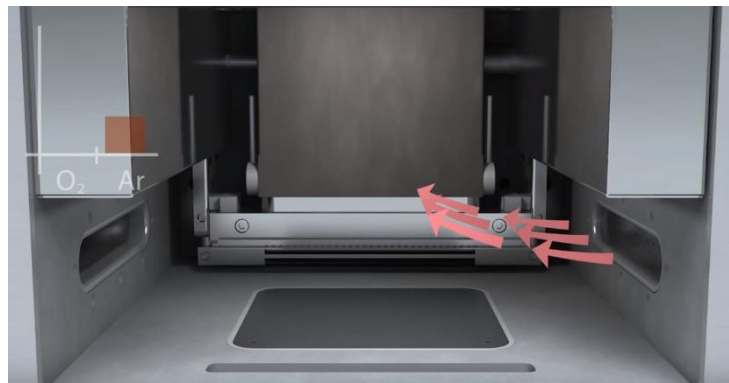


5. 3 Vlevo: Připevnění zásobníku, Vpravo: Vložení základní desky do pracovního prostoru [34]

Pro stavbu jsou do systému stroje nahraná data získaná z CAD modelu součásti, který byl v softwaru upraven pro stavbu touto technologií. Po spuštění procesu stavby se zobrazí upozornění dotazující se, zda byly otevřeny bezpečnostní ventily u zásobníku prášku a může být tedy spuštěna stavba. Dále se nejprve vytvoří vakuum odsátím vzduchu a vlhkosti z výrobního prostoru (viz obr. 5.4) a následně je prostor napuštěn argonem (viz obr. 5.5). [34]

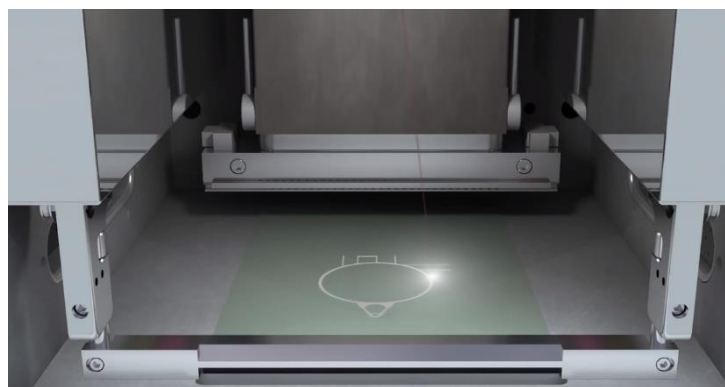


5. 4 Odsátí vzduchu a vlhkosti z výrobního prostoru [34]



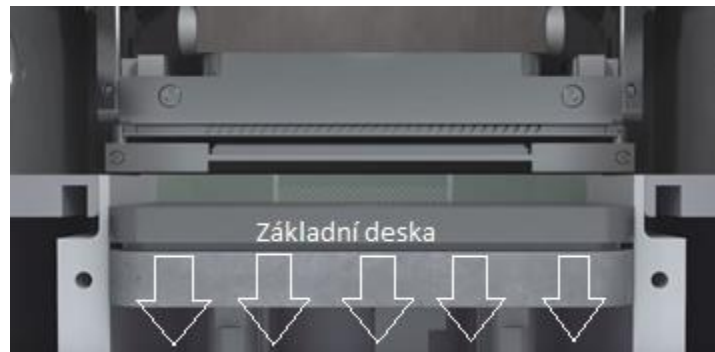
5. 5 Napuštění pracovního prostoru ochrannou atmosférou [34]

Samotná stavba je opakující se proces, kde je vždy nanešena vrstva prášku odpovídající tloušťky a následně dochází k fúzi prášků tavením ve vybraných místech odpovídajícím danému řezu součásti pomocí laseru, popř. více laserů (viz obr. 5.6). [34]



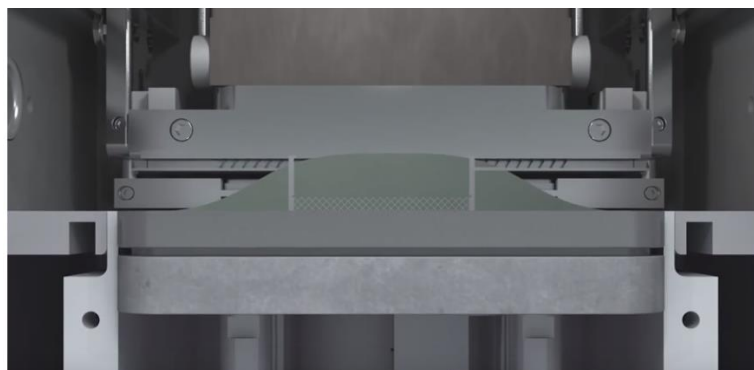
5. 6 Probíhající proces stavby pomocí laserového spékání prášku [34]

Poté, co je daná vrstva zpracována, dojde k posunu základní desky dolů o tloušťku vrstvy (viz obr. 5.7) a proces se opakuje, dokud není stavba u konce. [34]



5. 7 Pokles základní desky o tloušťku nanášené vrstvy [34]

Po dokončení stavby je základní deska přesunuta zpět do horní polohy (viz obr. 5.8) a operátor může manuálně a s použitím nástrojů pomocí integrovaných rukavic (viz obr. 5.9) odstranit přebytečný prášek, který při stavbě součást obklopoval. Integrované rukavice zajišťují, že ochranná atmosféra obklopující prášek, který bude posléze recyklován, není porušena. [34]



5. 8 Základní deska v horní poloze s výrobkem připraveným pro očištění [34]



5. 9 Integrované rukavice pro práci v ochranné atmosféře [35]

5.4. Problematika prášku

5.4.1. *Problémy spojené s manipulací s práškem*

Systém pro přívod prášku do stavěcího prostoru stroje musí zpravidla splňovat alespoň 4 základní podmínky. Nádoba na prášek musí být dostatečně velká, aby bylo možné zaplnit celý výrobní prostor a tedy mohlo dojít k nepřerušovanému tisku. Musí dojít k transportu správného množství materiálu pro nanesení nové vrstvy bez velkých přebytků. Musí být zajištěno rovnoměrné rozprostření prášku ve vrstvě, kde výsledkem je tenká, hladká a opakovatelná vrstva materiálu a proces rozprostření prášku nesmí působit velkými silami, aby nedošlo k poškození předchozí stavby. [1]

Dalším problémem, který použití prášku přináší, je zvýšení mezičásticového tření a elektrostatických sil se zmenšující se velikostí částic. To může způsobit až ztrátu sypanosti. Dále dochází při přesunu malých částic k jejich rozptýlu do prostředí, kde se mohou usazovat a tím ovlivňovat funkci optiky, senzorů, laserových paprsků a pohyblivých částí. [1]

5.4.2. *Problematika recyklace prášku*

Vysoká teplota v blízkosti vytvářené součásti může způsobit spojení některých částic v práškovém loži. Dále může dojít ke změně chemických vlastností prášku. Tyto změny v kvalitě mohou být v závislosti na materiálu podstatné nebo naopak tak malé, že lze považovat materiál za nekonečně recyklovatelný. [1]

Problémy

U kovového prášku je hlavním bodem zájmu chemické složení prášku a jeho změny. Inertní atmosféra, která je používána během výrobního procesu a pro skladování prášků, má za úkol zamezit těmto chemickým změnám, hlavně vytváření oxidů a nitridů při zvýšených teplotách. Druhým zájmem jsou mechanické vlastnosti prášku, které určují sypanost a tím konzistenci a rovnoměrnost při nanášení vrstvy. [36]

Při laserovém spékání nastává rapidní ohřev a určitá část prášku je transformována na plynný kondenzát. Mírný proud plynu, který při stavbě prochází stavebním prostorem, má za úkol odstranit tyto vedlejší produkty. Rychlým ohřevem může také dojít k rozstříku z tavné lázně a tím ke spojení některých částic v blízkosti stavby. [36]

Řešení

Vhodným nastavením parametrů výrobního procesu lze minimalizovat problém rozstříku. Dále je prášek před recyklací prosetý přes síto v prosévací stanici, jako na obr. 5.10, které zachycuje větší částice a shluky částic. Relativní chemická stálost je zajištěna inertním prostředím. [36]



5. 10 Prosévací stanice pro kovový prášek [33]

5.5. Charakteristika prášku SS 316L-0407 dle výrobce

Jedná se o slitinu austenitické nerezové oceli, která obsahuje do 18% hmotnostního podílu chromu, 14% niklu a 3% molybdenu spolu s dalšími prvky. Obsah karbonu je velmi nízký proti standardní slitině 316L, proto je obzvláště odolná proti precipitaci karbidů na hranici zrn a má dobré svařovací charakteristiky. Dále se vyznačuje vysokou tvrdostí a tuhostí, vysokou resistencí proti korozi a dobrou obrobiteľností. Tato slitina může být použita pro výrobu forem pro vstřikování plastů, forem pro odlévání, vytlačovacích matric, chirurgických nástrojů, vřeten a šroubů a různých průmyslových součástí. Další charakteristiky slitiny jsou uvedeny v tabulce 5.11 a chemické složení uvedené výrobcem v datovém listu je v tabulce 5.12. [33]

Všeobecné charakteristiky SS 316L-0407

hustota	7,99 g/cm ³
tepelná vodivost	16,2 W/mK
rozsah teplot pro tavení	1371 °C až 1399 °C
koeficient teplotní roztažnosti	16*10 ⁻⁶ K ⁻¹

5. 11 Vybrané charakteristiky SS 316L-0407 dle datového listu [33]

Chemické složení prášku SS 316L-0407

chemická značka	název prvku	hmotnost [%]
Fe	železo	dopočet do celku
Cr	chrom	16,00 až 18,00
Ni	nikl	10,00 až 14,00
Mo	molybden	2,00 až 3,00
Mn	mangan	≤ 2,00
Si	křemík	≤ 1,00
N	dusík	≤ 0,10
O	kyslík	≤ 0,10
P	fosfor	≤ 0,045
C	uhlík	≤ 0,03
S	síra	≤ 0,03

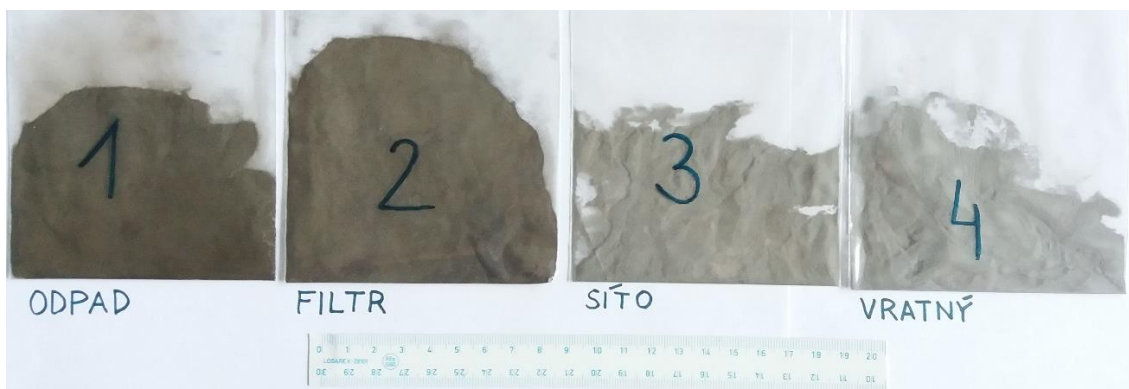
5. 12 Tabulka chemického složení prášku SS 316L-0407 dle datového listu [33]

5.6. Testování

Testovaný prášek SS 316L-0407 byl v oběhu v aditivním stroji RENISHAW AM250 zhruba 2 roky. Vzorky jsou označeny čísly od 1 do 4 podle místa odběru vzorku, které je uvedeno v tabulce 5.13 a samotné vzorky jsou na obr. 5.14. Vzorky budou testovány rastrovacím elektronovým mikroskopem a síťovým rozbořem. S pomocí elektronového mikroskopu je hodnocen vzhled, znečištění a oxidace vzorků. S pomocí prosévací zkoušky je hodnocena granulometrie vzorků.

číslo vzorku	místo odběru
1	odpad z pracovního prostoru stroje RENISHAW AM 250 a z vyjmuté zaplněné základní desky po kontaminaci vzduchem
2	na filtru pro filtraci atmosféry, který je umístěn v postranním panelu ve stroji RENISHAW AM 250
3	zachycené na sítu se jmenovitou velikostí oka 0,061 mm v samostatné prosévací stanici
4	vratný prášek odebraný pod sítem se jmenovitou velikostí oka 0,061 mm v samostatné prosévací stanici

5. 13 Tabulka s popisem místa odběru pro jednotlivé vzorky

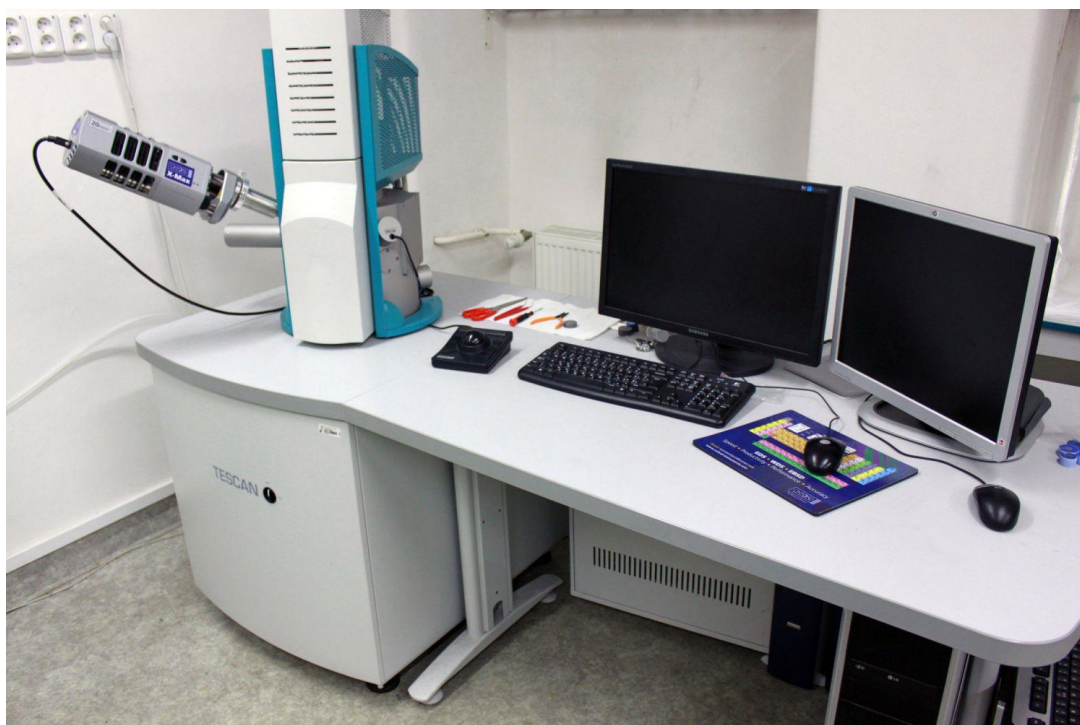


5. 14 Foto vzorků

5.6.1. Elektronový mikroskop

Vybavení

Rastrovací elektronový mikroskop, SEM mikroskop, TESCAN VEGA 3 LMU s příslušenstvím, který se nachází na pracovišti VŠCHT. Foto pracoviště je na obr. 5.15. Na obrázku 5.16 je vidět, jak vypadá otevřená zkušební komora se zásobníkem pro 7 vzorků. K přístroji je přidán EDS analyzátor OXFORD Instruments INCA 350 (viz. obr. 5.17), který umožňuje chemickou mikroanalýzu vzorku.



5. 15 Pracoviště rastrovacího elektronového mikroskopu [37]



5. 16 *Náhled do otevřeného pracovního prostoru [38]*



5. 17 *EDS analyzátor OXFORD Instruments INCA 350*

Metodika

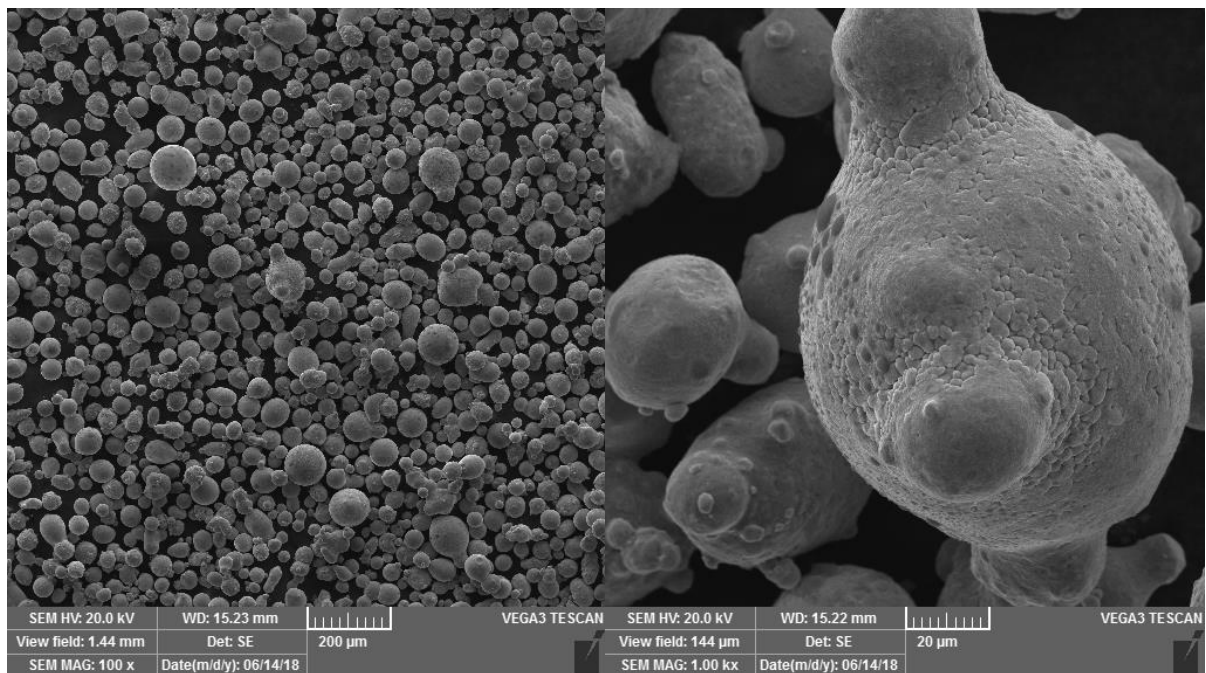
Prvním krokem byla příprava vzorků připevněním grafitové vodivé lepicí pásky na terčík. Poté byl na pásku nanesen kovový prášek a proveden manuální otřep a následné ofouknutí stlačeným vzduchem pro odstranění přebytků. Takto připravené vzorky byly umístěny do zásobníku a umístěny do přístroje pro analýzu. Pro snížení tlaku byla použita bezolejová vývěva, protože olejová by způsobila problémy s funkcí EDS detektoru. Byly pořízeny fotografie povrchu v měřítku a také byl proveden chemický rozbor vzorku z plochy. Některé prvky byly z chemické analýzy vyloučeny, např. uhlík, který je detekován ve větším množství, kvůli jeho obsahu v pásce, na kterou se aplikuje prášek. Dále fluor, který je chybně detekován, v energetické blízkosti železa. Dalším prvkem, jehož detekce může být zkreslená, je kyslík, proto je také vyloučen z analýzy. Také je třeba vzít v úvahu, že EDS analýza nerozlišuje síru a molybden. Detekce zvýšeného množství křemíku může být způsobena kontaminací vzorku. Z tohoto důvodu budu porovnávat pouze zjištěné hodnoty chromu, niklu a manganu.

U každého vzorku byly pořízeny dva snímky částic v různém měřítku a poté EDS analýza chemického složení z plochy. Hodnocení tvaru částic je provedeno ze snímků a chemické složení je porovnáno se složením uvedeným výrobcem v datovém listu. Výsledky EDS analýzy jsou u každého prvku znázorněny na grafu, kde osa x je energie záření v keV a osa y znázorňuje množství impulzů. Hmotnostní procenta prvků jsou uvedeny v tabulce v pravém horním rohu grafu.

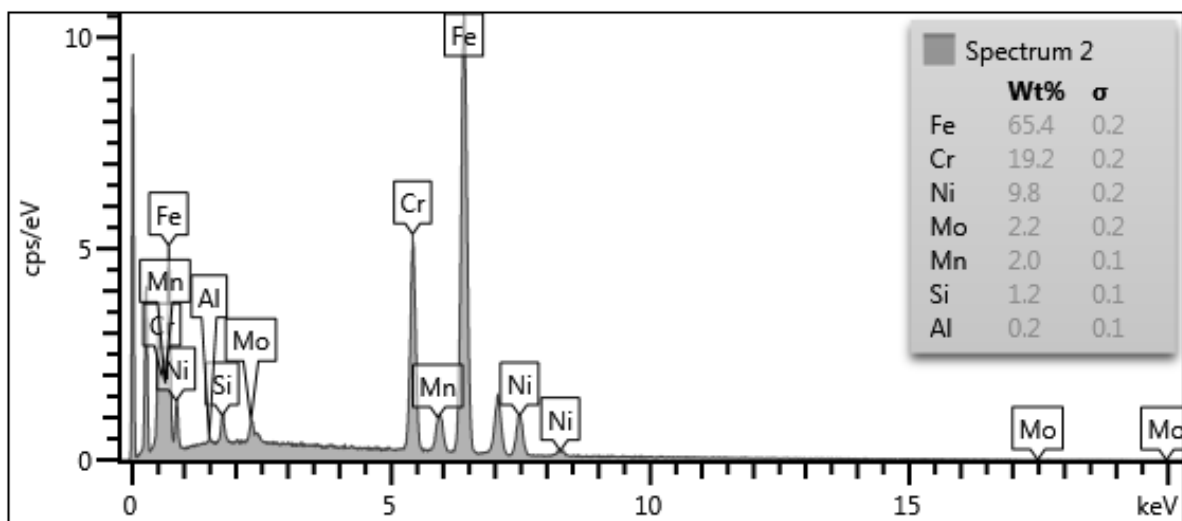
Výsledky a hodnocení

Vzorek 1 : ODPAD (viz obr. 5.14)

Snímky vzorku č. 1 jsou na obr. 5.18. Vzhledem k tomu, že se jedná o odpadní prášek z pracovní plochy, jsou očekávány různé velikosti částic a jejich případná deformace nebo sintrování vlivem pracovního prostředí a procesů. Struktura se jeví nehomogenní co do velikosti a tvarů částic. Můžeme pozorovat malé částice, které jsou připojené k větším částicím. Chemická struktura může být také ovlivněna vystavení jiné než inertní atmosféře, které je vystavený odpadní prášek, ale také vzorky při jejich uchování. Graf chemického složení vzorku 1 z plochy dle EDS analýzy je na obr. 5.19.



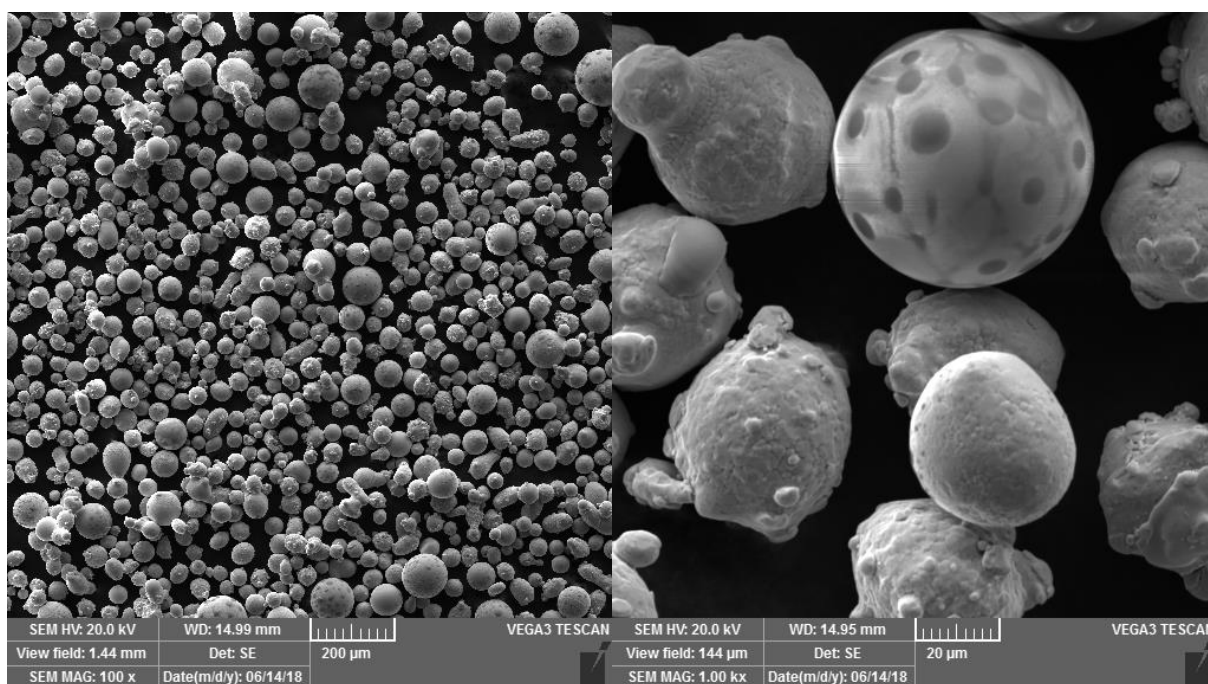
5. 18 Snímky vzorku 1 z rastrovacího mikroskopu



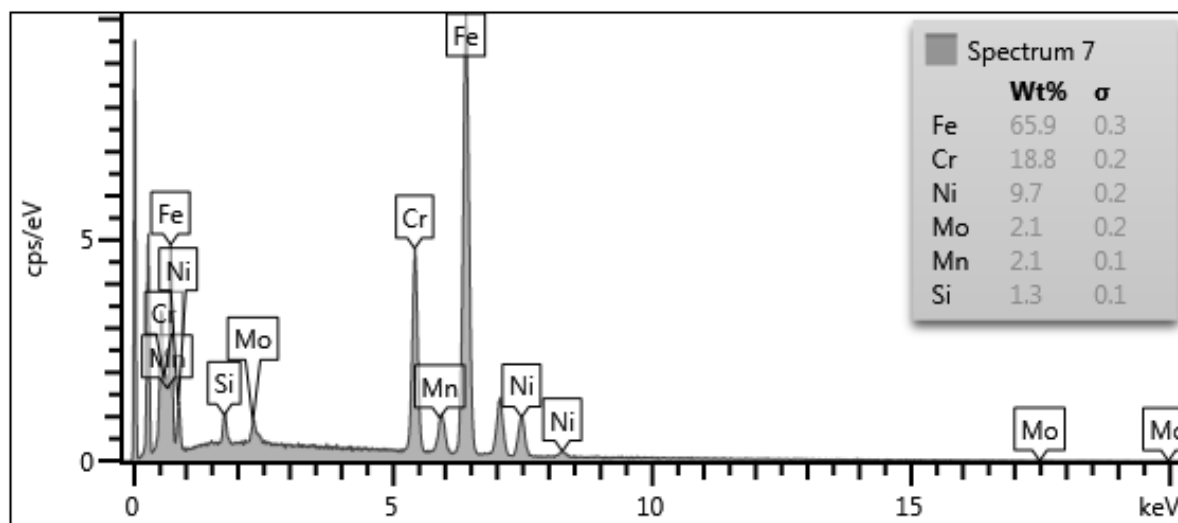
5. 19 Graf EDS analýzy vzorku 1

Vzorek 2 : FILTR (viz obr. 5.14)

Snímky vzorku č. 2 z rastrovacího mikroskopu jsou na obrázku 5.20. Jelikož na filtru jsou zachyceny částice, které tam přišly spolu s vnitřní atmosférou, může se jednat o rozvířené částice, nebo částice, které vznikly z nanočásticové mlhy, která se při sinterování vytváří nad tavnou lázní. Z toho důvodu očekáváme hodně aglomerátů vytvořených spojením mnoha menších částic, což se na snímcích potvrdilo, hlavně ve formě větších částic, na něž je napojeno mnoho menších. Chemické složení vzorku 2 získané EDS analýzou z plochy je na obr. 5.21. Vzorek byl vystaven atmosféře i mimo skladování.



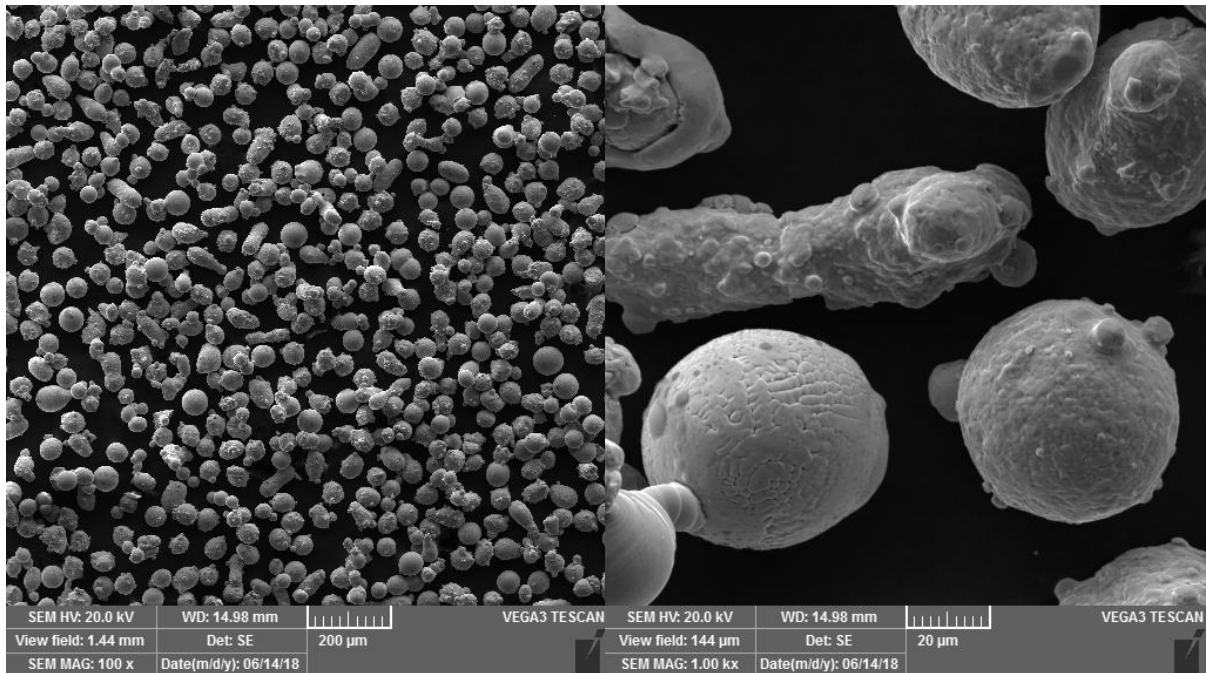
5. 20 Snímky vzorku 2 z rastrovacího mikroskopu



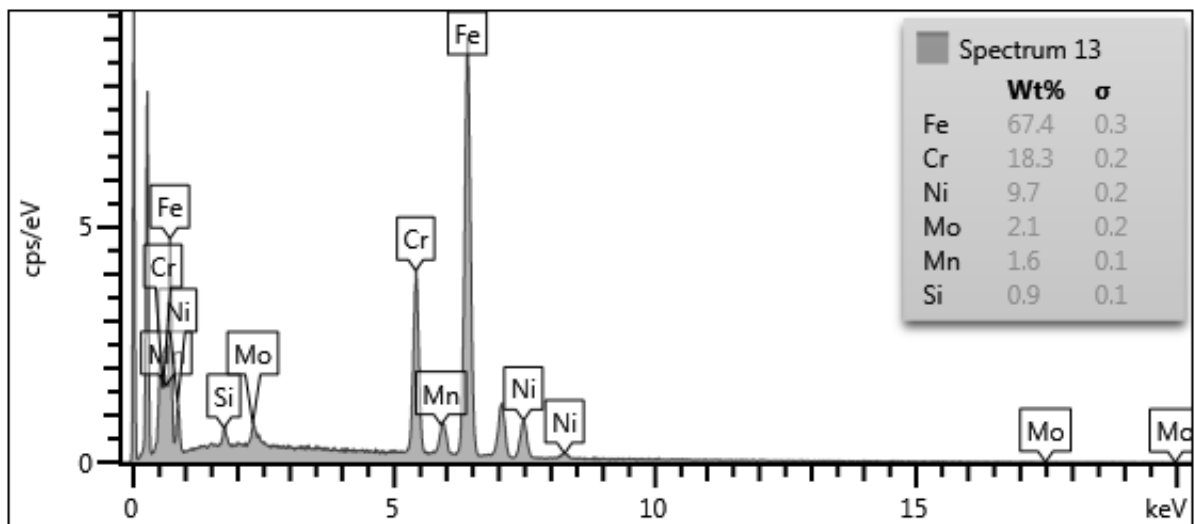
5. 21 Graf EDS analýzy vzorku 2

Vzorek 3 : SÍTO (viz obr. 5.14)

Snímky vzorku č. 3 jsou na obr. 5.22. Vzorek č. 3 byl odebrán nad sítem o nominálním průměru oka 61 μm , proto očekáváme částice s větším průměrem nebo tvarově deformované částice. Na snímcích je např. vidět větší množství deformovaných podlouhlých částic. Tento vzorek byl atmosféře vystaven pouze při skladování a odběru. Chemická EDS analýza je ve formě grafu zobrazena na obr. 5.23.



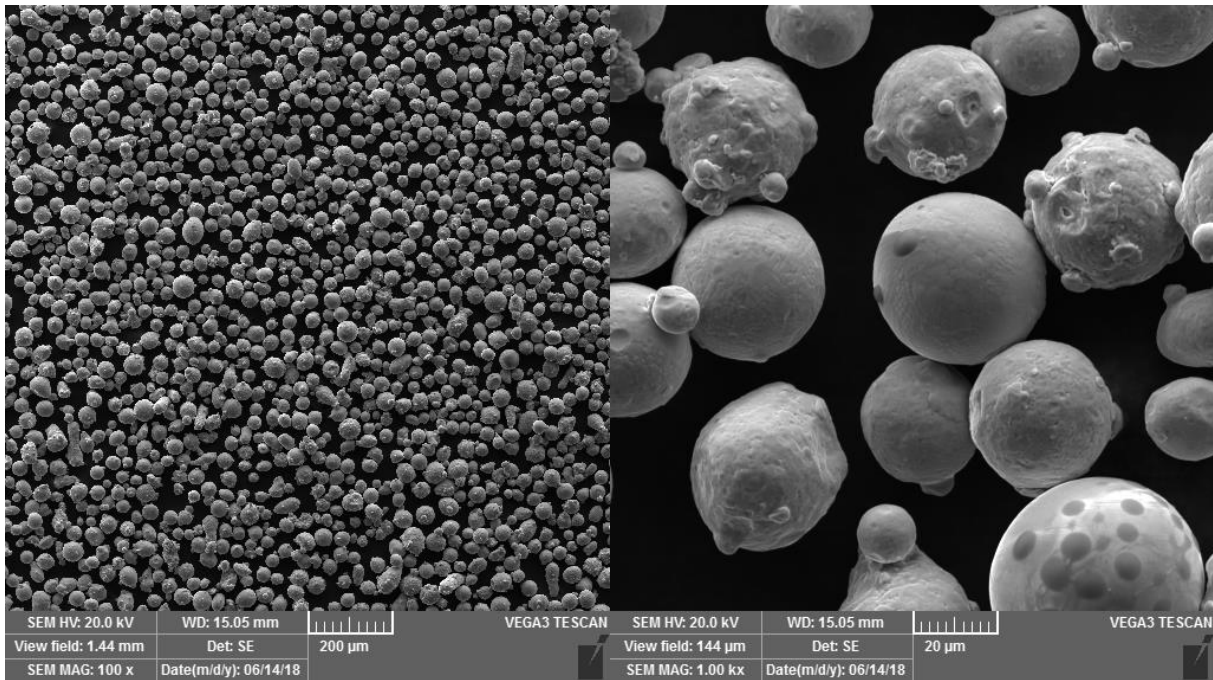
5. 22 Snímky vzorku 3 z rastrovacího mikroskopu



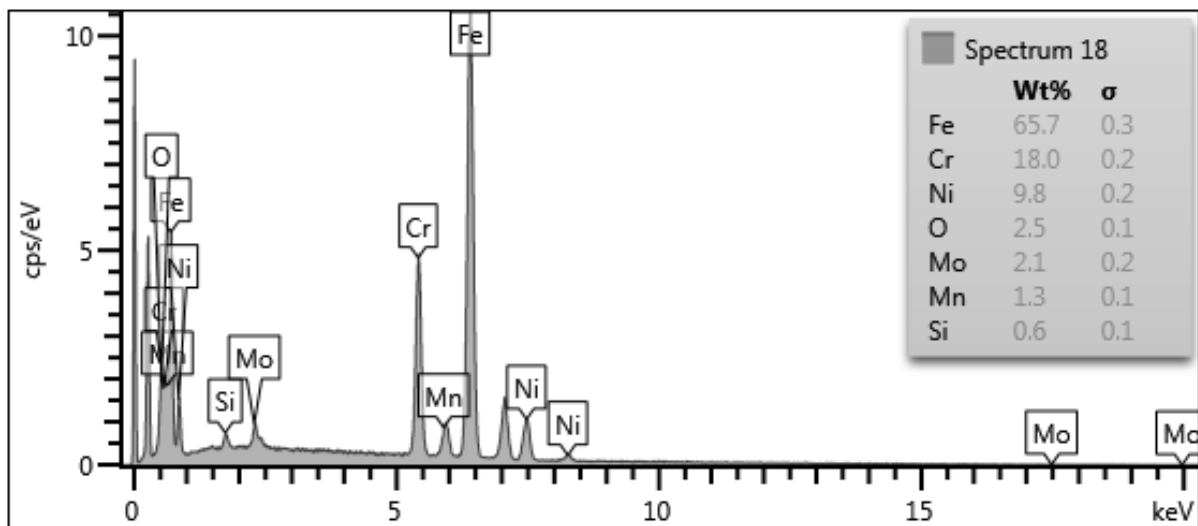
5. 23 Graf EDS analýzy vzorku 3

Vzorek 4 : VRATNÝ (viz obr. 5.14)

Snímky vzorku č. 4, který byl odebrán za sítem s nominálním průměrem oka 61 μm , jsou na obr. 5.24. Vzhledem k tomu, že se jedná o materiál za sítem a také o vratný materiál, očekáváme částice menší než 61 μm , které budou relativně tvarově homogenní. Snímky potvrzují, že se jedná primárně o kulovité částice, které na sobě mohou mít přivařené některé velmi malé částice. Chemické složení dle EDS analýzy je na obr. 5.25.



5. 24 Snímky vzorku 4 z rastrovacího mikroskopu



5. 25 Graf EDS analýzy vzorku 4

5.6.2. Prosévací zkouška

Vybavení

Třepačka THYR 2; síta s průměry ok 0,10 mm, 0,20 mm, 0,32mm, 0,63 mm, 1,00mm, 1,40mm; váha KERN EM B600 s rozlišením 0,01g; pevně líčující víko a dno sít; nádoby a štětce.. Část vybavení pro zkoušku je na obr. 5.26.



5. 26 Vlevo: Třepačka se síty, Vpravo: Digitální váha

Metodika

Dle normy ČSN EN 933-1 (72 1193). Podstatou zkoušky stanovení zrnitosti síťovým rozbořem je třídění a oddělení materiálu pomocí sady sít do zrnitostních podílů s klesající velikostí částic. Zaznamenává se hmotnost částic zachycených na jednotlivých sítích a uvádí se ve vztahu vůči počáteční hmotnosti navážky, kde zkušební navážka je vzorek použitý jako celek při jednotlivé zkoušce určený svou hmotností. Z dat ze síťového rozboru, pokud je proveden se síty se správnou velikostí ok, lze pomocí grafického znázornění stanovit střední velikost zrna a vyhodnotit pravidelnost tvaru. Prosévání probíhalo tak, že se byl suchý vzorek vysypán na nejhornější síto s největší velikostí otvorů. Ve sloupci sít se otvory (tzv. oka) sít od shora dolů zmenšovaly. Na vrchu sloupce bylo víko a pod sítím s nejmenšími otvory byla umístěná miska dna. Se vzorky pak bylo za pomoci třepačky mechanicky třeseno po dobu deseti minut. Po zastavení třepačky byla síta od shora po jednom sundávána a byla vážena hmotnost jak zrn prášku na sítu, které bylo odebráno, tak celková hmotnost zrn prášku nad sítím, tj. včetně materiálu z předešlých sít. Vzhledem k výsledkům zkoušky je grafické hodnocení zrnitosti nemožné, nemáme data z požadované oblasti, proto je hodnocení výsledků pouze slovní. [39]

Výsledky a hodnocení

Zbytek označuje v tabulkách výsledků měření miskou dna, tedy kolik gramů částic propadlo všemi sítí. Přesnost měření mohla být ovlivněna stavem a znečištěním sítí, např. u vzorku 2 došlo pravděpodobně vlivem třepání k uvolnění zaklíněných částic z předchozích měření. Z výsledků je též zjevné, že pro stanovení zrnitosti prášku je nutno použít sadu sítí s menšími otvory, než zde použitá síta.

Vzorek 1 : ODPAD (viz obr. 5.14)

navážka = 4,36 g

Velikost ok síta [mm]	1,40	1,00	0,63	0,32	0,2	0,1	zbytek
Hmotnost zrn zachycených na daném síti [g]	0	0	0	0	0,02	0,05	4,29
Podíl zrn zachycených na daném síti [%]	0	0	0	0	0,46	1,15	98,39
Podíl zrn zachycených nad daným sítem [%]	0	0	0	0	0,46	1,61	100,00

Vzorek 2 : FILTR (viz obr. 5.14)

navážka = 15 g

Velikost ok síta [mm]	1,40	1,00	0,63	0,32	0,2	0,1	zbytek
Hmotnost zrn zachycených na daném síti [g]	0	0	0	0,04	0	0,72	14,3
Podíl zrn zachycených na daném síti [%]	0	0	0	0,27	0	4,80	95,33
Podíl zrn zachycených nad daným sítem [%]	0	0	0	0,27	0,27	5,07	100,40

Vzorek 3: SÍTO (viz obr. 5.14)

navážka = 7,29 g

Velikost ok síta [mm]	1,40	1,00	0,63	0,32	0,2	0,1	zbytek
Hmotnost zrn zachycených na daném síti [g]	0	0	0	0	0	0	7,28
Podíl zrn zachycených na daném síti [%]	0	0	0	0	0	0	99,83
Podíl zrn zachycených nad daným sítem [%]	0	0	0	0	0	0	99,83

Vzorek 4: VRATNÝ (viz obr. 5.14)

navážka = 13,41 g

Velikost ok síta [mm]	1,40	1,00	0,63	0,32	0,2	0,1	zbytek
Hmotnost zrn zachycených na daném síti [g]	0	0	0	0	0	0	13,39
Podíl zrn zachycených na daném síti [%]	0	0	0	0	0	0	99,85
Podíl zrn zachycených nad daným sítem [%]	0	0	0	0	0	0	99,85

6. Závěr

V teoretické části práce byly popsány obecné vlastnosti aditivních technologií a jejich problematika, také byl popsán koncept Průmysl 4.0, jeho hlavní cíle a předpoklady pro jejich splnění. Dále je rozebráno, jak svými vlastnostmi aditivní technologie zapadají jako jedna z perspektivních technologií výroby do konceptu Průmysl 4.0. Byly nalezeny a popsány 3 příklady reálného propojení aditivních technologií s Průmyslem 4.0, nebo alespoň s jeho částmi, na nichž jsou demonstrovány výhody, které aditivní technologie přináší hlavně v ohledu na přizpůsobení produktu jednotlivci, propojení digitálního modelu s finální částí a efektivní využití času v rámci celého procesu návrhu a výroby. Uvedené příklady se týkají firem ARBURG, Voodoo Manufacturing a Concept Laser. Aditivní technologie jsou technologie, která se dokáží dynamicky přizpůsobit objednávkám, změnám ve výrobě a výrobě malých sérií i jednotlivých kusů. Dále jsou vhodné pro zakomponování do automatizované továrny nebo výrobní linky, kde po mohou následovat další dokončovací operace a to i bez zásahu operátora. Jsou tedy vhodné pro Průmysl 4.0.

V praktické části byla provedena na vzorcích recyklovaného prášku prosévací zkouška a byly zkoumány na SEM mikroskopu. Na mikroskopu byl zkoumán tvar a distribuce částic v jednotlivých místech odběrů vzorků, ale i chemické složení díky přidanému modulu pro EDS analýzu.

V rámci prosévací zkoušky bylo potvrzeno, že prášek, který je recyklát a půjde zpět do oběhu má zrna s průměrem menším než 0,1mm, což odpovídá hypotéze, neboť tento prášek byl na pracovišti proset sítem s nominální velikostí oka 0,061mm. Všechna zrna prošla i nejmenším sítem i u prášku odebraného na sítu, kde tedy předpokládáme, že částice se pohybují svou velikostí v rozmezí 0,061-0,1 mm. U odpadního prášku z pracovního prostoru bylo zaznamenáno 1,61% zrn, která neprošla sítem s okem 0,1mm. U prášku zachyceného na filtru pro čištění vnitřní atmosféry stroje bylo těchto částic dokonce 5%. Z toho lze vyvodit, že jelikož se jedná o částice, které byly vystaveny většímu mechanickému i chemickému či tepelnému stresu, došlo u malého procenta z nich k deformacím a slučování natolik prominentním, že překročili v nějakém směru velikost 0,1mm. Průměrná zrnitost nebyla graficky stanovena, protože byly špatně zvolené velikosti ok sít. Pro zdařilou granulometrii je třeba zvolit síta bližší velikosti částic.

V rámci hodnocení tvaru částic ze snímků pořízených na rastrovacím mikroskopu byly potvrzeny předpoklady plynoucí z teoretických znalostí a předchozích studií na jiném prášku v rámci společnosti Renishaw. V odpadním prášku a prášku z filtru byla větší různorodost tvaru, velikosti a deformací částic, než ve vzorcích z prosévací stanice. V prášku na filtru bylo znatelné množství agregátů vytvořených sloučením více malých částic. Tyto částice pravděpodobně vznikají při vytvoření nanočásticové mlhy nad svarovou lázní a jsou proudem atmosféry odneseny do filtru.

Ve vzorku nad sítím jsou větší kulové částice než ve vzorku pod sítím a také jsou tam protáhlé deformované částice. Nejvíce homogenní strukturou disponuje vzorek z pod síta, což je recyklát, který se bude vracet do oběhu. U něj mají všechny částice kulový tvar a podobnou velikost. Jedinou zřetelnou deformací jsou některé velmi malé částice přichycené na povrchu kulových zrn. Výsledky odpovídají předpokladu, že nejlepší tvar zrn a strukturu má mít prášek, který bude znovu použit, prošel rafinací a byl jen málo nebo ideálně vůbec vystaven obyčejné atmosféře.

V rámci analýzy chemického složení hodnotím pouze prvky chrom, nikl a mangan, jelikož analýza ostatních prvků touto metodou vykazuje nepřesnosti. V následující tabulce obr. 6.1 je přehled těchto hodnot u jednotlivých vzorků a teoretické hodnoty z datového listu pro porovnání. Popis míst odběru vzorku je v tabulce 5.13 a fotografie vzorků jsou na obr. 5.14.

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	teoretická hodnota z datového listu
Cr [hm. %]	19,20	18,8	18,30	18,00	16,00 až 18,00
Ni [hm. %]	9,80	9,70	9,70	9,80	10,00 až 14,00
Mn [hm. %]	2,00	2,10	1,60	2,10	2,00 až 3,00

6. 1 Porovnání chemického složení Cr, Ni, Mn

Z tabulky lze vyčíst, že všechny vzorky mají o něco jiné hodnoty, než jsou ideální vlastnosti garantované výrobcem u nových prášků. Nicméně vzorek 4, což je samotný recyklát vychází ze srovnání nejlépe s rozdílem jen 0,20% niklu.

Recyklovaný prášek, který byl v oběhu 2 roky může být znovu recyklován až na velmi tenkostěnné stavby, kde je třeba dbát na co nejlepší kvalitu vstupního materiálu i procesu, aby bylo zamezeno škodlivým vměstkům.

7. Seznam zkratek

3D	trojdimenzionální
STL	formát souboru původně používaný pro aditivní stereolitografii, nyní rozšířen ve všech aditivních odvětvích
CAD	počítačem podporované navrhování
ASTM	Americká společnost pro testování a materiály
ISO	Mezinárodní společnost pro normalizaci
UV	ultrafialové záření
DMD	mikro-opto-elektromechanický systém pro projektory obsahující mikrozrcadla
IR	infračervené záření
FDM	aditivní metoda vytlačováním materiálu v polopevném stavu, který poté přilne k předchozí vrstvě
LS	prosté slinování laserem, spojení dvou částic bez jejich tavení za použití laseru
SLS	selektivní prosté slinování laserem
DMLS	metoda spékání kovového prášku laserovým paprskem
DED	aditivní technologie, kde je vstupní materiál nanášen a paprskem spojován v libovolné poloze, procesy nanášení a spojování probíhají současně
CNC	technologie číslicově řízených obráběcích strojů
CAM	počítačová podpora obrábění
DCM	kód datové matice, černobílý čtvercový dvojdimenzionální útvar, v němž jsou zakódovaná data
RFID	identifikace na základě rádiové frekvence
RTI	Regionální technologický institut
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
SS	nerezová ocel
VŠCHT	Vysoká škola chemicko-technologická v Praze
SEM	řádkovací elektronový mikroskop, též označován rastrovací
EDS	elektronově disperzní spektrometr
ČSN	chráněné označení české technické normy
EN	označení evropské technické normy

8. Zdroje

- [1] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Second edition. London: Springer, [2015]. ISBN 978-1-4939-2112-6
- [2] GRANDVALLET, Christelle, Julie MAISONNEUVE a Frédéric VIGNAT. *A method and rules to design supports for EBM parts*. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.159. ISBN 2212-8271. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827118303172>
- [3] VTÍPIL, Jaroslav. Aditivní technologie (nejen) v leteckém průmyslu. *MM Průmyslové spektrum*. 2018, **2018**(4), 52-53. ISSN 1212-2572.
- [4] ATTARAN, Mohsen. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons* [online]. 2017, **60**(5), 677-688 [cit. 2018-07-30]. DOI: 10.1016/j.bushor.2017.05.011. ISSN 00076813. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007681317300897>
- [5] BAJER, Jan. 3D technologie letem světem. *MM Průmyslové spektrum*. 2018, **2018**(4), 49-51. ISSN 1212-2572
- [6] VÍT, Tomáš. Investice do 3D tisku se bleskově vracejí. *MM Průmyslové spektrum*. 2018, **2018**(4), 60-61. ISSN 1212-2572
- [7] IVANKO, Miroslav. Aditivní výroba je řešení pro průmysl. *MM Průmyslové spektrum*. 2018, **2018**(4), 58-59. ISSN 1212-2572
- [8] Volkswagen identifies key areas for metal Additive Manufacturing in automotive applications. *METAL AM* [online]. 9. ledna 2018 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <http://www.metal-am.com/volkswagen-identifies-key-areas-metal-additive-manufacturing-automotive-applications/>
- [9] MAŘÍK, Vladimír. *Průmysl 4.0: výzva pro Českou republiku*. Praha: Management Press, 2016. ISBN 978-80-7261-440-0
- [10] KAMINSKÝ, Daniel. Průmysl 4.0 a čtvrtá průmyslová revoluce. *MM Průmyslové spektrum: Industry 4.0 průmysl současnosti*. 2016, **2016**(6), 6. ISSN 1212-2572
- [11] MOTAN, Pavel. Digitální továrna a Průmysl 4.0. *Technik*. 2016, **2016**(5), 43
- [12] JIRKOVSKÝ, Jaroslav. Internet věcí - zpracování, agregace a analýza dat. *MM Průmyslové spektrum*. 2018, **2018**(4), XXVI-XXVII. ISSN 1212-2572

- [13] VYROUBAL, Jiří. Aspekty energeticky efektivní a ekonomické výroby dnečka. *MM Průmyslové spektrum*. 2016, **2016**(11), 54-56. ISSN 1212-2572
- [14] HORÁČEK, Libor, Vojtěch PRAŽMA a Pavel VYDRA. Aditivní technologie pro Průmysl 4.0. *MM Průmyslové spektrum*. 2018, **2018**(4), 64. ISSN 1212-2572
- [15] Ideu Průmyslu 4.0 nelze realizovat bez inline metrologie. *Technik*. 2016
- [16] PANETTA, Kasey. Top Trends in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017. *Gartner* [online]. 15 srpna 2017 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017>
- [17] DILBEROGLU, Ugur M., Bahar GHAREHPAPAGH, Ulas YAMAN a Melik DOLEN. The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*. 2017, **11**, 545-554. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.148. ISSN 23519789. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978917303529>
- [18] CEJNAROVÁ, Andrea. Nadchází doba 3D tištěné elektroniky. *Tecký týdeník: speciální příloha časopisu Technický týdeník Konstrukční a výrobní software*. 2016, **2016**, 11
- [19] Nano Dimension. DragonFly 2020 Pro 3D Printer by Nano Dimension. In: *YouTube* [online]. 21. 11. 2017 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=xBtDSQ1ZQ50>
- [20] GAJDOŠ, Ján. Digitální továrna aneb výroba jako služba. *Technický týdeník: Speciální příloha časopisu Technický týdeník Konstrukční a výrobní software*. 2016, **2016**, 14
- [21] CEJNAROVÁ, Andrea. Tradiční a moderní technologie na jednom stroji. *Technický týdeník: Speciální příloha časopisu Technický týdeník Konstrukční a výrobní software*. 2016, **2016**, 7
- [22] LARSSON, Jan. Aditivní a hybridní výroba pomocí 3D tisku. *Technický týdeník: Speciální příloha časopisu Technický týdeník Konstrukční a výrobní software*. 2016, **2016**, 8-9
- [23] *Web společnosti ARBURG* [online]. [cit. 2018-07-27]. Dostupné z: www.arburg.com
- [24] GAUB, Heinz. Customization of mass-produced parts by combining injection molding and additive manufacturing with Industry 4.0 technologies. *Reinforced Plastics* [online]. 2016, **60**(6), 401-404 [cit. 2018-07-28]. DOI: 10.1016/j.repl.2015.09.004. ISSN 00343617. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034361715006566>
- [25] ARBURGofficial. Plastics parts production: fully automated single-unit batches. In: *YouTube*[online]. 26. 11. 2015 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=miHqEcZbpLE>
- [26] SCHWARTZ, Jonathan. How We're Building a Robotic 3D Printing Factory. *Medium* [online]. 15. března 2017 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://medium.com/voodoo-manufacturing/announcing-project-skywalker-bf9efa99a677>
- [27] Voodoo Manufacturing. Voodoo Manufacturing: Project Skywalker. In: *YouTube* [online]. 15. 3. 2017 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=GoNRTucoErE>

- [28] Universal Robots. Voodoo Manufacturing triples 3D printing production with Universal Robots. In: *YouTube* [online]. 10. 9. 2017 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=qo_rtzEI_7Y
- [29] *Web společnosti UNIVERSAL ROBOTS* [online]. [cit. 2018-07-27]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/cs/>
- [30] 3D Printing Nerd. On Location with Voodoo Manufacturing - Brooklyn-based 3D Printing manufacturer #RobotArm. In: *YouTube* [online]. 4. 4. 2018 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=poOGX7ptQHs>
- [31] M LINE FACTORY. *Concept Laser - Metal 3D printers for parts* [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.concept-laser.de/en/products/machines/m-line-factory.html>
- [32] ZETKOVÁ, Ivana a kolektiv. Aditivní výroba unikátních řezných nástrojů. *MM Průmyslové spektrum*. 2018, **2018**(4), 68-69. ISSN 1212-2572
- [33] *Web společnosti RENISHAW* [online]. [cit. 2018-07-27]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/aditivni-vyrobni-systemy--15239>
- [34] RaceEngineTechnology. Renishaw AM250 Video. In: *YouTube* [online]. 6. 2. 2013 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ecqeAXJnMz8&t=12s>
- [35] Lehigh University. 3-D Metal Printing at Lehigh. In: *YouTube* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=nEzCxXtBIl0>
- [36] GRAINGER, Lucy. *Blog post: How much can you recycle metal additive manufacturing powder?*[online]. 24 června 2016 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/how-much-can-you-recycle-metal-additive-manufacturing-powder--38882>
- [37] Přístrojové vybavení. *Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://ukmki.vscht.cz/veda-a-vyzkum/pristrojove-vybaveni>
- [38] Tescan Brno. TESCAN Microscope chambers. In: *YouTube* [online]. 7. 1. 2016 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?time_continue=51&v=udktLrlzsSM
- [39] ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012