



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav technologie
obrábění, projektování a metrologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Matoušek** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **420448**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vývoj aditivních technologií a současné možnosti v oblasti 3D tisku kovových materiálů

Název diplomové práce anglicky:

Development of additive technologies and state of the arts possibilities in the field of 3D printing of metallic materials

Pokyny pro vypracování:

Vývojové trendy v oblasti tisku kovových materiálů (extruze, navařování, jet printing)
Vliv parametrů technologie DMLS/SLM na výsledné vlastnosti produktu (rozměry, geometrie, mechanické vlastnosti, HCF, LCF)
Metodika zavádění aditivních technologií ve společnosti
Návrh technologického demonstrátoru a realizace tisku

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

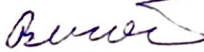
Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

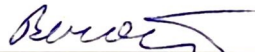
Datum zadání diplomové práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **19.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____



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



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



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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24. 4. 2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Vývoj aditivních technologií a současné možnosti v oblasti 3D tisku kovových materiálů

Development of additive technologies and state of the arts
possibilities in the field of 3D printing of metallic materials

Anotace

Autor:	Michal Matoušek
Název práce:	Vývoj aditivních technologií a současné možnosti v oblasti 3D tisku kovových materiálů
Rozsah práce:	139 stran, 32 tabulek, 44 obrázků, 4 schémata, 24 grafů
Akademický rok:	2018/2019
Škola:	České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Zadavatel práce:	Fakulta Strojní ČVUT
Klíčová slova:	aditivní technologie, technologický demonstrátor, parametry tisku, zavádění aditivní výroby

Anotace:

Diplomová práce se v teoretické části zabývá historií a současným stavem aditivních technologií, jejich aplikačním potenciálem, metodami výroby a charakteristikou vlastností kovových prášků. V další části je shrnut vliv nastavení tiskových parametrů na výsledné vlastnosti produktu. V praktické části je popsána tvorba metodiky pro zavádění aditivních technologií ve společnosti se zaběhnutou konvenční výrobou. V poslední části byl navržen a realizován tisk technologického demonstrátoru.

Annotation

Author:	Michal Matoušek
Název práce:	Development of additive technologies and state of the arts possibilities in the field of 3D printing of metallic materials
Rozsah práce:	139 pages, 32 tables, 44 images, 4 diagrams, 24 graphs
Academic year:	2018/2019
University:	Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Supervisor:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Submitter of the theme:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Keywords:	additive technology, technological demonstrator, print process parameters, implementation of additive manufacturing

Annotation:

The theoretical part of the diploma thesis deals with the history and current state of additive technologies, its application potential, production methods and characteristics of the properties of metal powders. The next part summarizes the effect of different print parameters settings on the final product properties. The practical part describes the creation of methodology for implementation of additive technologies in a company with conventional production. In the last part, the technology demonstrator was designed and printed.



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009. Výsledky této práce mohou být vedoucím dále volně využívány.

V Praze dne 19. 7. 2019

.....
Bc. Michal Matoušek

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Liborovi Beránkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky v průběhu tvorby této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Lukáši Pelikánovi, Ing. Vladislavu Andronovovi a Ing. Janu Šimotovi za připomínky k návrhu a realizaci tisku technologického demonstrátoru.

OBSAH

1	ÚVOD	- 12 -
2	HISTORIE ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ.....	- 13 -
2.1	HISTORICKÝ VÝVOJ ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ OBECNĚ.....	- 13 -
2.2	HISTORICKÝ VÝVOJ ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ.....	- 17 -
2.2.1	<i>Historie SLS a DMLS.....</i>	<i>- 20 -</i>
2.2.2	<i>Historie SLM.....</i>	<i>- 21 -</i>
2.2.3	<i>Situace na trhu v dnešní době.....</i>	<i>- 22 -</i>
2.2.4	<i>Aplikační potenciál.....</i>	<i>- 28 -</i>
2.2.5	<i>Materiály.....</i>	<i>- 35 -</i>
3	VÝVOJOVÉ TRENDY V OBLASTI 3D TISKU KOVŮ	- 43 -
3.1	SLS, DMLS, SLM, DMLM (LASERCUSING).....	- 43 -
3.2	EBM.....	- 46 -
3.3	ROBOCASTING.....	- 46 -
3.4	COLD-SPRAY METAL PRINTING.....	- 48 -
3.5	BINDER JETTING.....	- 49 -
3.6	NANOPARTICLE JETTING	- 50 -
3.7	METAL INJECTION MOLDING	- 51 -
3.8	DROP-ON-DEMAND	- 52 -
3.9	DIRECTED ENERGY DEPOSITION	- 52 -
3.10	DESKTOP METAL.....	- 53 -
3.11	MOVINGLIGHT METAL DLP PRINTING	- 54 -
3.12	DEMCON	- 55 -
3.13	ULTRASONIC PARTICLE MANIPULATION.....	- 55 -
4	VLIV PARAMETRŮ TECHNOLOGIE TISKU DMLS/SLM NA VÝLEDNÉ VLASTNOSTI PRODUKTU	- 57 -
4.1	TLOUŠŤKA VRSTVY PRÁŠKU.....	- 58 -
4.2	VÝKON LASERU, SKENOVACÍ RYCHLOST, ROZTEČ ŠRAFOVÁNÍ	- 61 -
4.2.1	<i>Parametry tisku.....</i>	<i>- 61 -</i>
4.2.2	<i>Rozložení velikosti částic.....</i>	<i>- 62 -</i>
4.2.3	<i>Relativní hustota.....</i>	<i>- 62 -</i>
4.2.4	<i>Textura povrchu.....</i>	<i>- 64 -</i>
4.2.5	<i>Rozměrová přesnost.....</i>	<i>- 66 -</i>
4.3	VÝKON LASERU, SKENOVACÍ RYCHLOST, PRŮMĚR PAPERU, ÚHEL NATOČENÍ	- 67 -
4.3.1	<i>Textura povrchu.....</i>	<i>- 67 -</i>

4.3.2	Porozita.....	- 70 -
4.3.3	Únavová životnost.....	- 71 -
5	METODIKA ZAVÁDĚNÍ ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ VE SPOLEČNOSTI	- 74 -
5.1	VIZE METODIKY	- 74 -
5.2	REALITA PROVEDENÍ METODIKY.....	- 76 -
5.2.1	Stanovení jednotlivých kroků.....	- 76 -
5.2.2	Vyhodnocení skupiny dílů	- 85 -
5.2.3	Vyhodnocení skupiny sestav.....	- 115 -
5.2.4	Vyhodnocení skupiny ostatních dílů.....	- 116 -
6	NÁVRH TECHNOLOGICKÉHO DEMONSTRÁTORU	- 117 -
6.1	NÁVRH	- 118 -
6.1.1	Sklon stěn	- 118 -
6.1.2	Převisy.....	- 118 -
6.1.3	Mosty.....	- 119 -
6.1.4	Díry.....	- 120 -
6.1.5	Potrubí / prstence	- 120 -
6.1.6	Tloušťka stěn	- 121 -
6.1.7	Rozměr šterbiny	- 121 -
6.1.8	Rozměr kolíku	- 122 -
6.1.9	Rozkmitání nanášeče.....	- 122 -
6.1.10	Pnutí.....	- 123 -
6.1.11	Řešení kanálu	- 123 -
6.2	REALIZACE TISKU	- 124 -
6.2.1	Příprava	- 124 -
6.2.2	Materiál.....	- 125 -
6.2.3	Tisk.....	- 126 -
7	ZÁVĚR.....	- 127 -
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	- 129 -
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	- 135 -
10	SEZNAM SCHÉMAT	- 137 -
11	SEZNAM GRAFŮ	- 138 -
12	SEZNAM TABULEK	- 139 -

Seznam zkratk

AM	Additive manufacturing
3D	Three-dimensional
DMLS	Direct metal laser sintering
SLM	Selective laser melting
SLS	Selective laser sintering
DMLM	Direct metal laser melting
CAD	Computer aided design
SLA	Stereolithography
UV	Ultraviolet
FDM	Fused deposition modeling
FFF	Fused filament fabrication
RepRap	Replicating rapid prototyper
SAW	Submerged arc welding
LENS	Laser engineering net shape
EBM	Electron beam melting
USD	U.S. dollar
LMD	Laser metal deposition
DED	Directed energy deposition
DIW	Direct ink writing
MIM	Metal injection molding
CS	Cold spraying
WFMD	Wire feed metal deposition
EBF	Electron beam freeform fabrication
RT	Rapid tooling
RP	Rapid prototyping
CCC	Conformal cooling channel
STL	Standard tessellation language

VIGA	Vacuum induction melting combined with inert gas atomization
EIGA	Electrode induction melting gas atomization
PIGA	Plasma melting induction guiding gas
ESR-CIG	Electroslag remelting coldwall induction guiding
VIGA-CC	Vacuum induction gas atomization based on coldwall crucible melting technology
REP	Rotating electrode powder
PREP	Plasma rotating electrode powder
DWA	Direct-write assembly
obj. %	Objemová procenta
°C	Stupeň Celsia
µm	Mikrometr
mm	Milimetr
mm/s	Milimetr za sekundu
m/s	Metr za sekundu
Hz	Hertz
W	Watt
DLP	Digital light processing
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
HV	Vickers hardness
J/cm ²	Joule na centimetr čtvereční
J/mm ³	Joule na milimetr krychlový
°	Úhlové stupně
BV	Bezvýkresový
Kč	Koruna česká

1 ÚVOD

Aditivní technologie je způsob výroby, při kterém dochází k počítačem řízenému spojování materiálů za účelem vytváření objektů z počítačových dat CAD modelu. Zpravidla u většiny aditivních technologií dochází ke spojování materiálu vrstvu po vrstvě, přesně naopak, než je tomu u subtraktivních technologií, při kterých dochází k odebírání vrstev materiálu.

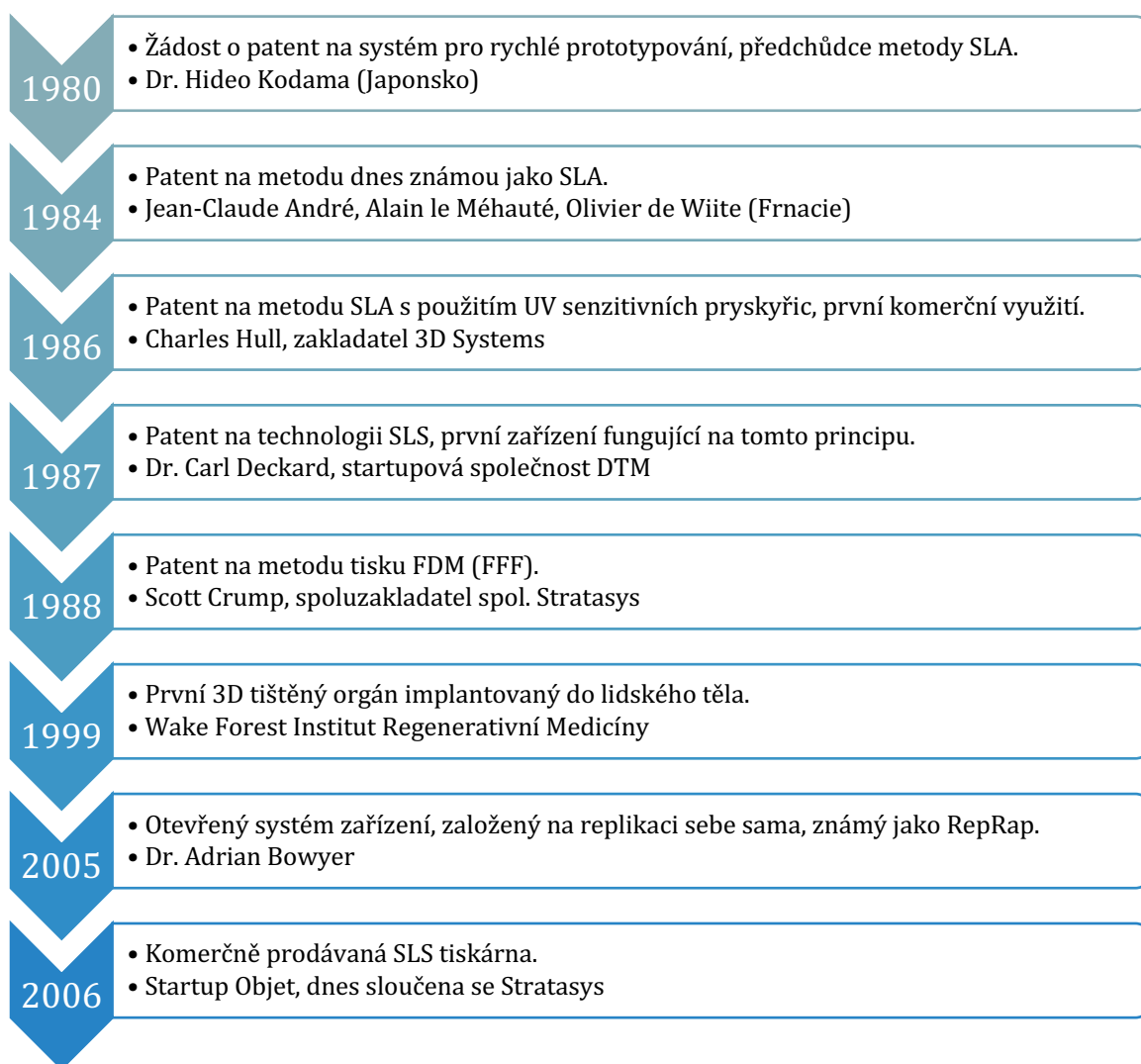
Cílem teoretické části této práce je shrnutí a seznámení čtenáře s historickými milníky, které utvářely odvětví aditivních technologií, s aplikacemi, ve kterých se s nimi můžeme již dnes setkat a se způsoby výroby práškových materiálů. Další část se zabývá funkčními principy nově vyvíjených technologií – ať už těch, které jsou nasaženy v reálné výrobě, nebo těch, které jsou v počátcích vývoje. V poslední části je provedena rešerše na téma vlivu nastavení tiskových parametrů na výsledné vlastnosti produktu. Tato část má čtenáře seznámit s možnými dopady nevhodně nastavených parametrů např. na rozměrovou a geometrickou přesnost, porozitu, mechanické a únavové vlastnosti atd.

Cílem praktické části je ve spolupráci s vybranou společností vytvořit metodiku identifikace dílů, u nichž by bylo možné stávající konvenční výrobu vybraných dílů smysluplně nahradit výrobou aditivní. Tato metodika je vytvořena zejména z toho důvodu, že v současnosti většina firem nemá představu, jakým způsobem k této technologii přistupovat a jak ji zavádět do reálné výroby. Metodika by měla ukázat možné přístupy k této problematice na příkladu reálných dat strojírenského podniku. Druhá – praktická – část je zaměřena na návrh a realizaci tisku technologického demonstrátoru s řadou artefaktů, na kterých jsou uvedena základní technologická pravidla navrhování součástí pro aditivní výrobu. Tato část může sloužit pro názorné odhalení možností a limitů této technologie konstruktérům, kteří se s ní doposud nesetkali nebo kvůli zažitým návykům z konvenční výroby nevědí, jakým způsobem využít její potenciál.

2 Historie aditivních technologií kovových materiálů

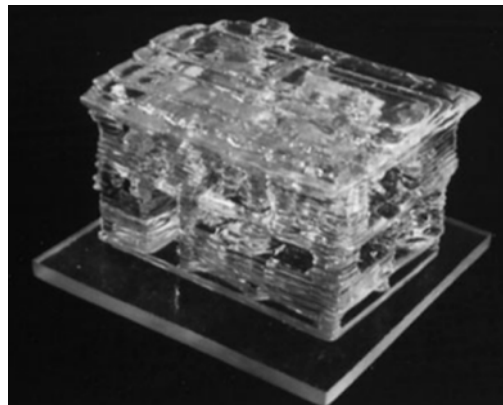
Ačkoliv počátky aditivních technologií se datují už do 80. let minulého století, své popularity a masového rozšíření se dočkaly až v posledních několika letech. K tomuto rozmachu došlo nejen díky velkému rozšíření výpočetní techniky, která významně usnadnila vytváření CAD dat, ale zásadní vliv mělo také vypršení několika významných patentů. Významné historické milníky jsou uvedeny v Graf 1.

2.1 Historický vývoj aditivních technologií obecně



Graf 1: Historické milníky aditivních technologií obecně.

Počátek aditivní technologie se datuje do roku 1980, kdy si japonský vědec Dr. Hideo Kodama z výzkumného ústavu v japonské Nagoyi podal žádost o patent na systém vytvrzování tekutého polymeru pomocí laseru. V patentu popsal systém velmi podobný dnešním SLA tiskárnám, tedy tiskárnám vytvrzujícím ftopolymer pomocí UV záření vrstvu po vrstvě. Avšak tento patent nebyl dokončen během řádného termínu a nedošlo k jeho schválení. V následující době vydal dvě práce, které blíže popisují jeho vizi. Prvním dokumentem byl *Three-Dimensional Data Display by Automatic Preparation of a Three-Dimensional Model*, ve kterém vysvětlil svoji práci a experimenty v oblasti aditivní výroby. Systém navržený v tomto dokumentu se dnes považuje za předchůdce dnešního stereolitografického aparátu (SLA). Druhým dokumentem byl *Automatic Method for Fabricating a Three-Dimensional Plastic Model with PhotoHardening Polymer, in Review of Scientific Instruments*, ve kterém popisuje tři základní techniky pro výrobu plastových součástí vrstvu po vrstvě pomocí ftopolymerizace, a zároveň zde popsal stereolitografický proces. [11][12]



Obr.1: První objekt vytištěný Dr. Kodamou. [26]



Obr.2: Dr. Hideo Kodama[13]

Ačkoliv je Dr. Hideo Kodama považován za stvořitele technologie rychlého prototypování, je nutno jmenovat ještě Otto Johna Munze a Wyna Kellyho Swainsona, jejichž výzkum měl přímý vliv na práci Dr. Hidea Kodamy. Otto John Munz, narozený v Československu, byl vývojář a patentový právník, který si patentoval systém zvaný Photo-Glyph Recording. Ten popisoval způsob vytváření opakujících se vrstev z fo-toemulze s cílem replikace 3D struktury získané z naskenovaného objektu. Wyn

Kelly Swainson z Kalifornie v roce 1968 popsal metodu zvanou „*Method, Medium and Apparatus for Producing Three Dimensional Figure Product*“. Tato metoda popisovala tvorbu 3D figurky v roztoku dvou kapalin, přičemž každá z nich je senzitivní na jiný typ elektromagnetického záření. Roztok byl následně vystaven dvěma rozdílným paprskům záření a v místě jejich setkání došlo k vytvrzení ozářené části roztoku. K tomuto ději docházelo opakovaně a byl tak vytvořen finální objekt. [26]

V letech 1984–1986 Jean-Claude André z francouzského národního centra pro vědecký výzkum (CNRS), Alain le Méhauté z bývalého Alcatelu a Olivier de Wiite z Cilas přišli s nápadem na zařízení, díky němuž by bylo možné vytvořit fraktální objekt¹. To se s tehdejšími technologiemi nedalo uskutečnit vzhledem ke komplexním tvarům objektu. Výsledkem jejich společné práce byla 3D tiskárna, se kterou byli schopni vytvořit první aditivně vyrobený objekt. Společně podali žádost o patent 3 týdny před podáním patentu od Chucka Hulla, který založil 3D Systems. Tento francouzský tým musel po podání patentu nápad opustit, jelikož se jim nepodařilo sehnat potřebný zdroj financí.[13][14]

Roku 1984 na svém nápadu začal pracovat také Charles Hull, který pracoval pro společnost vyrábějící různé druhy nábytku. Kvůli frustraci z dlouhé čekací doby na drobné zakázkově vyráběné díly dostal od své společnosti k užívání laboratoř, ve které mohl svůj nápad rozvíjet, a roku 1986, téměř současně s výzkumníky z Francie, si podal žádost o patent, ve které byla tato technologie nazvána jako stereolitografie. V roce 1986 byl patent uznán a Charles Hull založil společnost 3D Systems. Tím odstartoval novou éru ve výrobě a v průmyslu aditivních technologií jako takovém. Prvním komerčním produktem této společnosti byla roku 1988 tiskárna SLA-1. V

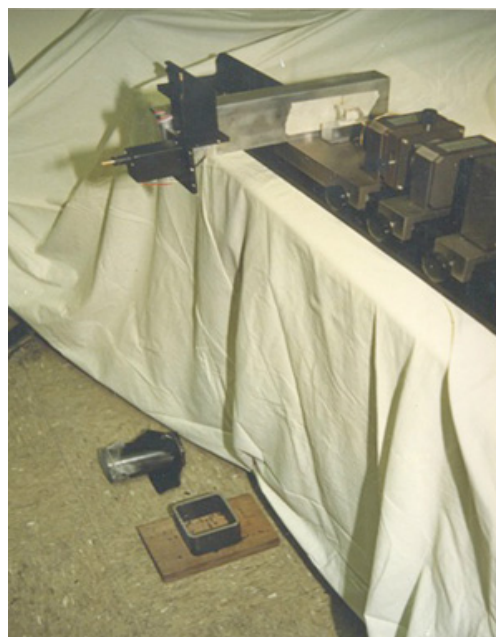
¹ Fraktální objekt je jakýkoliv geometricky nepravidelný útvar, ze kterého po rozdělení vznikne v ideálním případě několik soběpodobných kopií původního celku.[24]

dnešní době je společnost 3D Systems jednou z největších společností v odvětví aditivní výroby. [11][13]



Obr.3: Komerčně prodávaná tiskárna SLA-1 od společnosti 3D Systems (1988)[2]

Nedlouho po uvedení komerčně prodávané tiskárny SLA-1 se roku 1987 objevily první zmínky o technologii nazývané SLS, která přistupovala ke stavbě objektů zcela odlišným způsobem než doposud známá technologie SLA. Za technologií SLS stojí Dr. Carl Deckard z University of Texas, kterému si nechal roku 1987–1988 patentovat. První stroj pracující na principu technologie SLS se nazýval Betsy. Tento stroj vytvářel malé objekty z práškového plastu a sloužil jako demonstrátor této technologie. Dr. Carl Deckard následně založil společnost DTM, která byla největším konkurentem společnosti 3D Systems na poli aditivní technologie až do roku 2001, kdy došlo k akvizici DTM společností 3D Systems. Pokračování v kapitole 2.2.1.[14][16]

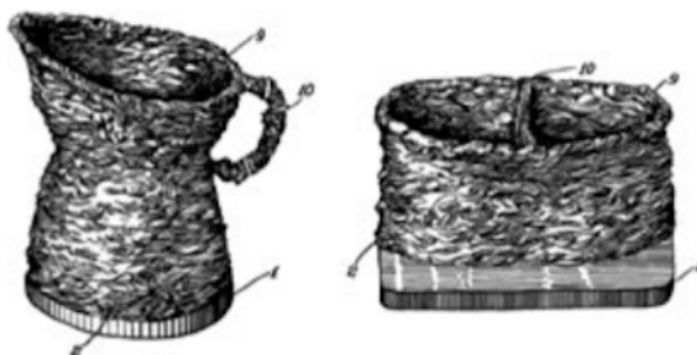


Obr.4: Betsy – první zařízení fungující na principu technologie SLS.[15]

V době, kdy patent od Dr. Carla Deckarda čekal na schválení, byla podána žádost o další patent na aditivní technologie, která byla opět odlišná od technologie SLA i SLS. Patent na technologii FDM byl podán Scottem Crumpem, který je v dnešní době dobře známý jako spoluzakladatel společnosti Stratasys (založena roku 1989). Navzdory tomu, že tato technologie byla patentována až po technologiích SLA i SLS, se v dnešní době jedná o nejrozšířenější technologii po celém světě. Způsob a jednoduchost této technologie umožnila její rozšíření i do neprůmyslového sektoru. Vývoj technologie odstartoval až patent uznáný roku 1992. Ve svých počátcích našel tento typ uplatnění především v oblasti medicíny.[25]

2.2 Historický vývoj aditivních technologií kovových materiálů

Vývoj aditivních technologií kovových materiálů lze shrnout do několika historických milníků, které utvářely odvětví moderních aditivních technologií od roku 1980. Technologie aditivní výroby kovových i nekovových součástí se v celé své historii často prolí-

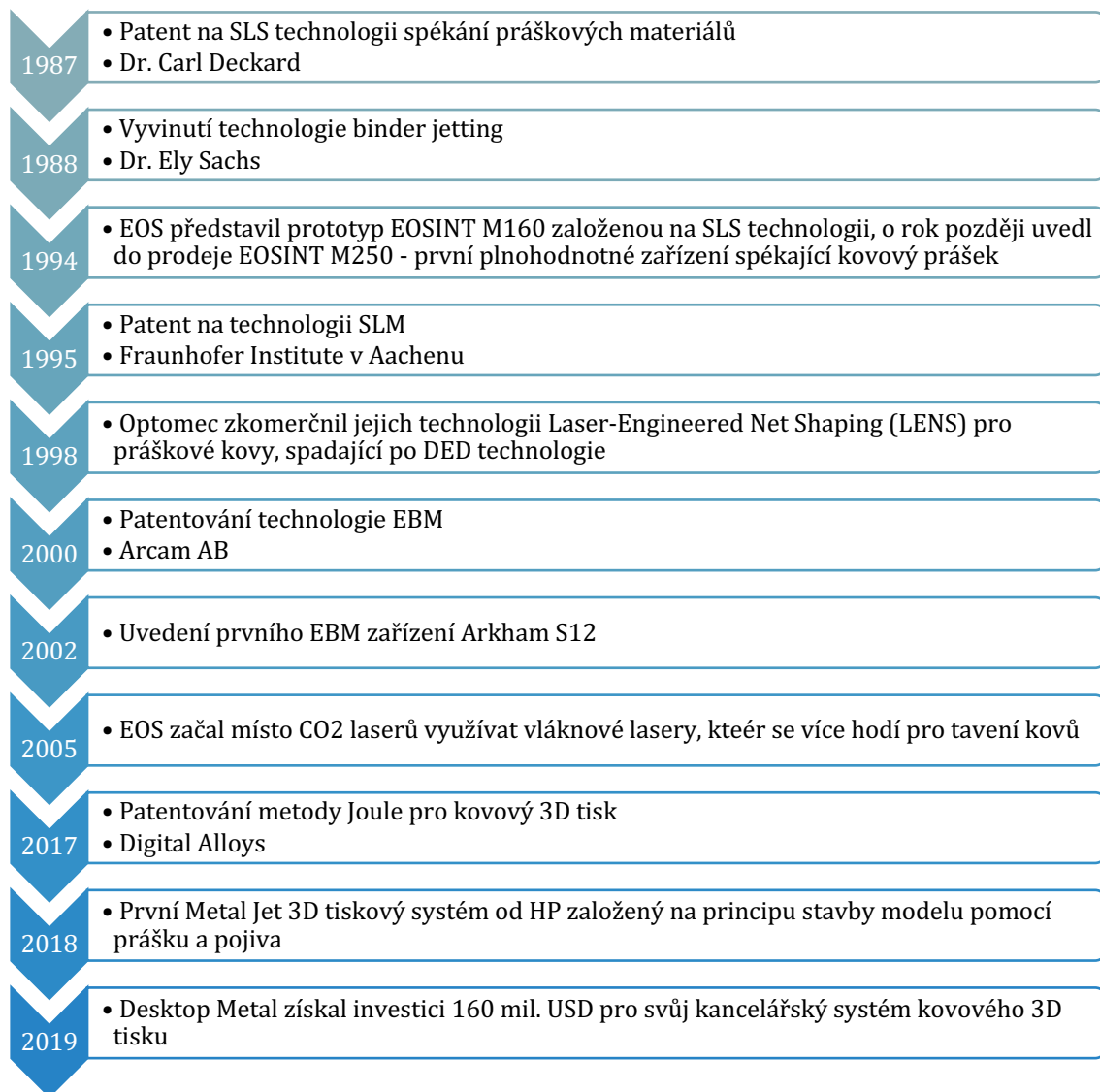


Obr.5: Princip metody stavby 3D modelu (Baker, 1926)[43]

naly a jednotlivé poznatky z obou oblastí se vzájemně využívaly. Významné historické milníky jsou uvedeny v Graf 2. Počátky aditivní technologie kovů se datují už do roku 1926. Ačkoliv se v souvislosti s tímto datem nedá hovořit o aditivní technologii dnešního typu, její princip byl naplněn, a proto je vhodné se o prvotním vývoji alespoň zmínit. Roku 1926 si jistý pan Baker patentoval technologii, která byla založena na využití elektrického oblouku jako tepelného zdroje pro tavení a vrstvení kovu. Metoda je vyobrazena na Obr. 5.

Mezi další historické zmínky se řadí následující:

- 1947 – vrstvení svarové housenky metodou SAW²
- 1964 – nanášení vrstev materiálu na rotační součást (White-Roller coating) metodou SAW

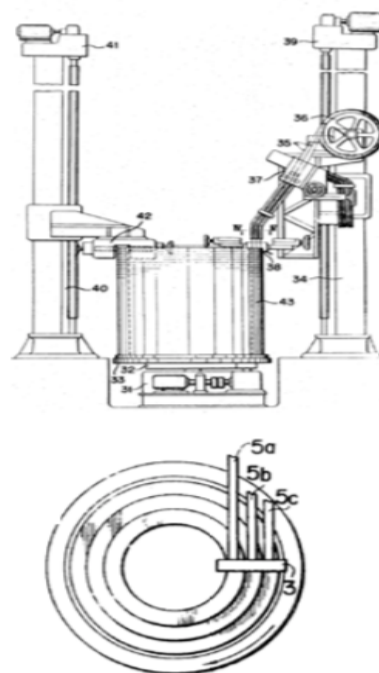


Graf 2: Historické milníky aditivních technologií kovových materiálů.

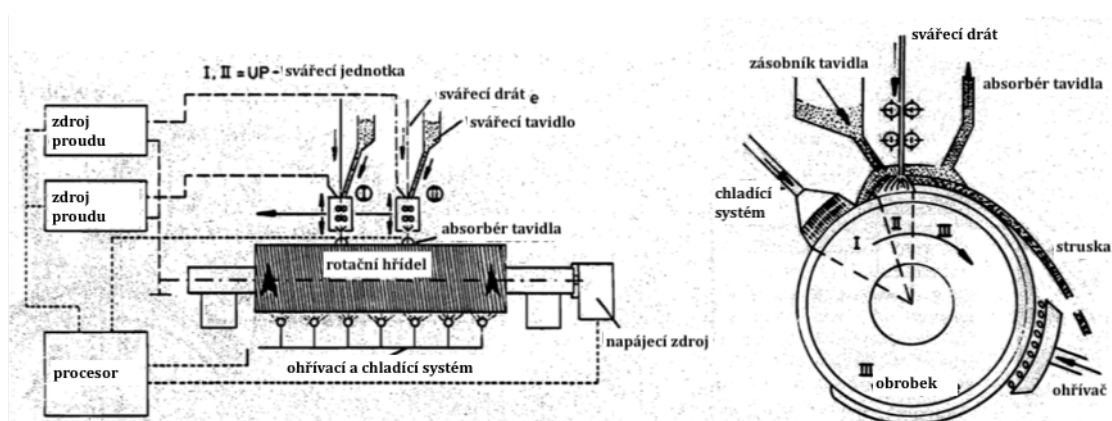
² SAW – metoda vysokovýkonného obloukového svařování pod tavidlem, používaná zejména pro svařování dlouhých nepřerušovaných svarů.[44]

Další historická zmínka se týká společnosti Mitsubishi, která si roku 1971 patentovala metodu, pomocí které bylo možné svařování několika svařovacími dráty z různých materiálů, a to za účelem vytvoření funkčně odstupňovaných stěn – viz Obr. 6.

Roku 1983 byla vyvinuta metoda navařování materiálu na rotační součást – viz Obr. 7. Metoda umožňovala výrobu velkých ocelových součástí vážících až 79 tun při rychlosti navařování 80 kg/h. Tyto součásti byly určeny zejména pro jaderný průmysl. V následujících letech došlo díky rozvoji počítačových CAD systémů k novému chápání aditivní technologie. Pomocí CAD systémů bylo možné tyto modely rozložit na jednotlivé vrstvy, čímž byly splněny předpoklady pro aditivní technologii tak, jak ji známe dnes. Celé odvětví pak bylo utvářeno několika historickými milníky – viz Graf 2. [42] [43]



Obr.6: Metoda vyvinuta společností Mitsubishi.[43]



Obr.7: Kussmaul – systém navařování. [43]

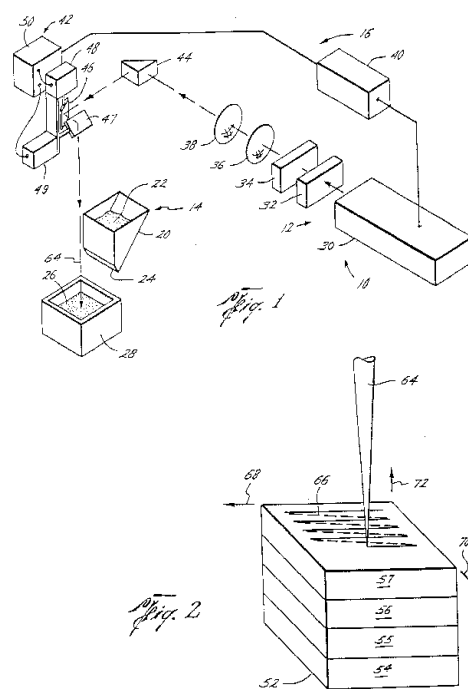
2.2.1 Historie SLS a DMLS

Myšlenka aditivní výroby součástí z práškových kovů se začala rodit v době, kdy Dr. Carl Deckard vyvinul společně s Dr. Joem Beemanem technologii SLS, na kterou si nechali v roce 1986 podat patent. Ten byl 28. ledna 1997 publikován pod číslem US5597589A. Tato technologie popisovala princip stavby objektu z práškového materiálu, jehož jednotlivé tenké vrstvy se spojovaly pomocí laseru. Princip funkce je téměř identický s dnešními technologiemi SLS a DMLS – viz Obr. 8.

V témže roce tito vědci založili společnost NOVA Automation, pozdější DTM, která byla následně prodána společnosti 3D Systems. Společně s tímto nákupem si společnost 3D Systems koupila klíčová práva k patentu na technologii SLS, která sehrála v celosvětovém měřítku významnou a zásadní roli v pozici této společnosti na poli aditivní technologie. Tímto nákupem se z ní stal největší dodavatel aditivních výrobních technologií na světě.

Zároveň v tomto období došlo ke strategické spolupráci společnosti s německou firmou EOS GmbH – Electro Optical Systems (založena roku 1989 Dr. Hansem Langerem a Dr. Hansem Steinbichlerem). V rámci oboustranně výhodného obchodu došlo k nákupu technologie, fungující na principu stereolitografie, společností 3D Systems od EOS, a na druhou stranu společnost EOS obdržela práva k technologii SLS. V roce 2013 firma EOS zažalovala 3D Systems kvůli porušení mnoha částí patentu na spékání prášku, odkoupeného společností DTM. Soud dal ve většině aspektů žaloby za

U.S. Patent Jan. 28, 1997 Sheet 1 of 5 5,597,589



Obr.8: Schéma technologie SLS vyobrazené v patentu US5597589A.

pravdu společnosti EOS, která se během tohoto sporu zaměřila na vývoj technologie DMLS a zařízení, ve kterých je možné tuto technologii realizovat. Jejich technologie měla značný dopad na směřování celého odvětví a trhu s technologií DMLS. [22][23]

2.2.2 Historie SLM

Technologie SLM – Selective Laser Melting má poněkud bolestivější historii než technologie SLS. Byla vyvinuta v roce 1995 v německém Aachenu v institutu pro laserovou technologii (ILT) Dr. Dieterem Schwarzem a Dr. Matthiasem Fockelem, kteří později založili F&S Stereolithographie-technik GmbH a nadále spolupracovali s kolegy z ILT, aby připravili tuto technologii ke komerčnímu použití. Na jejich výzkumu založila vývoj svého vlastního SLM zařízení i společnost TRUMPF, dodnes držící exkluzivní práva pro většinu patentů od ILT, které se týkají technologie SLM.[23]

Vývoj v oblasti technologie a výzkumu SLM lze shrnout v následující bodech:

- V roce 2000 F&S a MCP HEK GmbH vstoupily do partnerství, ze kterého nakonec vzešla práva pro komercializaci společností MCP.
- V létě roku 2002 společnosti Trumpf a EOS podepsaly kooperační dohodu, ve které se zavázaly poskytnout přístup a umožnit využití svých patentových portfolií na poli DMLM. Tímto krokem se obě firmy staly lídry na trhu.
- V roce 2006 společnost MCP HEK jako první dokázal pro stavbu modelu využít hliníkový a titanový prášek v technologii SLM.
- V únoru 2008 společnosti EOS a Trumpf, které držely nejdůležitější patenty na technologii laserového spékání, podepsaly patentovou dohodu se společností MCP, která je mohla začít využívat. Nicméně k této dohodě nedošlo celosvětově, a nebylo tak možné využít těchto patentů např. v Jižní Americe.
- V únoru 2008, ihned po podepsání patentové dohody mezi EOS/Trumpf a MCP, oznámila společnost MCP partnerství s 3D Systems a plán na distribuci MCP Realizer v USA.
- V květnu 2008 společnost EOS podala žalobu na MCP kvůli porušení patentu.

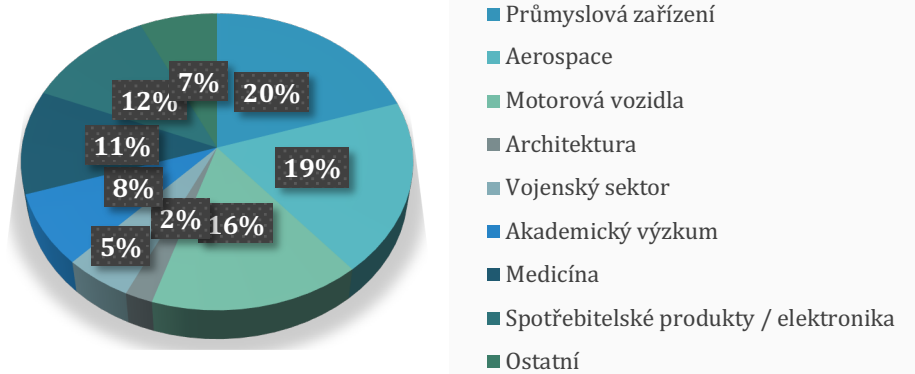
- Ve druhé polovině roku 2008 se společnost MCP rozdělila a část zaměstnanců z původní MCP založila novou společnost MTT Technologies Group.
- V roce 2009 EOS/Trumpf podepsala se společností MTT novou dohodu a ukončila soudní spor na základě mimosoudního vyrovnání.
- V roce 2010 se společnost MTT rozdělila na dvě části, konkrétně na MTT Technologies Group (Německo) a MTT Technologies LTD (UK). Ve stejném roce MTT LTD prodala svoji celou linii SLM produktů společnosti Renishaw PLC.
- V roce 2011 došlo ke změně společnosti MTT Group na soukromou, která se vzápětí přejmenovala na SLM Solutions GmbH. Ta dodnes pod touto značkou vyvíjí a prodává SLM zařízení.
- V roce 2014 expiroval původní patent Dr. Carla Deckarda, což umožnilo inovace dalším společností. Na základě původního patentu mohly začít vyvíjet nové přístroje.[23]

Jak je patrné z přehledu klíčových okamžiků, kolem vývoje a patentů spojených s technologií SLM byly velké boje, které definitivně ukončila až expirace patentu. Až poté se vývoj těchto technologií mohl naplno rozvinout v celosvětovém měřítku. To je doloženo v následující kapitole na Graf 4. Značný rozmach technologie registrujeme kolem roku 2014, kdy začínají čísla prodejů aditivních systémů strmě růst.[23]

2.2.3 Situace na trhu v dnešní době

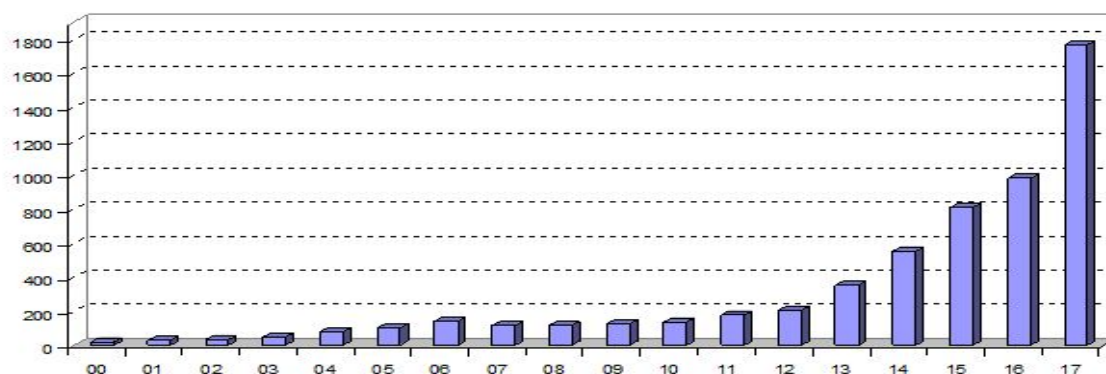
Na základě analýzy trhu od společnosti Wohler Associates lze zjistit mnoho důležitých informací o průmyslovém odvětví aditivních technologií. Jedná se o nejobsáhlejší analýzu tohoto segmentu, která vychází každoročně od roku 1996. Využití zmiňované technologie v rámci jednotlivých průmyslových odvětví je znázorněno v Graf 3. [19]

Využití aditivních systémů napříč průmyslem



Graf 3: Zastoupení aditivních systémů v průmyslu (2017) [23]

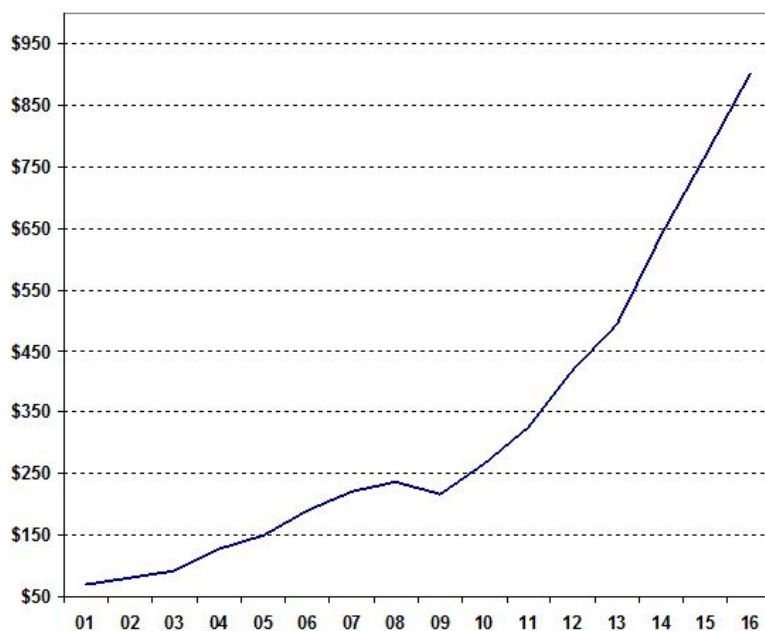
Analýza trhu s aditivními výrobními systémy z roku 2018 od společnosti Wohler Associates ukazuje vzrůstající trend zavádění aditivních technologií do firem. V roce 2017 došlo oproti předchozím letům k razantnímu skoku v prodejkách. Konkrétně bylo v roce 2017 prodáno 1 768 kovových aditivních systémů oproti roku 2016, kdy bylo prodáno 983 systémů, což je 80% meziroční nárůst prodejků. Detailní vývoj prodejků je patrný z Graf 4. Tento vývoj zapříčinilo zejména zdokonalení samotného procesu aditivní výroby. Došlo k němu díky zavedení systémů pro kontrolu a sledování procesu stavby a díky systémům zajišťujícím kontrolu kvality produktu. Navzdory vysoké ceně ať už samotných výrobních zařízení, nebo vyráběných produktů si firmy začínají uvědomovat důležitost výroby součásti pomocí kovové aditivní technologie. Tato technologie je už nyní neopomíjenou a zásadní konkurenční výhodou na poli konvenčních technologií. [18][19]



Graf 4: Vývoj prodejků aditivních systémů 2000–2017.[18]

V roce 2017 bylo na trhu kolem 135 firem zabývajících se vývojem a prodejem průmyslových aditivních systémů. Jedná se téměř o 72% nárůst oproti roku 2016, kdy bylo na trhu cca 97 společností. Jako průmyslový aditivní systém je považováno zařízení prodávané za více než 5 000 USD. Do tohoto segmentu se posouvá stále více nových společností, které se snaží zaujmout větší rozmanitostí použitelných materiálů, rychlejším stavebním procesem nebo nižší cenou. [18][19]

Co se týká prodeje materiálu pro aditivní technologie, toto odvětví zažívá strmý růst od poloviny roku 2009. Graf 5 zahrnuje veškeré prodeje materiálů pro aditivní výrobní systémy, včetně tekutých fotopolymerů, prášků, plastového granulátu, filamentů, drátů a dalších materiálů používaných v těchto systémech. [20]



Graf 5: Vývoj prodejů materiálu pro aditivní technologie v letech 2000–2016 (uvedené ceny v milionech dolarů).[32]

V dnešní době tvoří drtivou většinu produkčních aditivních výrobních systémů zařízení založená na technologiích DMLS, SLS, DMLM, SLM a EBM. Tyto technologie jsou, až na EBM, téměř identické. Jejich rozdílné názvy pochází z jejich historického

vývoje, kompatibilních materiálů a také lehce odlišného způsobu spojování práškových částic:

- SLS – Selective Laser Sintering
- DMLS – Direct Metal Laser Sintering
- SLM – Selective Laser Melting
- DMLM – Direct Metal Laser Melting

Označení technologie SLS a SLM se nejčastěji aplikuje na aditivní technologie ve spojení s práškovými materiály z plastu, skla, keramiky atp. Označení DMLS a DMLM je zpravidla používáno pro zařízení, která jsou určena pro spojování různých kovových práškových materiálů. Rozdíl technologií slinování (sintering) a tavení (melting) je pouze ve způsobu spojování jednotlivých práškových částic. V případě slinování dochází k pouhému natavení práškových částic, a tím dochází k jejich spojení s předchozími vrstvami. Nevýhodou této metody je nižší hustota a větší porozita výsledného produktu. V případě tavení dochází k úplnému roztavení částic a k jejich spojení na molekulární úrovni v homogenní díl bez významného snížení hustoty a téměř nulovou porozitou. V obou případech je po procesu samotného tisku třeba zařadit dodatečné úpravy v podobě tepelného zpracování. Veškeré rozdíly mezi těmito technologiemi jsou v dnešní době minimální, zařízení využívající technologii DMLS mají zpravidla dostatečně výkonný laser, který může materiál jak natavovat, tak i přímo zcela tavit. Zároveň zařízení založená na technologii DMLM je možné nastavit takovým způsobem, že dané částice pouze natavují, a nedochází tak k jejich úplnému roztavení, pokud to není žádoucí. [22]

Na dnešním trhu aditivních technologií se vyskytuje mnoho technologií, které mají za cíl totéž – stavbu objektu po jednotlivých vrstvách s požadovanými vlastnostmi. Rozdíly těchto technologií mohou být např. ve využívaném materiálu, způsobu spojování jednotlivých vrstev, časové náročnosti, ceně atd. Dělení aditivních technologií je uvedeno na Schéma 1.

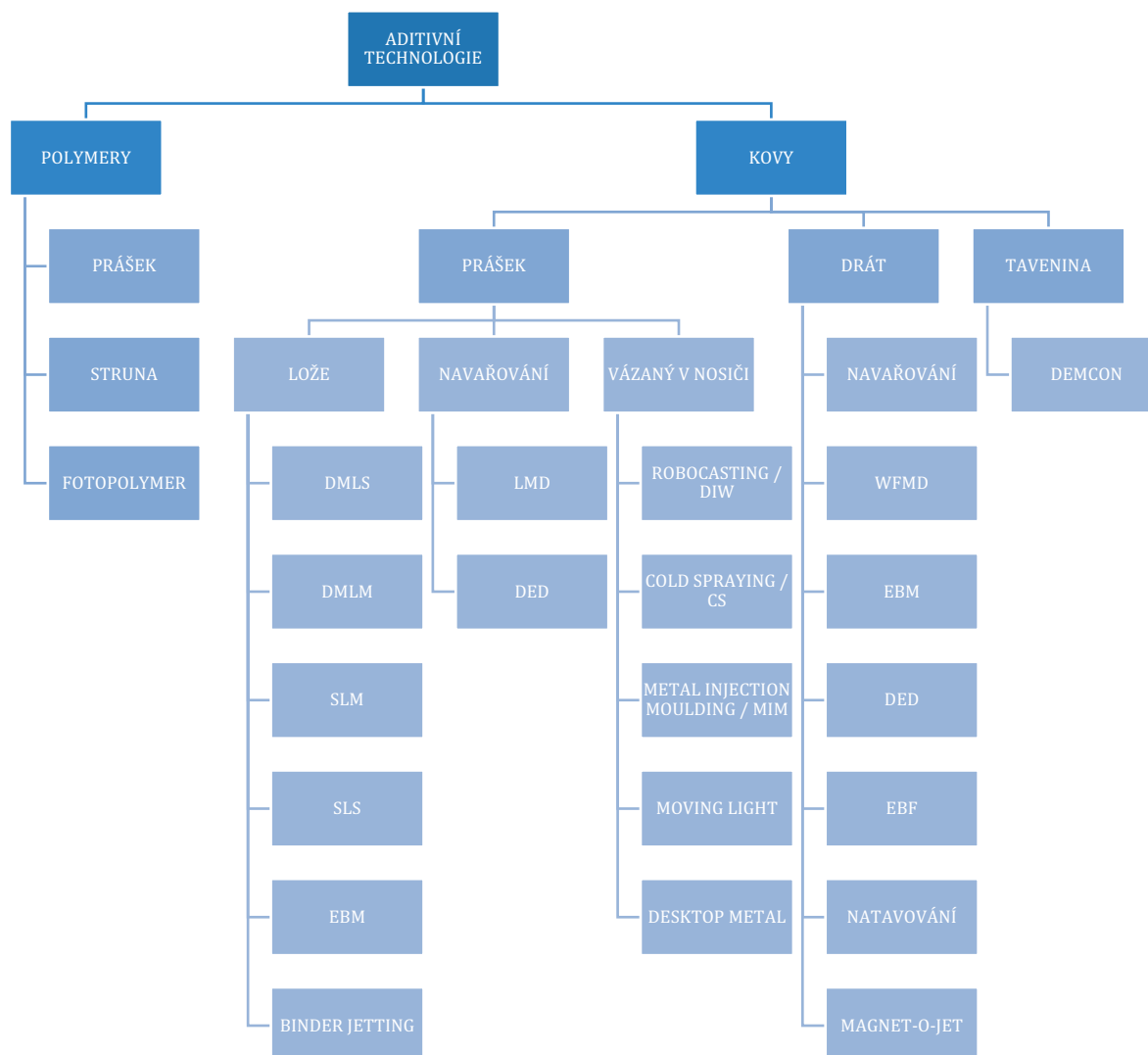
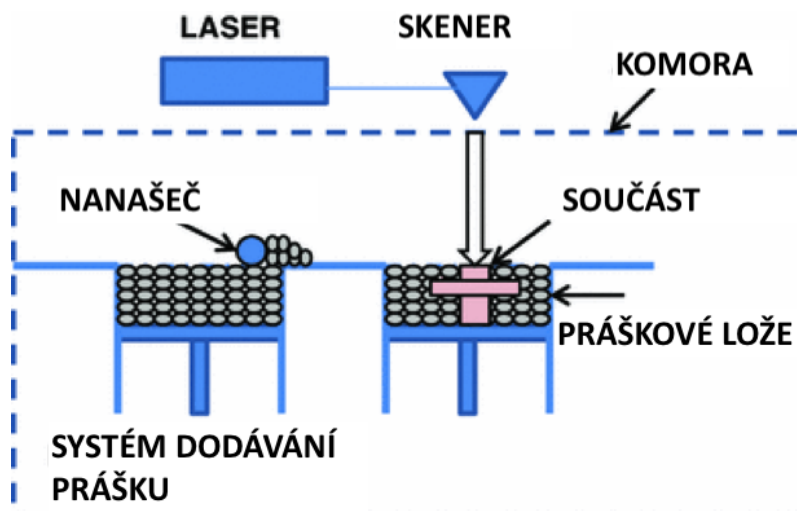


Schéma 1: Dělení aditivních technologií.

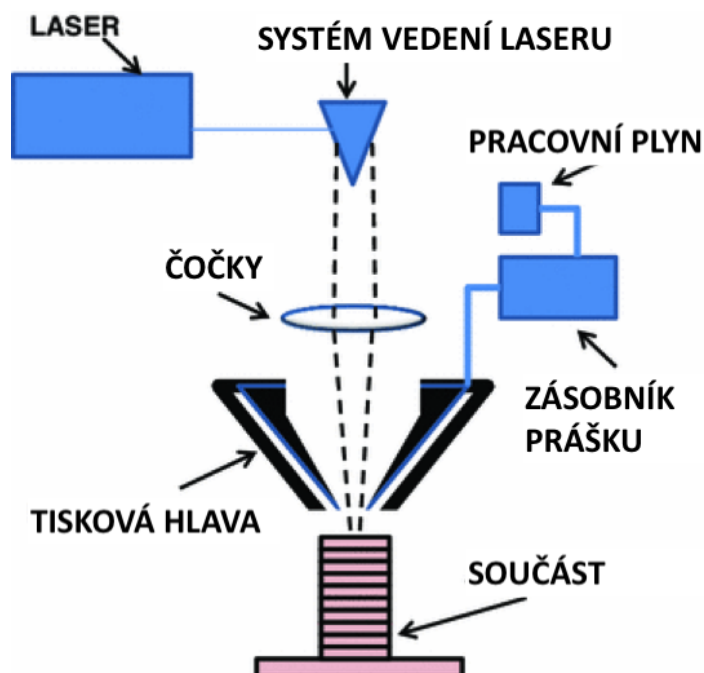
Jak je znázorněno na Schéma 1, tyto technologie lze dělit hlavně dle způsobu nanášení vrstev stavebního materiálu a jeho dodávání do tiskového prostoru. Následně je možné rozčlenění do čtyř základních skupin dle principu funkce:

- systémy na bázi spékání práškového lože (Obr. 9)
- systémy na bázi proudu prášku (Obr. 10)
- systémy na bázi dávkování drátu (Obr. 11)

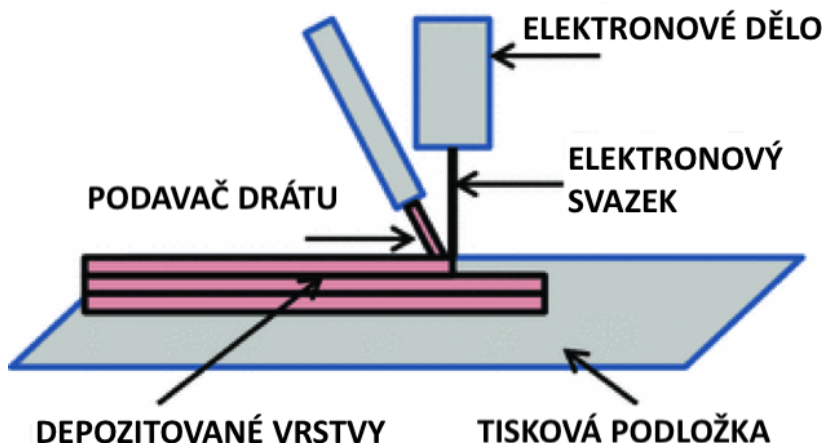
- systémy s práškem vázaným v nosném médiu (tento způsob je poměrně nový, jako první ho aplikovala společnost Desktop Metal u svých nových kancelářských tiskáren; ve své podstatě se jedná o obdobu FDM technologie) [17]



Obr.9: Princip technologie spékání práškového lože.[17]



Obr.10: Princip technologie navařování proudu práškového materiálu.[17]



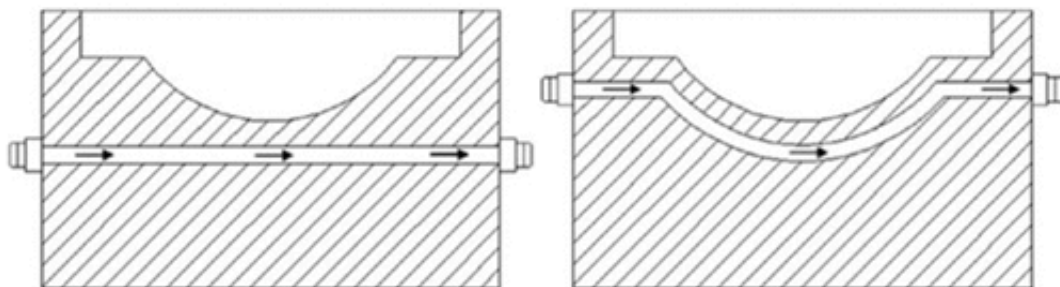
Obr.11: Princip technologie navařování materiálu ve formě drátu.[17]

2.2.4 Aplikační potenciál

Dle Graf 3 si lze udělat představu o zastoupení aditivních technologií v jednotlivých odvětvích průmyslu. Jaký výrobek si ale konkrétně představit pod jednotlivými oblastmi? V následující části bude popsáno několik praktických využití aditivní technologie s velkým potenciálem do budoucnosti.

2.2.4.1 Konformní chlazení

Oblast konformního chlazení je jednou z oblastí, ve které je již v dnešní době plně nasazena aditivní technologie. Konvenčně vyráběné formy pro vstřikování roztavených plastů mají chladicí kanály pouze ve tvaru přímých linií. V případě složitě tvarovaných forem je tedy značným problémem chlazení míst vzdálenějších od chladicího kanálu. Názorný příklad je zobrazen na Obr. 12.

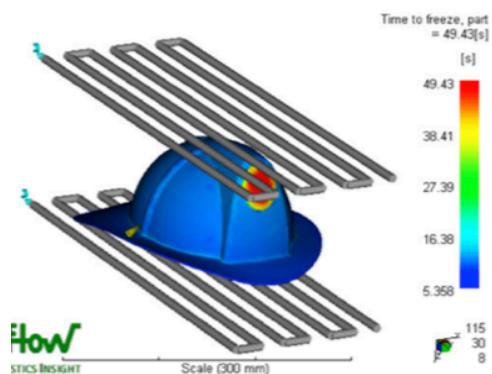


Obr.12: Chladicí kanály formy vyráběné konvenčně (vlevo) a aditivní technologií[29]

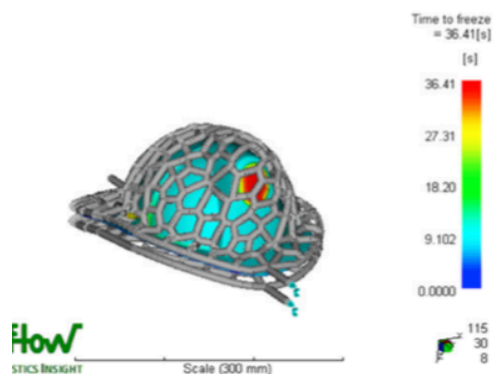
Zobrazená situace způsobuje nejenom prodloužení taktu přístroje kvůli „zachlazovacímu“ cyklu, ale také chladnutí s velmi rozdílnými teplotními gradienty v různých částech výstřiku, které mohou v konečném důsledku způsobit znehodnocení nebo snížení kvality konečného výrobku v podobě různých staženin nebo diskolorací.

Forma vyráběná aditivní technologií umožňuje dokonalé rozmístění chladících kanálů s konstantní tloušťkou stěny mezi dutinou výrobku a chladícím kanálem. Chladicí kanál ve tvaru dílu se v průmyslové praxi označuje jako CCC (conformal cooling channel). Tato technologie umožňuje zkrácení chladicího cyklu o více než polovinu času, který je nutný k zachlazení vstřiku s konvenčně vyráběnými formami a chladicími kanály. Zároveň dochází k rovnoměrnému chlazení formy a samotného výstřiku, takže výsledná zachlazená struktura plastu je homogenní v celém svém objemu.

Tato technologie aditivně vyráběných forem se nazývá „Rapid Tooling (RT)“ a dělí se na přímý a nepřímý RT. U přímého RT jsou formy přímo vyráběny aditivní technologií a u nepřímého RT jsou kanály vyráběny pomocí aditivní technologie a následně vloženy do formy dalšími výrobními postupy.



Na Obr. 13 je názorná ukázka výhod konformního chlazení výrobků, v tomto případě plastové helmy. V horní části obrázku je zobrazeno konvenční uspořádání chladících kanálů a dole je zobrazeno počítačem navržené chlazení, které zrychlí proces chladnutí téměř o 13 sekund. [29][30][31]



Obr.13: Příklad konvenčního (nahore) a konformního chlazení výstřiku.[31]

2.2.4.2 Medicína

V tradiční medicíně byly vždy implantáty pro léčbu pacientů vyvíjeny a vyráběny dle ideální stavby lidského těla. Jednotlivé implantáty nebyly pro netypickou stavbu těla uzpůsobené zejména z důvodu vysoké ceny vývoje a výroby. U většiny pacientů se lékaři museli spokojit s univerzálními sériově vyráběnými implantáty, které jsou dokončovány během samotného zákroku přesně dle potřeb daného pacienta. Díky velkému pokroku v oblasti aditivní výroby se v posledních letech daří tyto historické zvyky měnit a dopřát pacientům větší životní komfort a vracet je zpět do normálního života bez omezení za pomoci na míru vyráběných implantátů a náhrad lidského těla jako je např. náhrada části stehenní kosti (Obr. 14).



Obr.14: Náhrada stehenní kosti s vnitřní strukturou, která napodobuje přirozenou strukturu kosti.[36]

V moderní době se objevuje spousta nových technologií, které umožňují neinvazivní pokročilé měření a skenování lidského těla. Jednotlivé snímky jsou dále využívány pro tvorbu komplexních 3D modelů vnitřních struktur a orgánů lidského těla. Tyto 3D modely je možné přímo vyrábět aditivní technologií a použít je například jako kostní náhradu, kterou lze implantovat na dané místo bez dodatečných úprav okolních tkání. Tato technologie může sloužit pro výrobu pokročilých implantátů různých tvrdých tkání lidského těla, jako jsou např. klouby, části lebky, kostí, zubů atp.

Právě aditivním technologiím se připisuje velká úloha v blízké budoucnosti. Od roku 1920 se průměrná délka dožití zvýšila u mužů ze 47 na 76 let a u žen z 50 na 82 let. Vzhledem k trendu zvyšující se délky dožití a faktu, že celá západní civilizace stárne, budou tyto technologie nepostradatelné. Lidské tělo je dle mnoha výzkumů schopno dožít se vysokého věku, ale vzhledem ke stylu života se u lidí velmi často projevují různá onemocnění tvrdých tkání, jako např. kloubů, což je nutno řešit chirurgickým zákrokem a jejich nahrazením. [33][34]

Aditivně vyráběné implantáty do lidského těla s sebou přináší mnoho benefitů, které jsou nutné pro udržitelnost celého odvětví. Zejména se jedná o delší životnost aditivně vyráběných implantátů oproti tradičním, jejichž životnost se pohybuje zhruba kolem 15 let. S tím souvisí i nižší finanční náročnost, a tedy větší dostupnost pro běžné pacienty. V čem jsou tedy tyto implantáty jiné a revoluční? Lidská kostra je měnící se materiál, který se v průběhu života v závislosti na zatížení formuje tak, aby došlo k efektivnímu využití materiálu pouze tam, kde je ho třeba. V případě implantování velmi pevného materiálu (tedy klasického implantátu) do lidského těla, dochází v průběhu života k přenášení sil tímto implantátem do původní kosti a v místě styku implantátu s kostí dochází k remodelaci, které v konečném důsledku vede k uvolnění implantátu. Toto uvolnění následně zvyšuje opotřebení implantátu, které vede k většímu a většímu uvolňování spoje mezi kostí a implantátem. To může vést až k úplnému selhání.

Naproti tomu aditivně vyráběné implantáty umožňují hladké přenášení síly mezi implantátem a kostrou pacienta. Zároveň je možné vytvořit porézní strukturu (viz Obr. 15), do které prorůstá kostní tkáň, a tím se vytvoří pevné spojení s kostrou pacienta. Výhodou je, že nedochází k uvolňování implantátu v průběhu života.



Obr.15: Aditivně vyráběná titanová náhrada kyčelního kloubu.[35]

Dnešní trh poskytuje možnosti výroby těchto implantátů, nicméně trh s těmi tradičními je stále mnohonásobně větší a nějakou dobu potrvá, než dojde k masovému rozšíření této technologie do běžné praxe. Pro chirurgy je stále jednodušší a pravděpodobně i pohodlnější sáhnout po klasickém implantátu, který je vyráběn v několika velikostech, a vybrat ten, který pacientovi padne nejlépe.

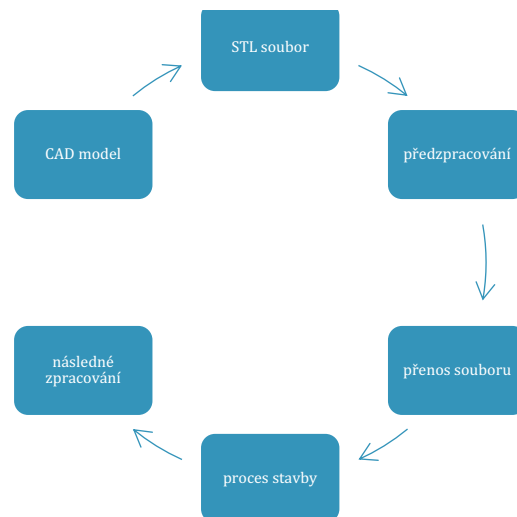
Tento postup umožňuje rychlé řešení akutního problému, jako jsou např. rozsáhlé rekonstrukce po nehodách, kdy je hlavním cílem rychlá rekonvalescence pacienta. Aditivně vyráběné implantáty jsou časově náročné na výrobu, a není je proto možné v některých případech použít, protože není dostatek času. Základem procesu výroby takového implantátu je pořízení důkladného 3D obrazu pacientova těla (zejména poškozeného místa), následného odvození tvaru implantátu, který přesně zapadne na dané místo v těle, tvorba modelu této náhrady (v případě rekonstrukce po nehodě se zpravidla využívá zrcadlení z druhé poloviny těla), příprava tiskových dat a samotný tisk. Po tisku následují další procesy, jako je např. tepelné zpracování, povrchová úprava a kontrola kvality. [35]

2.2.4.3 Rychlé prototypování

Další z oblastí, ve které aditivní technologie vyniká, je oblast rychlého prototypování. Metoda rychlého prototypování slouží k rychlému převodu digitálních dat do podoby fyzické součásti. Tato součást může být vyráběna pro vizuální nebo funkční názornost. Prototypy vyráběné jednou z kovových aditivních technologií zpravidla slouží jako funkční prototypy, které lze testovat a využívat jako plnohodnotný funkční díl. Tyto prototypy mohou sloužit jako akcelerátory prvotních fází vývoje nových součástí, u kterých je možné odladit umístění v komplikovaných sestavách a také plnohodnotně otestovat mechanické vlastnosti a únavovou životnost.

Rychlé prototypování je výhodné ze dvou hlavních důvodů. Prvním pohledem je cena a druhým doba, za kterou je možné daný prototyp vyrobit. Samotný proces rychlého prototypování popisuje Schéma 2. Jedná se o proces začínající u CAD návrhu a končící u následného zpracování, přičemž tato cesta je značně rychlejší oproti konvenčním metodám prototypování. Poslední fází je získání prototypu, který splňuje všechny požadavky a umožňuje zahájit sériovou výrobu.

Schéma 2: Proces rychlého prototypování. Proces začíná u CAD modelu a několikrát se opakuje.[38]



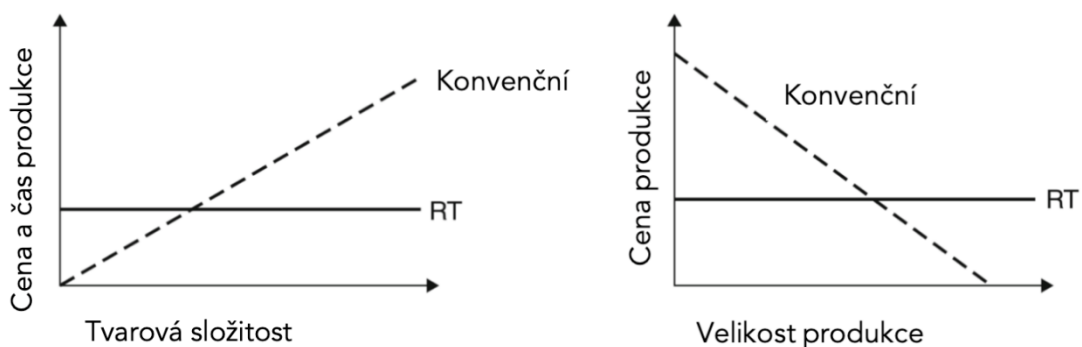
V dnešní době se využívá pokročilých možností těchto CAD systémů a provádí se pokročilé simulace už v rámci prvních prototypů. Následuje exportování STL souboru z CAD systému. STL formát je standardním formátem pro všechny systémy rychlého prototypování. Soubor STL popisuje syrový, nestrukturovaný triangulovaný povrch pomocí jednotkových normálových vektorů a vrcholů trojúhelníků ve trojrozměrné kartézské soustavě souřadnic. Soubor STL je následně vložen do softwaru dodávaného nebo doporučovaného výrobcem aditivního výrobního systému.

V tomto systému je uživatelem zvolena vhodná orientace tohoto modelu a ten je následně rozdělen na jednotlivé vrstvy. Zároveň jsou mu přiřazeny důležité tiskové parametry, které umí výrobní zařízení zpracovat. Po tomto kroku je z tohoto „předzpracovacího“ softwaru exportován soubor, který se importuje do aditivního výrobního zařízení a je spuštěna samotná stavba. Po dokončení následuje odstranění stavby z tiskového prostoru, očištění podpor, tepelné zpracování a případné další dokončovací operace. Technologie rychlého prototypování je v dnešní době velmi rozšířenou, většina společností zabývajících se vývojem konstrukčních dílů vlastní

některou z technologií aditivní výroby, na které si ověřují své návrhy v počátečních fázích vývoje.[37][38][39]

2.2.4.4 Rychlá výroba nástrojů

Jedná se o obdobu metody rychlého prototypování, která slouží pro rychlou výrobu nástrojů. V průmyslu se formy a nástroje mohou vyrábět dvěma způsoby. Prvním způsobem je konvenční výroba pomocí subtraktivních procesů, kdy dochází k počítačem řízenému odebírání materiálu ze základního polotovaru za cílem tvorby tohoto nástroje. Druhým způsobem je výroba pomocí aditivních procesů (tzv. fast form fabrication – FFF), kdy dochází k nanášení jednotlivých vrstev materiálu a jejich spojování.



Graf 6: Porovnání rychlé výroby nástrojů oproti konvenční výrobě.[40]

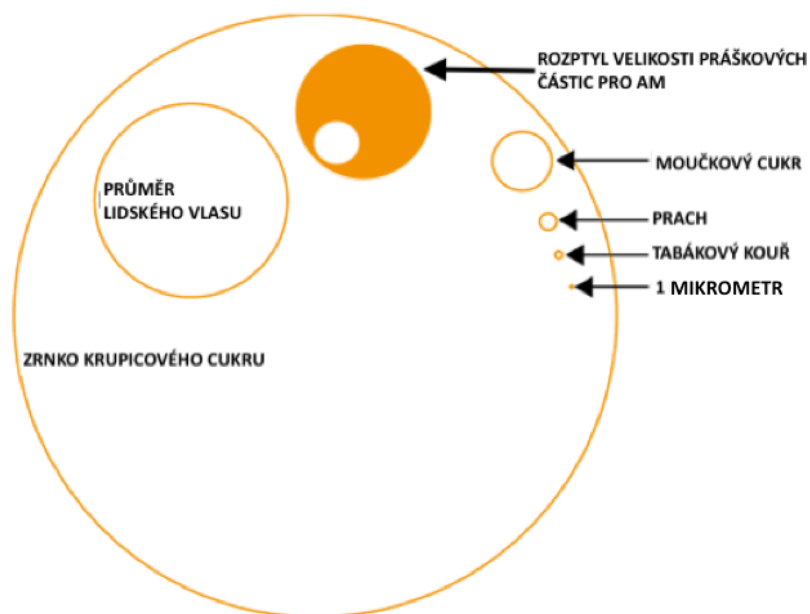
Techniky rychlé výroby nástrojů založené na aditivní technologii mohou být využity pro efektivní a rychlou výrobu forem pro různé druhy odlévání nebo vstřikování materiálů. Nejvíce rozšířené jsou tyto metody v oblastech aerospace, automotive, medicíně, šperkařství, vojenském sektoru a ve sportu. Jako příklad lze uvést společnost AlliedSignal, která se zabývá výrobou v průmyslu aerospace. Díky zavedení rychlé výroby nástrojů se jí podařilo zkrátit výrobní proces součástí pro jejich tryskový motor o 8–10 týdnů, a ušetřit tak přes 50 000 USD.

Jako druhý příklad lze uvést společnost Ford Motor, která touto technologií vyráběla vstřikovací formy a dosáhla 45% redukce nákladů a úspory 40 % výrobního času

forem. Porovnání RT technologií z pohledu úspory času a financí je možné vidět na Graf 6. Jak je vidět v grafu nalevo, s rostoucí tvarovou složitostí nástroje je cena a čas produkce u RT technologie konstantní, u konvenčních technologií trend roste. Na druhou stranu se při masové produkci nástrojů od určité velikosti produkce vyplácí výroba konvenční, jelikož s velikostí produkce je trend ceny klesající. [40][41]

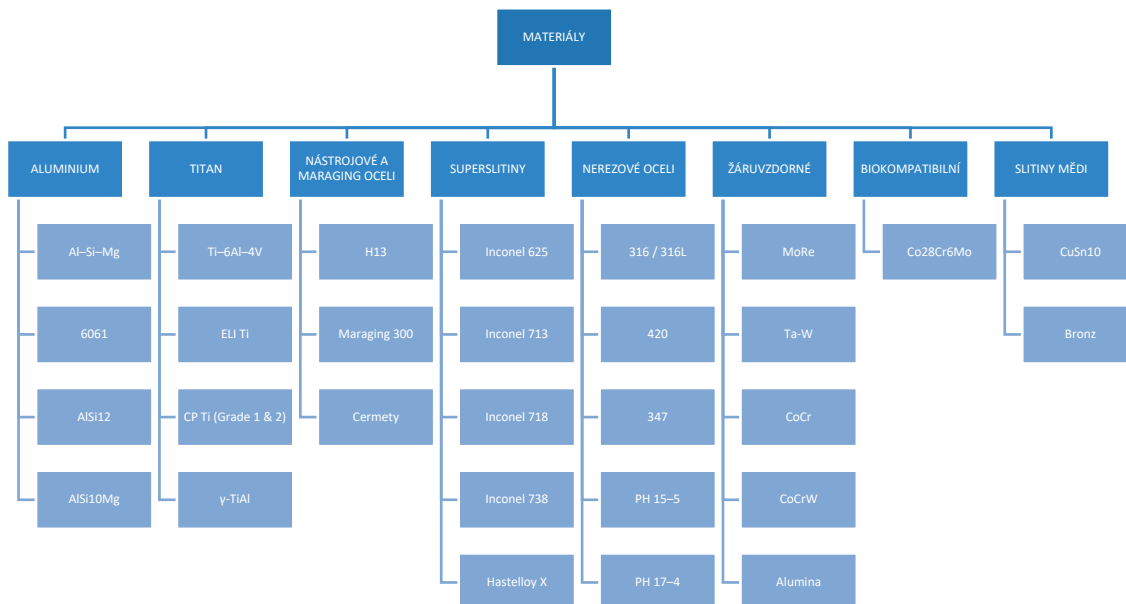
2.2.5 Materiály

Kovové materiály využívané v aditivních výrobních procesech jsou zejména ve dvou formách – ve formě prášku a ve formě drátu. Na trhu je v dnešní době dostupné velké množství různých materiálů s různými mechanickými vlastnostmi. Pro základní orientaci může posloužit Schéma 3. Kovový práškový materiál je dnes definován jako prášek určený pro aditivní výrobu tehdy, když jsou rozměry částice v rozmezí 10–45 mikrometrů. Zároveň pro práškovou částici platí vysoký poměr velikosti povrchu k hmotnosti. Rozměry jsou to těžko představitelné, pro představu dobře poslouží porovnání na Obr. 16.



Obr.16: Přirovnání velikosti práškové částice kovu pro aditivní výrobu.[28]

Schéma 3: Dostupné materiály v AM.[17][27]



2.2.5.1 Metody výroby

- mechanické metody
- atomizace (plynem, kapalinou, plasmou, odstředivou silou)
- mechanické mletí a legování
- fyzikálně-chemické metody
- elektrolýza
- chemické procesy
- sferoidizace plasmou

Atomizace je nejrozšířenějším způsobem výroby kovových prášků pro aditivní výrobu. Na světě se využívá několik druhů atomizace, nejpoužívanější technologií je atomizace plynem a kapalinou a další velmi používanou je atomizace plasmou, známá také jako atomizace rotující elektrodou. Méně rozšířená je atomizace odstředivou silou. Princip jednotlivých atomizací je ve své podstatě stejný. Dochází k disperzi tenkého proudu roztaveného kovu pomocí plynu, vysokotlakého proudu vody,

plasmy, rotačních sil apod. Během nárazu, např. plynu, na proud tekutého kovu dochází k rozdělení tohoto proudu na jednotlivé kapičky, které zkrystalizují před dopadem na stěny atomizeru.

Atomizace plynem – v této chvíli nejrozšířenější technologie výroby kovových práškových materiálů. Tento proces zahrnuje fáze tavení, atomizace a tuhnutí. Proces tavení zpravidla probíhá ve vakuové peci, výjimečně v peci s ochrannou atmosférou. Tento kov následně putuje do trysky, kterou je vytvořen tenký proud taveniny, který je následně rozprášen inertním plynem o vysokém tlaku na malé kapky kovu. Prášky vyráběné touto metodou se vyznačují sférickým tvarem, vysokou čistotou, hladkým povrchem a homogenní strukturou díky rychlému tuhnutí. Zařízení pro výrobu těchto materiálů vyrábí mj. německá společnost ALD vacuum technologies GmbH. Společnost nabízí několik modifikací systému založeného na atomizaci plynem, díky tomu je možné na těchto strojích vyrábět širokou škálu materiálů. Hlavními dvěma modifikacemi jsou VIGA a EIGA. První se vyznačuje indukčním tavením ve vakuu kombinovaným s atomizací inertním plynem, který umožňuje výrobu prášků z nereaktivních kovů a jejich slitin. Druhý systém je definován jako elektrodové indukční tavení kombinované s plynovou atomizací. Tento systém je vhodný pro vysoce reaktivní kovy a jejich slitiny jako je např. titan. Společnost nabízí další modifikace, ale ty jsou využívány pouze ve speciálních případech a jsou spíše raritou. Jedná se o modifikace: PIGA (využívá plasmový hořák místo indukčního tavení), ESR-CIG (využívá proces třístupňového tavení) a VIGA-CC (vyvinutý pro vysoce reaktivní slitiny, které je těžké vyrobit ve formě elektrody, např. TiAl).

Atomizace kapalinou – je shodná s atomizací plynem, ale místo inertního plynu se používá kapalina (zpravidla voda) jako atomizační médium. Atomizace vodou se nejčastěji využívá pro výrobu prášků nereaktivních materiálů, jako je například ocel. Kvůli vyšší rychlosti chlazení a tuhnutí, v porovnání s atomizací plynem, vzni-

kají částice nepravidelného tvaru. Hlavní výhodou atomizace vodou jsou nižší náklady než u ostatních atomizačních metod. Mezi nevýhody se řadí nižší čistota vyskytující se především u materiálů s nízkou odolností vůči oxidaci.

Atomizace plasmou – jedná se o poměrně nový proces, který byl vyvinutý pro výrobu vysoce čistých prášků reaktivních kovů a jejich slitin s vysokým bodem tavení, jako je např. titan, zirkon, tantal atp. Vstupním materiálem do tohoto procesu je drát daného materiálu. Výsledkem jsou hladké částice sférického tvaru s nízkým obsahem kyslíku.

Atomizace odstředivou silou – ostatní druhy atomizace v sobě zahrnují atomizační odstředivé procesy. Existuje několik způsobů využití odstředivých sil pro oddělení jednotlivých kapek tekutého kovu. Nejznámějšími způsoby jsou REP (proces rotující elektrody) a PREP (proces rotující elektrody a tavením plasmou). Tyto procesy se využívají pro vysoce reaktivní kovy. Výsledný tvar prášku je sférický s vysoce kvalitním hladkým povrchem. Nevýhodou této metody je omezená rychlost rotace, kvůli které není možné dosáhnout menší velikosti práškových částic, a také vysoká cena výroby těchto rotujících elektrod.

Mechanické mletí – tento proces spočívá v mletí pevného skupenství daného kovu, je to jeden z nejpoužívanějších způsobů výroby železného prášku. V případě přeměny pevného skupenství na prášek dochází k postupnému zmenšování velikosti kovových částic za použití vnějších sil. Jsou rozlišovány tři typy mlecího procesu – drcení, broušení a otěr. Po procesu mletí se zařazují další zpracování, kterými mohou být komprese (statické), kolize (dynamické), stříh (řez) nebo jejich kombinace. Tato zpracování slouží k získání potřebné velikosti nebo vyhlazení povrchu částic. Do mechanického mletí je zahrnuto i tzv. mechanické legování, které spočívá v opakovaném svařování, drcení a „znovusvařování“ práškových částic ve vysokoenerge-

tických mlýnech. Díky vysoké intenzitě nárazu jemných částic umožňuje tento proces výrobu prášků nerovnovážných fází, amorfních slitin a slitin s nanostrukturou. Výhodou mechanického mletí je možnost využití různých vstupních materiálů.

Elektrolýza – je jedním z dalších způsobů výroby prášků pro aditivní technologie. Jedná se o fyzikálně-chemický proces, který spočívá v dělení komponentů materiálu elektrody. To je iniciováno vedením proudu taveninou. Prvotní materiál pro elektrolýzu je kovová anoda. V některých případech je možné využít také slinované nebo slinované zbytkové produkty. Elektrolýza je limitována výhradně pro výrobu prášků čistých kovů, nikoliv slitin.

Chemické procesy – nejpoužívanějším je karbonylový proces, pomocí kterého je možné vytvářet železný a niklový prášek. Surový kov reaguje s plynným oxidem uhlíku při tlaku a teplotě, které vedou k vytváření karbonylu. Ten je následně rozložen vlivem vzrůstající teploty a snižování tlaku na prášek. Mezi další chemické procesy výroby prášků se řadí redukce vodíků roztokem solí pod tlakem nebo chemické srážení kovů z roztoků rozpustných solí.

Sferoidizace plasmou – je jednou z nových technologií ve výrobě prášků kovových materiálů. Ve skutečnosti se nejedná o samotný způsob výroby, ale o způsob dodatečného zpracování práškových částic jiného než sférického tvaru, který umožňuje dokonalé zakulacení práškových částic. Princip spočívá v kontrolovaném procesu tavení práškových částic nesférického tvaru, které prolétávají plasmovou komorou, ve které jsou tyto částice plně roztaveny, a následně utvářejí sférické částice. Tato metoda slouží zároveň k odstraňování porozity, zlepšení tekutosti prášku, zdánlivé hustoty a čistoty prášku.

2.2.5.2 Charakteristika vlastností

Charakterizovat vlastnosti práškových materiálů lze pomocí standardů, které se dělí na dvě základní skupiny. První skupinou jsou standardy, které jsou shodné se standardy materiálových vlastností kovových materiálů v běžné formě. Mezi tyto standardy se řadí způsob určení chemického složení a stanovení intersticiálních prvků. Stanovení intersticiálních prvků je důležité zejména u reaktivních kovů a slitin, zároveň je však nutné kontrolovat množství škodlivých prvků při opakované recyklaci prášku po procesu tisku. Značný vliv na výsledné vlastnosti může mít u některých materiálů přítomnost nadměrného množství kyslíku, vodíku nebo dusíku. Druhou skupinou jsou standardy vyvinuté pro použití ve spojení s práškovými materiály.

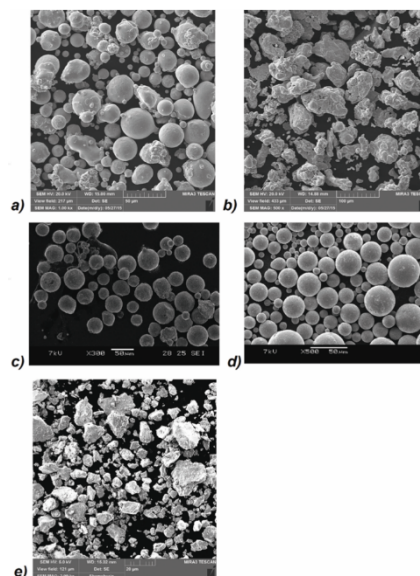
Tyto standardy zahrnují metody pro vyhodnocení vlastností práškových materiálů jako např.:

- distribuce velikosti částic
- síťová analýza
- tekutost
- hustota
- porozita
- tvar částic

Distribuce velikosti částic – jedná se o jednu z nejdůležitějších vlastností práškových materiálů pro použití v aditivních technologiích. Doporučení týkající se velikosti částic pro dané aditivní zařízení vydává výrobce tohoto zařízení. Systém měření distribuce velikosti částic je založen na měření pomocí laserové difrakce a v protokolu tohoto měření se zpravidla vyskytuje graf zahrnující hodnoty velikosti částic a jejich objemu. Základní charakteristiky jsou D_{10} , D_{50} a D_{90} , což znamená, že objem 10, 50 a 90 % částic má velikost menší než příslušná hodnota.

Sítová analýza – je využívána pro změnu distribuce velikosti částic, např. pro oddělení velkých částic. Zařízení pro sítovou analýzu je složeno z několika sít vyrovnaných ve sloupci nad sebou. Tato síta jsou tvořena buď hustou mřížkou z drátů, nebo tkaninou. Tímto způsobem je možné upravit distribuci velikosti částic tak, aby vyhovovala požadavkům a doporučením výrobce aditivního zařízení.

Tekutost – je důležitou vlastností práškového materiálu, která přímo ovlivňuje kvalitu nanášené vrstvy prášku a zásobování aditivního systému práškem. Hlavní parametry, které mají vliv na tekutost, je distribuce velikosti částic, hustota kovu, tvar částic, morfologie ploch a vlhkost. Velmi jemné prášky (menší než 10 μm) mají zpravidla velmi špatnou tekutost. Naopak prášky s větší velikostí částic mají tekutost velmi dobrou. Hustota kovu má také zásadní vliv, vzhledem k principu měření tekutosti, kdy se měří čas tečení 50 g prášku přes nálevku s 2,5mm otvorem. Pokud tedy bude mít materiál větší hustotu, tak bude téci rychleji. Práškové částice sférického tvaru mají lepší schopnost tečení než částice nepravidelného tvaru, protože nemají tendenci do sebe navzájem zaklesnout. Vlhkost způsobuje lepení jednotlivých částic k sobě a vede ke zhoršené schopnosti tečení.

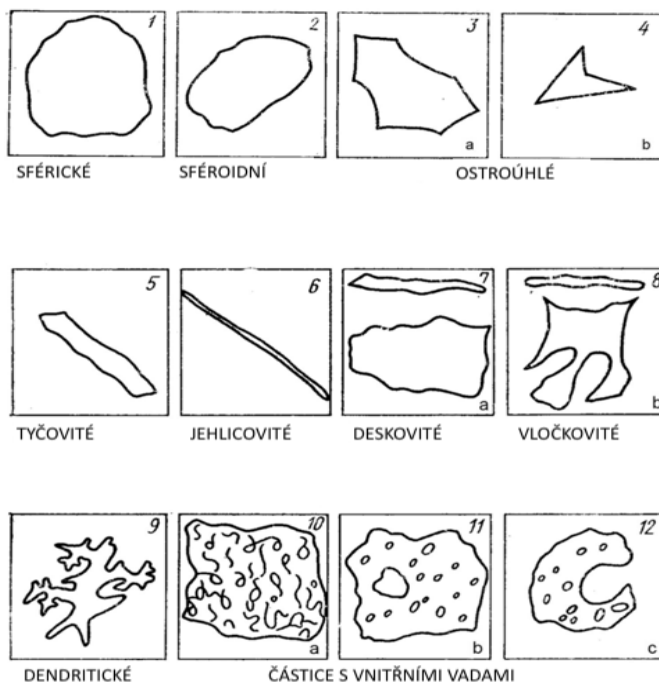


Obr.17: Snímky práškových materiálů z elektronového mikroskopu. a) plynem ionizovaný In718; b) chemicky reduované železo; c) plynem atomizovaný Ti-6Al-4V; d) plasmou atomizovaný Ti-6Al-4V; e) mechanicky legovaný Fe-18Cr-8Ni-12Mn-N.[45]

Hustota – z pohledu hustoty se u práškových kovů definuje tzv. zdánlivá a setřesná hustota. Tyto hustoty jsou užitečné při vyhodnocování vlastností různých dávek prášků. Zdánlivá hustota se u volně tekoucích prášků vyhodnocuje pomocí kalibrované nálevky, tzv. Hallova průtokoměru. Pro prášky, které nemají schopnost vol-

ného tečení se používá metoda Carneyho průtokoměru a pro prášky, které nelze vyhodnotit ani jednou z těchto metod se používá tzv. Scottův aparát. Pro vyhodnocení setřesné hustoty se využívá odměrný válec se stupnicí, který je naplněn práškem. Tento válec s práškem je následně sklepáván vůči pevné podložce. Frekvence úderů o podložku je mezi 100–300 úderů/min a mezera, která vzniká mezi odměrným válcem a pevnou podložkou by měla být 3 mm. Sklepávání se ukončuje ve chvíli, kdy nedochází ke změně objemu prášku vlivem sklepávání a přechází se k vyhodnocení setřesné hustoty. Setřesná hustota je podíl hmotnosti prášku vůči jeho objemu. [73][74]

Tvar částic – doposud není publikován žádný mezinárodní standard, který by popisoval způsob měření tvaru částic, ale pro tento účel existují např. americké nebo ruské národní normy – viz Obr. 18. Vyhodnocení tvaru částic se provádí pomocí optického mikroskopu, nicméně lépe vypovídající výsledky je možné získat pomocí skenování elektronovým mikroskopem – viz Obr. 17. Tvar částic úzce souvisí se způsobem výroby práškového materiálu. Sférické a sféroidické tvary se získávají nejčastěji pomocí atomizačních technologií. Tvary s ostrými hranami jsou nejčastěji produktem mechanického mletí a legování. Zbylé tvary jsou produktem elektrolyzy a dalších chemických procesů. [45][46]



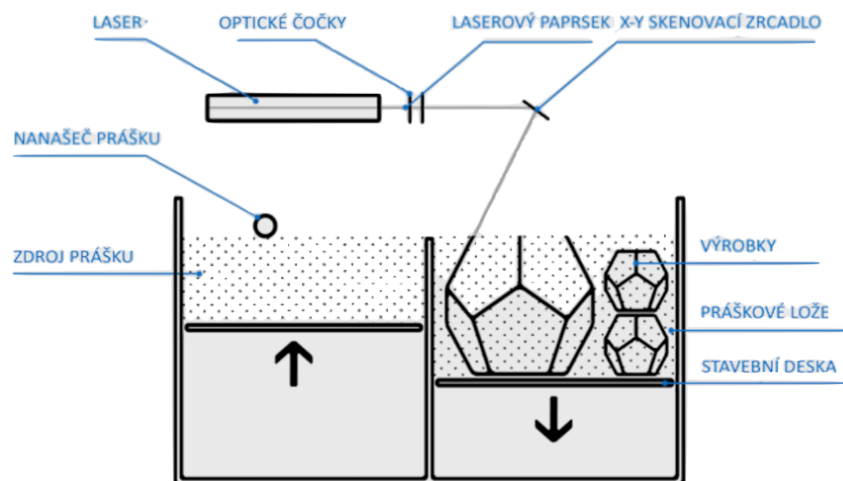
Obr.18: Tvar částic dle normy GOST 25849.[45]

3 Vývojové trendy v oblasti 3D tisku kovů

3.1 SLS, DMLS, SLM, DMLM (LaserCUSING)

Metody založené na principu technologie SLS jsou nejstaršími technologiemi spékání práškových materiálů, které jsou ve velkém používány i v dnešní době. Na jejich principu (viz Obr. 19) v současnosti funguje naprostá většina průmyslově využívaných aditivních výrobních zařízení po celém světě. Ačkoliv jsou tyto technologie na trhu více než 20 let, jejich vývoj není zdaleka u konce. Naopak je zde spousta prostoru pro vylepšení na všech úrovních.

- SLS – selective laser sintering – selektivní laserové spékání
- DMLS – direct metal laser sintering – přímé kovové laserové spékání
- SLM – selective laser melting – selektivní laserové tavení
- DMLM – direct metal laser melting – přímé kovové laserové tavení



Obr.19: Princip technologií SLS, DMLS, SLM, DMLM.[47]

Proces stavby u těchto technologií spočívá ve spojování práškových částic pomocí soustředěného paprsku laseru. Technologie SLS se nejčastěji spojuje s nekovovými materiály (typickými jsou nylon a polyamid), ale i kovové a keramické materiály nejsou výjimkou. Z technologie SLS vychází zbylé tři, které pracují na stejném principu.

Technologie SLM využívá naprosto totožný koncept, jejich rozdíl je pouze v technických detailech. Konkrétně u technologie SLM je práškový materiál pomocí laserového záření zcela roztaven, čímž vzniká homogenní materiál s nízkou porozitou a odlišnou krystalickou strukturou oproti technologii SLS, u které je práškový materiál pouze nataven a slinován dohromady. V dnešní době jsou výrobní zařízení pracující s těmito dvěma technologiemi schopny materiál jak tavit, tak pouze natavit v závislosti na nastavení, takže rozdíl mezi nimi téměř vymizel.[48]

Co se týče technologií DMLS a DMLM, opět se jedná o téměř totožné technologie, které vycházejí ze dvou výše zmíněných. Rozdílem je pouze optimalizace procesu stavby pro kovové materiály. První metoda má za cíl při stavbě pouze slinovat práškové částice a druhá je zcela taví. Tyto rozdíly jsou dnes taktéž setřeny, jelikož obě technologie zvládají jak natavení, tak úplné roztavení kovového materiálu.

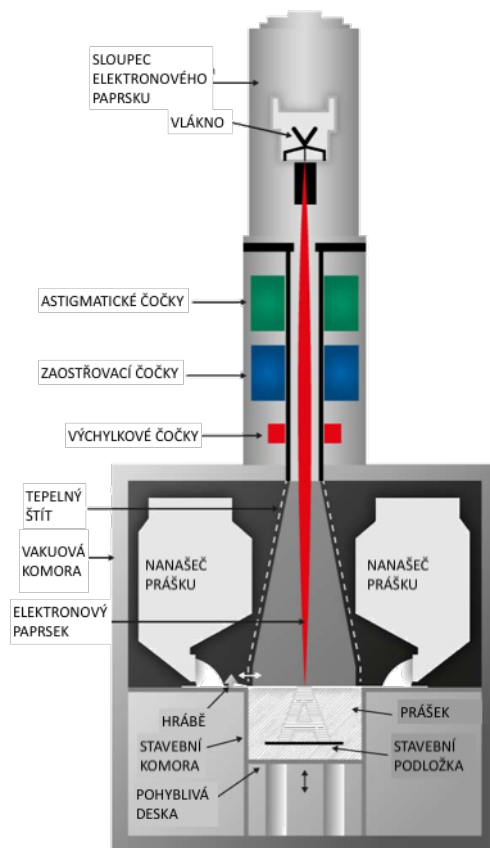
Technologie zabývající se spékáním práškových částic pomocí laseru mají v dnešní době stále spoustu prostoru pro vylepšení. Společnosti vyrábějící tato zařízení usilují o zlepšení celé řady vlastností a parametrů, čímž by získaly nespornou konkurenční výhodu. Největším problémem systémů pracujících s práškovým lože je malá velikost tiskového prostoru. Ačkoliv by nebylo velkým problémem prostor zvětšit, zásadní problém tkví v tom, že tento prostor musí být při procesu stavby zcela zaplněn práškem, který je vysoce nákladný, a především je nutné ho po každé dokončené stavbě zcela odstranit a zrecyklovat, což může být velmi časově náročné. Společnost Concept Laser má ve svém portfoliu aditivních zařízení tiskárnu s tiskovým prostorem o objemu 160 dm³, která v současnosti na trhu tímto parametrem dominuje. Dalšími oblastmi, ve kterých je stále dostatek prostoru pro vývoj, je např. využívání většího počtu laserových paprsků simultánně spékajících práškové částice, plynové hospodářství, bezpečnost tisku a kontrola tavného procesu.

Mezi nejrozšířenější zařízení na laserové spékání a tavení práškového kovu se řadí tiskárny od společností:

- Concept Laser
 - **Mlab cusing** (tiskový prostor 50(x) x 50(y) x 80(z))
 - **M2 cusing** (tiskový prostor 250(x) x 250(y) x 350(z))
 - **X LINE 2000R** (tiskový prostor 800(x) x 400 (y) x 500 (z))[3]
- EOS
 - **M 100** (tiskový prostor válec Ø100 x 95(z))
 - **M 400-4** (tiskový prostor 400(x) x 400(y) x 400(z))[4]
- 3D Systems
 - **DMP Dental 100** (tiskový prostor 100(x) x 100(y) x 80(z))
 - **DMP Factory 500** (tiskový prostor 500(x) x 500(y) x 500(z))[5]
- Renishaw
 - **AM 250** (tiskový prostor 250(x) x 250(y) x 300(z))
 - **RenAM 500Q** (tiskový prostor 250(x) x 250(y) x 350(z))[6]
- DMG MORI
 - **LASERTEC 12** (tiskový prostor 125(x) x 125(y) x 200(z))
 - **LASERTEC 30** (tiskový prostor 300(x) x 300 (y) x 300(z))[7]
- SLM Solution
 - **SLM 125** (tiskový prostor 125(x) x 125(y) x 125(z))
 - **SLM 500** (tiskový prostor 500(x) x 280(y) x 365(z)) [8]
- Trumpf
 - **TruPrint 1000** (tiskový prostor válec Ø100 x 100(z))
 - **TruPrint 5000** (tiskový prostor válec Ø300 x 400(z)) [9]

3.2 EBM

Jedná se o inovativní aditivní technologii, při které dochází k tavení kovového prášku nebo drátu pomocí koncentrovaného svazku elektronů. Tyto elektrony vznikají pomocí extrémně rozžhavené elektrody, která vytváří mrak elektronů urychlených zhruba na polovinu rychlosti světla. Tyto elektrony jsou následně v soustavě magnetických polí zaostřovány na specifikované místo na tiskové ploše. Tento způsob tavení je vysoce energetický a tavení probíhá při velmi vysoké teplotě, která dosahuje téměř 2000 °C. Schéma je na Obr. 20. Na obdobném principu funguje i technologie EBF, která místo práškového lože využívá dávkování materiálu ve formě drátu.



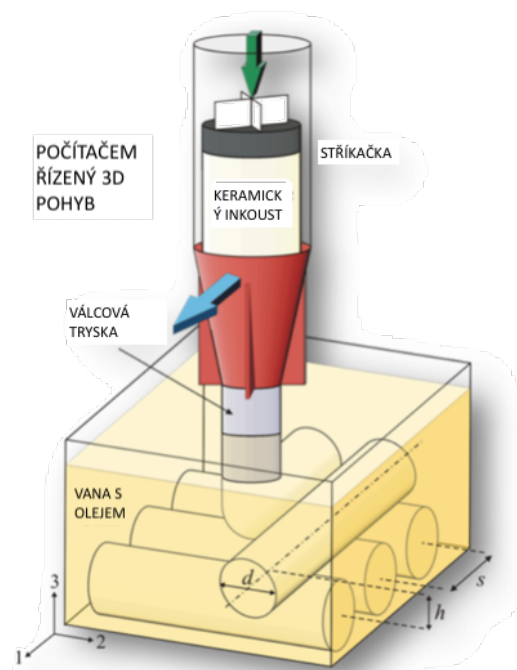
Obr.20: Princip funkce technologie EBM.[49]

Výroba probíhá v komoře, ve které se nachází vakuum, které zajišťuje, že nedochází k oxidaci vysoce reaktivních materiálů, jako je např. titan. Zároveň vakuum zajišťuje ideální prostředí pro průchod elektronů prostorem, které by v jiném případě byly zpomalovány nebo zcela zastaveny molekulami plynu. Technologie EBM je novým způsobem spojování práškových částic, který se rozmohl v sektoru aerospace, medicíny a automobilovém a petrochemickém sektoru. [49]

3.3 Robocasting

Tato metoda se někdy také nazývá jako Direct Ink Writing (DIW) nebo méně často jako Direct-Write Assembly (DWA). Jedná se o aditivní technologii založenou

na přímé extruzi inkoustové suspenze do tiskového prostoru, který je zaplněn parafinovým olejem (Obr. 21). Ten je použit pro minimalizování nerovnoměrného schnutí výtisku. Místo tohoto oleje se někdy také používá pouze prostředí s velmi vysokou vlhkostí, nicméně tisk v normální atmosféře je také možný a v některých případech i preferované tiskové prostředí. Tato technologie našla díky své jednoduchosti speciální uplatnění zejména při aditivní výrobě keramických materiálů. Technologie byla vyvinuta jako metoda pro volné formování objektů s nízko-pojivovou suspenzí.



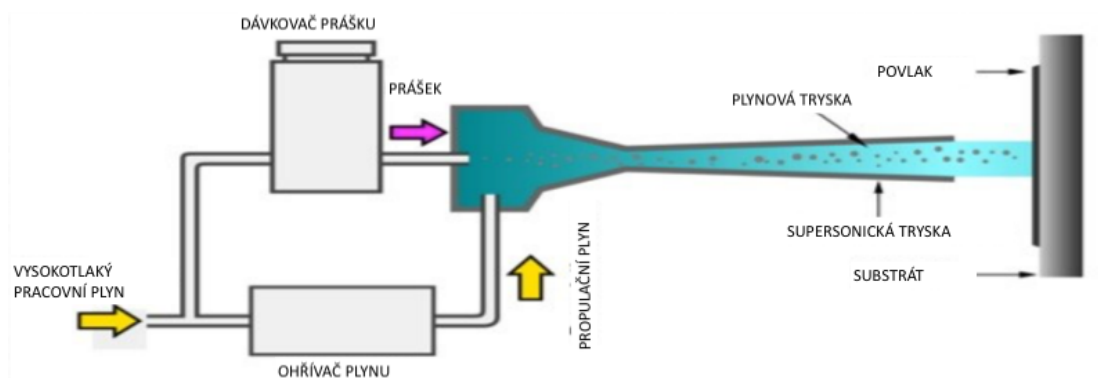
Obr.21: Princip funkce technologie robotic casting.[54]

Metoda se skládá z depozice vysoce koncentrované (~35–50 obj. %) suspenze keramických prášků ve vodě, která je schopna podporovat vlastní hmotnost během procesu stavby díky jejímu složení a viskoelastickým vlastnostem. Hlavním rozdílem je chování po depozici, kdy se tato suspenze chová jako tuhá a nezávisí na tuhnutí nebo schnutí materiálu jako u ostatních technologií. Po dokončení se výtisk nechá schnout 24 hodin a následně je tepelně zpracováván dle požadavků u konkrétní keramické suspenze.

Chybějící práškové lože je hlavní výhodou této technologie, která umožňuje stavbu 3D objektů s minimálním množstvím odpadového materiálu. Zároveň není nutností zařazování dalších technologických procesů pro recyklaci zbytkového materiálu. Tento fakt je výhodný při tisku vzácných nebo drahých materiálů. Při stavbě komplexních modelů se využívá podpor z materiálů založených na grafitu, které je možné bezpečně odstranit pomocí tepelného zpracování při 800 °C, tedy bezpečně pod teplotou slinování keramického materiálu. [53][61]

3.4 Cold-Spray Metal Printing

Metoda sloužící k nanášení vrstev cermetů, kovových, polymerních nebo keramických materiálů na substrát, který může být kovový, polymerní, kompozitový nebo keramický. Při této metodě dochází k urychlení nanášených částic a jejich vystřelování na základní materiál, kde se za relativně nízké teploty, díky vysoké kinetické energii, zachytí. Proces (viz Obr. 22) vyžaduje zahřívání stlačeného plynu (typicky dusík nebo vzduch), který funguje jako nosič a který je veden skrze supersonickou trysku, v níž dochází k urychlení proudu plynu díky jeho rychlé expanzi. Nástřikový materiál je ve formě prášku přiváděn do tohoto proudu, v němž je usměrněn na požadovanou rychlost a vystřelován vůči základnímu materiálu.



Obr.22: Princip funkce technologie Cold Spray.[56]

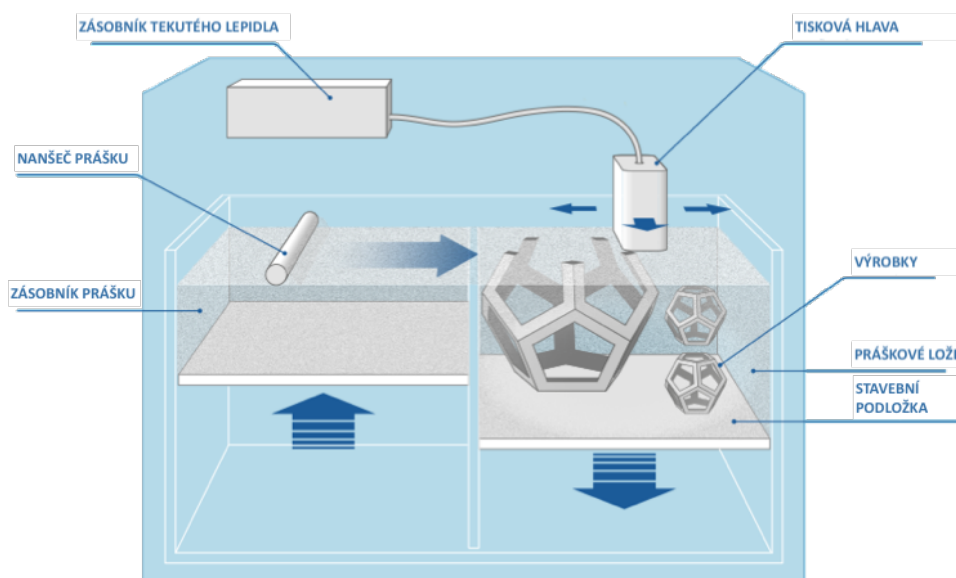
V závislosti na teplotě procesu každý materiál vyžaduje specifickou minimální rychlost částic, aby se úspěšně vytvořilo pevné spojení mezi základním materiálem a nástřikovým práškem. Toto spojení je také závislé na schopnosti materiálu se dostatečně plasticky přetvořit při dopadu.

Technologie byla vyvinuta zejména pro aplikace, ve kterých je nutné se vyvarovat vysokým teplotám, jako je např.:

- rozměrová obnova ložiskových ploch pro lodní, lokomotivové a zemní stroje
- oprava zkorodovaných povrchů hořčíku (komponenty pro obchodní a vojenská letadla)
- obnovení povrchů při korozním poškození v nukleárních reaktorech[55][56]

3.5 Binder Jetting

Tato metoda je také známá jako Inkjet 3D Printing nebo v dnešní době velmi diskutované řešení HP Metal Jet. Využívá se pro stavbu modelu pomocí dvou druhů materiálů. Prvním je práškový materiál a druhým pojivo, které je zpravidla v kapalně formě. Tisková hlava pomocí trysky s tekutým pojivem spojuje jednotlivé tenké vrstvy práškových částic. Tato metoda nevyžaduje žádné podpurné struktury, jelikož při tisku nevznikají znatelné deformační síly a pnutí a součást je podpírána práškem, kterým je obklopena. Celý princip je znázorněn na Obr. 23.



Obr.23: Princip technologie Binder Jetting. [57]

Výhodou oproti ostatním metodám využívajícím práškem zaplněnou komoru je skutečnost, že první vrstva nemusí být umístěna na podložce, ale kdekoli v prostoru zaplněným práškem. Toto umožňuje téměř dokonalé využití tiskové komory, kterou lze zaplnit několika součástmi. Ty mohou být umístěny přímo nad sebou nebo v pyramidovém rozložení. Tato technologie je aplikovatelná pro širokou škálu práškových materiálů, je relativně levná, vysoce produktivní, ale produkované součásti mají bez dalšího zpracování velmi limitované mechanické vlastnosti.

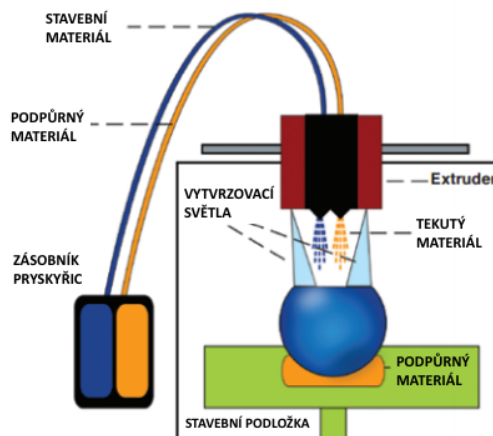
Jako následné zpracování se u této technologie využívá:

- odstranění přebytečného práškového materiálu
- infiltrace pojivem pro lepší mechanické vlastnosti a vzhled
- tepelné zpracování (u kovových prášků lze docílit výborných mechanických vlastností) [57][58]

3.6 NanoParticle Jetting

Tato technologie byla vyvinuta společností XJet a je velmi podobná technologii Binder Jetting. Principem je nastříkání kapek kovových nebo keramických nanočástic v tekuté suspenzi na stavební povrch. Tisková hlava obsahuje tisíce miniaturních trysek, kterými tato suspenze proudí a následně vytváří objekt.

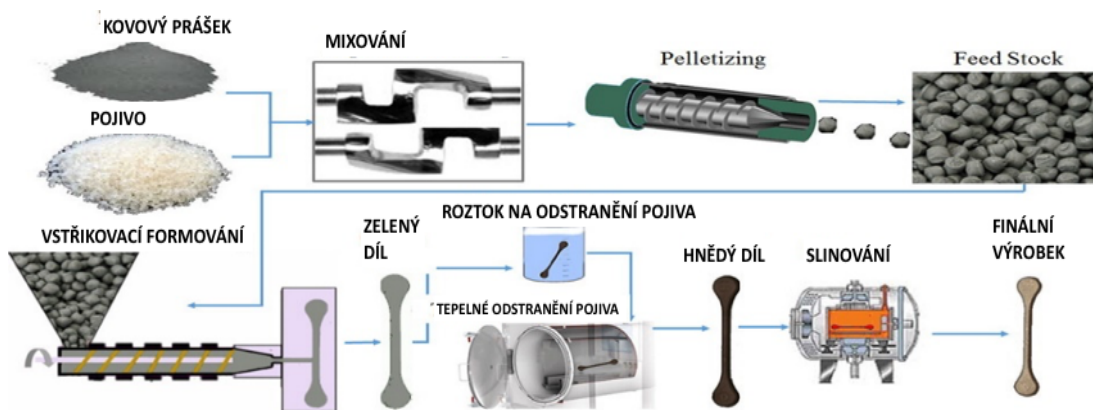
Vytvořená vrstva je velmi tenká, což umožňuje dosáhnout velmi vysokých detailů, nízké drsnosti povrchu a vysoké přesnosti. Velkou výhodou je vysoká bezpečnost procesu, jelikož veškeré používané tiskové materiály jsou dodávány v uzavřených zásobnících. Mezi další výhody se řadí například možnost spojování několika tiskových hlav dohromady, což umožňuje těmto systémům tisk více materiálů najednou nebo simultánní tisk více součástí. Velkou nevýhodou je časová náročnost, která je způsobena velmi tenkou nanášenou vrstvou a relativně pomalým pohybem tiskové hlavy. [59][60]



Obr.24: Princip technologie NanoParticle Jetting[59]

3.7 Metal Injection Molding

Proces metal injection molding (MIM) získal za posledních 20 let velkou popularitu. Pronikl do průmyslových odvětví, která byla pro jiné než zaběhlé technologie dlouho nepřístupná, jako např. zdravotní implantáty, komponenty pro letecký a vesmírný průmysl. Ve světě je přes 400 komerčních variant této technologie, které jsou nasazeny v reálných výrobních provozech. Tato technologie spočívá na tvarování směsi kovového prášku a pojiv do požadovaného tvaru a následné spojení těchto jednotlivých kovových částic za působení tepla tzv. slinováním.

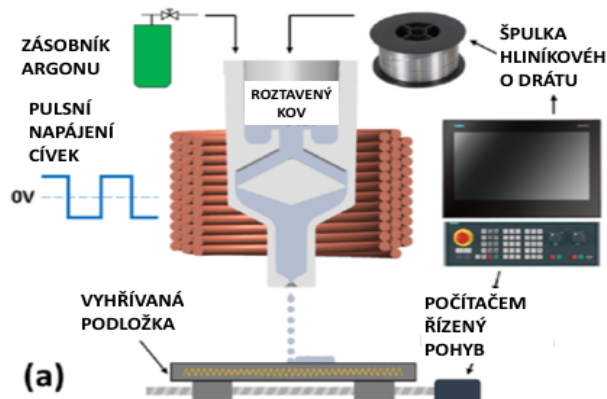


Obr.25: Metoda MIM.[51]

Schéma funkce tohoto systému je znázorněno na Obr. 25. Technologie vyniká zejména schopností výroby dílu s vyšší tvarovou komplexitou, nízkou porozitou, lepší pevností a tolerancemi v porovnání s ostatními metodami formování, jako např. slévání. Technologie je velmi podobná technologii vstřikování plastů, z níž dokázala přebrat řadu výhod, mezi které se řadí vysoká produktivita a nízká cena oproti jiným způsobům výroby.

3.8 Drop-on-Demand

Jedná se o metodu, která je založena na magnetohydrodynamickém vytváření kovových kapek a jejich následném nanášení na základní materiál. Materiál potřebný pro stavbu modelu je dodáván ve formě drátu, který je následně v tiskové hlavě taven pulsním magnetickým polem a usměrněně



Obr.26: Princip funkce technologie Drop-on-Demand.[61]

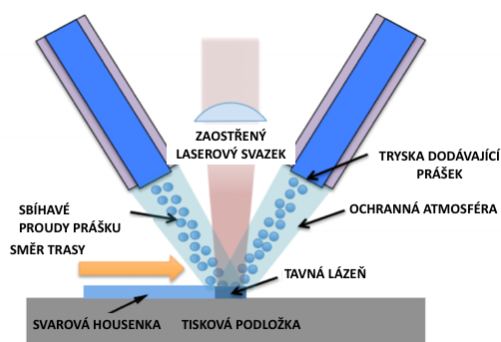
vrstven po kapkách na základní materiál. U této technologie nedochází k pohybu tiskové hlavy, ale k pohybu stolu se základním materiálem. První společností, která využila této technologie a sestrojila komerční zařízení, byla společnost Vader Systems s jejich technologií nazývanou MagnetoJet. Klíčovou součástí jejich zařízení je tisková hlava, která se skládá z komory v horní části, v níž dochází k tavení kovového drátu, a z komory s otvorem v dolní části sloužící k utváření a formování kapek.

Tyto komory jsou vyrobené ze žáruvzdorného materiálu, aby odolávaly teplotám vznikajícím při tavení drátu. Tavení materiálu je realizováno pomocí vodou chlazené cívky, která obklopuje komory. Během vývoje bylo vytvořeno několik druhů komor s odlišnou vnitřní geometrií za účelem zjištění vlivu na dynamiku utvářených kapek. Průměr dopadajících kapek je od 50 do 500 μm a frekvence vypuzování kapek v rozmezí 40 až 1000 Hz. Hlavní výhodou je vysoká produktivita, nízká porozita a homogenní struktura, nicméně rozměrová přesnost a povrchová drsnost je velmi špatná; funkční plochy součástí je nutno dodatečně upravovat. [61]

3.9 Directed Energy Deposition

Jedná se o aditivní výrobní proces, při kterém dochází k tavení materiálu pomocí zaostřeného proudu laserového nebo elektronového paprsku. Stavební materiál

v podobě kovového prášku je do místa tavení dodáván pomocí plynného nosiče. Princip technologie je vyobrazen na Obr. 27. Samotná technologie funguje na tom principu, že na základním materiálu dojde k vytvoření tavné lázně pomocí laseru a prostřednictvím trysky se do místa natavení nanese práškový kov. Dojde tak k jejich pevnému svaření.



Obr.27: Princip technologie Directed Energy Deposition. [63]

Celý proces natavení se odehrává v ochranné atmosféře, nejčastěji argonu. Tímto způsobem lze nanášet vrstvy na již vyrobené díly nebo vytvářet celé díly od nuly. Hlavní uplatnění tato technologie nachází v oborech jako je letectví a kosmonautika, energetika, petrochemie, automobilový průmysl a medicína. Technologii lze mimo aditivní výrobu využívat pro vytváření povlaků se speciálními vlastnostmi, pro opravování součástí, které by jinak bylo nutné vyřadit, nebo pro svařování různých druhů kovů.

Mezi metody pracující na podobném principu se řadí i následující:

- Laser Engineering Net Shape
- Direct Metal Deposition
- Laser Metal Deposition

Tyto metody se mohou mírně lišit konstrukcí, případně druhem využívaného parysku k tavení dodávaného materiálu. [62][63]

3.10 Desktop Metal

Technologie od společnosti Desktop Metal je jednou z nejnovějších, jejich sestava zařízení nazývaná Studio System+ funguje na principu FDM tisku, tedy vytlačování materiálu ve formě roztaveného drátu. V tomto případě se ovšem nejedná o plastový

filament, ale o směs kovového prášku a pojiva ve formě pasty, která je protlačována přes trysku. Tento způsob umožňuje bezpečný tisk v prostředí kanceláře, jelikož veškerý prášek je vázaný v nosiči a nehrozí jeho únik do okolní atmosféry.

V současnosti společnost nabízí 6 materiálů, které lze v jejím systému využívat:

- 17-4 PH – nerezová ocel s vysokou pevností a korozní odolností
- AISI 4140 – nízkolegovaná ocel s vysokou pevností a houževnatostí
- H13 – nástrojová ocel s vysokou tvrdostí a otěruvzdorností za zvýšených teplot
- 316 L – nerezová ocel s vysokou korozivzdorností za zvýšených teplot
- měď – využití pro její tepelnou a elektrickou vodivost
- slitina 625 – superslitina s vysokou pevností a korozní odolností za vysokých teplot

Nespornou výhodou je tisk za studena, při kterém nevzniká téměř žádné pnutí, a díly tedy nejsou během tisku namáhány silami, které vznikají například u systému pro spékání kovového prášku.

Celý systém se skládá ze tří zařízení:

- tiskárna
- debinder – slouží k odstranění základního pojiva a přípravu součásti pro slinování
- pec – slouží pro slinování hotových a vymytých součástí [68]

3.11 MOVINGLight Metal DLP Printing

Ve své podstatě se jedná o metodu využívající principu DLP tiskáren, ale místo tekutého polymeru se v tiskárně využívá pasta s práškovými částicemi kovů, kterou lze vytvrdit UV zářením. Tuto technologii představila společnost Prodways, která ve svém zařízení V6000 využívá až dva DLP projektory, které vytvrzují pryskyřici nebo pastu. Zachování principu DLP tiskáren a adaptace na keramické a kovové materiály

umožňuje výrobu velkoobjemných součástí s relativně vysokou rychlostí, rozměrovou přesností a nízkou povrchovou drsností.

Nutným požadavkem pro kovové a keramické součásti je následná tepelná úprava, při které dojde k vypálení organického pojiva a ke slinování práškových částic. Výsledkem je součást s nízkou porozitou a vysokou tvarovou a rozměrovou přesností, která je dána technologií DLP. V současnosti je možné tisknout touto metodou titan a Inconel, ale do budoucna se předpokládá, že bude možné tisknout i z mědi, kobaltchromu a oceli. Výsledná dosahovaná hustota kovových částic ve výtisku je kolem 90 %. [64]

3.12 Demcon

Technologie od společnosti Demcon z Holandska funguje na principu precizního dávkování roztaveného kovu. Princip je podobný technologii inkoustových tiskáren s tím rozdílem, že místo inkoustu jsou v tiskárně zásobníky roztaveného kovu. Tiskárna má 4 trysky schopné dávkovat roztavený kov čtyř různých kovových materiálů. Přesné a přesně načasované dávkování kovu je tou nejsložitější částí celého procesu. Dávkování kovu je realizována elektromagnetickými silami. Celý systém se pyšní přesností kolem 5 μm , ovšem je teprve v raných fázích vývoje, takže zatím není příliš mnoho dostupných informací. [71]

3.13 Ultrasonic Particle Manipulation

Pro součásti, u kterých není možné kontaktní přenášení stavebního materiálu, byla vyvinuta právě tato technologie. Díky ní je možný zcela nový způsob manipulace s malými částicemi. Využívají se zde ultrazvukové vlny k vytvoření vlnového pole s rozdílnými akustickými tlakovými profily, ve kterých může být zachycena a přemístována částice. Zpravidla jsou částice zachyceny v oblastech s nízkým akustickým tlakem. Jedná se tedy o bezkontaktní metodu přenášení velmi malých částic

s rozdílnými mechanickými vlastnostmi, tvary a rozměry. Zpravidla se jedná o částice o rozměrech menších než jeden milimetr.

Oproti jiným metodám bezkontaktního přenášení, jako je např. magnetická nebo elektrostatická metoda, která je vhodná pouze pro magnetické materiály a materiály ovlivnitelné elektrostatickým polem, je tato metoda vhodná pro většinu materiálů bez ohledu na jejich skupenství nebo druh. Lze tedy přenášet polymery, kovy, keramiku nebo kapaliny. S rostoucí frekvencí ultrazvukového pole se zvyšuje přesnost manipulace částic. Tato technologie je v raných fázích vývoje a její skutečný potenciál se ukáže až v budoucnu.[65]

4 Vliv parametrů technologie tisku DMLS/SLM na výsledné vlastnosti produktu

Samotná aditivní výroba technologií DMLS nebo SLM je téměř totožná (viz kapitola 3); na kvalitu výroby těmito technologiemi má vliv nejen přesnost zařízení pro aditivní výrobu, kvalita nebo druh používaného materiálu, případně druh použité ochranné atmosféry, ale zejména schopnost entity, která celý aditivní výrobní proces a s ním související náležitosti připravuje. Záleží na správném a logickém umístění součástí na stavební desce, orientaci jednotlivých dílů v prostoru, správně dimenzovaných podpůrných konstrukcích a v neposlední řadě nastavení vhodných tiskových parametrů.

Mezi hlavní ovlivnitelné tiskové parametry se řadí následující:

- tloušťka vrstvy prášku
- výkon laseru
- skenovací rychlost
- rozteč šrafování
- průměr laserového paprsku

Často se mezi těmito parametry uvádí také energetická hustota, ale ta je ve skutečnosti funkcí těchto parametrů. Tyto parametry mají přímý vliv na výsledné vlastnosti produktu, jako jsou např.:

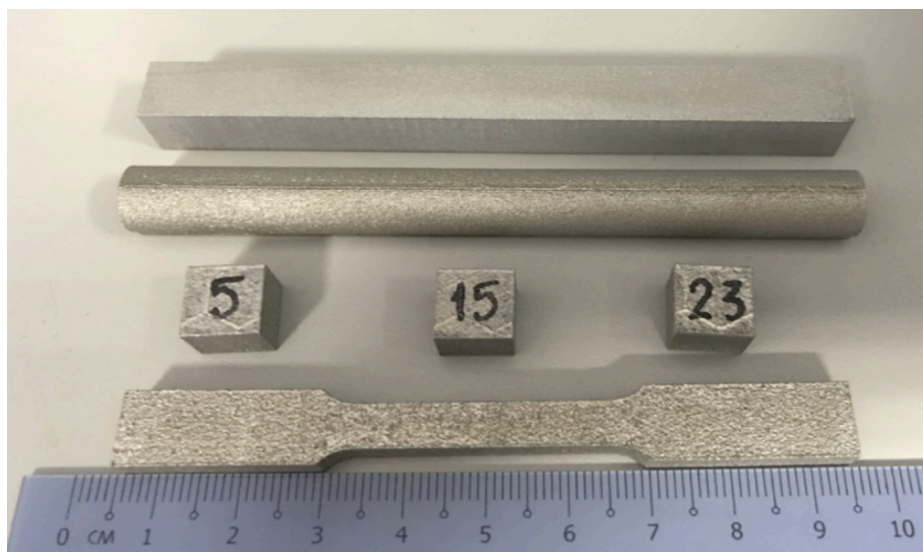
- rozměry
- geometrie
- mechanické vlastnosti
- únavové vlastnosti
- mikrostrukturu
- kvalita povrchu

4.1 Tloušťka vrstvy prášku

Dosažení vysoké rozměrové a geometrické přesnosti, dobrých mechanických vlastností a kvalitního povrchu součásti při výrobě pomocí metody SLM s minimálním množstvím dodatečného zpracování je v aditivní výrobě klíčové. O to více pokud se jedná o těžko obrobitelné materiály, kterým je například Inconel 718.

Na základě studie aditivně vyráběných vzorků z Inconelu 718 při použití různých tlouštěk vrstev prášku (20, 30, 40 a 50 μm) vyplynulo, že čím menší je tloušťka vrstvy prášku, tím přesnější jsou rozměry a geometrie výsledné součásti. Tím větší je i jejich relativní hustota. Značně lepší mechanické vlastnosti a mikrotvrdoost byly taktéž dosaženy při použití menších tlouštěk vrstev prášků.

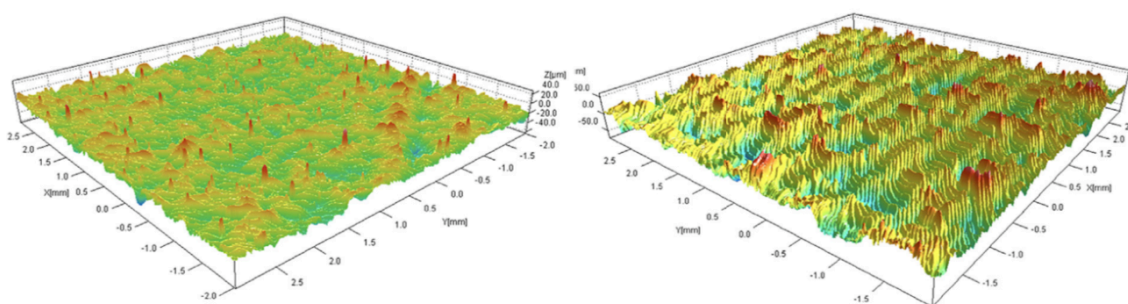
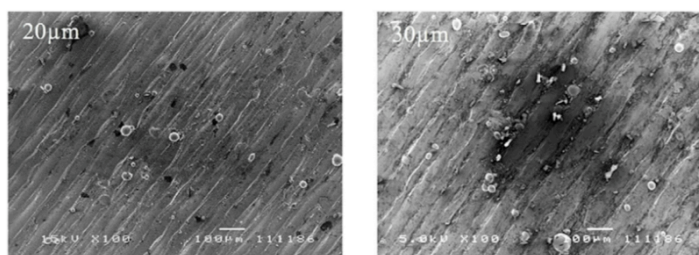
Na aditivním výrobním systému ProX-300 od 3D Systems bylo vytištěno několik zkušebních těles viz Obr. 28. Byly použity standardní parametry tisku pro hexagonální skenovací strategii pro všechny výše zmíněné tloušťky vrstev prášků. Na těchto vzorcích byla následně provedena rozměrová kontrola s výsledky uvedenými v Tabulka 1 a kontrola drsnosti povrchu na Obr. 29.



Obr.28: Vytištěné vzorky z Inconelu 718. [67]

Tabulka 1: Výsledné rozměry vzorků v závislosti na tloušťce vrstvy. [67]

tloušťka vrstvy	kvádr [mm]			tyč [mm]	
	X	Y	Z	průměr	délka
20 μm	90,01±0,02	10,02±0,02	6,09±0,02	10,02±0,01	90,09±0,05
30 μm	90,03±0,02	10,03±0,03	6,10±0,03	10,03±0,02	90,11±0,04
40 μm	90,04±0,02	10,04±0,03	6,12±0,03	10,04±0,02	90,10±0,05
50 μm	90,06±0,04	10,07±0,05	6,12±0,05	10,05±0,03	90,12±0,06



Obr.29: Drsnost povrchu pro tloušťku vrstvy 20 (vlevo) a 30 μm (vpravo).[67]

Jak je z výsledků patrné, tak s menší tloušťkou vrstvy prášku je dosahováno vyšší rozměrové přesnosti. Tento trend platí jak u kvádrů, tak i u tyče. Výsledky týkající se drsnosti povrchu ukazují také to, že drsnost povrchu roste s tloušťkou vrstvy prášku.

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti součástí vytištěných horizontálně v závislosti na tloušťce vrstvy.[67]

tloušťka vrstvy	mikrotvrdost [HV]	modul pružnosti [GPa]	mez kluzu $\sigma_{0,2}$ [MPa]	mez pevnosti v tahu [MPa]	relativní prodloužení [%]
20 μm	339±16	203±16	767±12	1074±15	26,5±2,6
30 μm	331±18	191±18	752±20	1069±25	27,1±1,8
40 μm	322±12	180±16	741±24	1062±27	28,6±1,3
50 μm	311±5	172±15	732±15	1050±15	26,8±2,3

Výška vrstvy prášku má velký vliv na mechanické vlastnosti. Z hodnot je patrné, že s rostoucí tloušťkou vrstvy poměrně významně klesá mikrotvrdost, modul pružnosti, mez kluzu i mez pevnosti v tahu. Hodnoty relativního prodloužení jsou při použití různých tlouštěk prášku na podobných hodnotách. [67]

Další studie popisuje vliv tloušťky vrstvy prášku také u materiálu Inconel 718 na mechanické vlastnosti. Na základě výzkumu bylo u tohoto materiálu zjištěno, že použití 30 μ m vrstvy prášku může mít za následek vyšší pevnost a menší prodloužení, než při použití vrstvy o tloušťce 50 μ m. Tento pokus byl prováděn na aditivním výrobním zařízení SLM 280HL od společnosti SLM Solutions. Pro tento test bylo vyrobeno celkem 9 vzorků za použití níže uvedených parametrů a s výslednými relativními hustotami (viz tabulka níže).

Tabulka 3: Relativní hustota vzorků v závislosti na výrobních parametrech.[66]

číslo vzorku	výkon laseru [W]	rychlost laseru [mm/s]	rozeč šrafování [μ m]	relativní hustota, dle Archimedovy metody [%]	relativní hustota, metalografickou metodou [%]
1	155	540	120	99,54	99,84
2	155	540	160	99,53	99,92
3	155	680	120	99,56	99,14
4	155	680	160	98,92	96,55
5	175	610	140	99,94	99,16
6	195	540	120	99,49	96,81
7	195	540	160	99,58	96,4
8	195	680	120	99,46	94,75
9	195	680	160	99,4	97,33

Na základě výsledků byly pro testování vlivu výšky vrstvy prášku na výsledné vlastnosti zvoleny parametry tisku, které byly použity u vzorku 5. Ten má nejvyšší relativní hustotu dle Archimedovy metody a třetí nejvyšší dle metalografické metody.

Tabulka 4: Výsledky zkoušky tahem Inconelu 718.[66]

tloušťka vrstvy	vzorek	mez kluzu $\sigma_{0,2}$ [MPa]	mezí napětí σ_B [MPa]	relativní prodloužení [%]
50 μ m	horizontální	646	1049	27,2
	vertikální	609	949	31,7

30 μm	horizontální	807	1051	21,9
	vertikální	675	957	27,7

Jak lze vidět v Tabulka 4, vzorky vyrobené za použití vrstvy o tloušťce 30 μm dosahují vyšší pevnosti a nižší plasticity než vzorky vyrobené při použití vrstvy 50 μm . Zároveň bylo prokázáno, že vzorky vyrobené v horizontální poloze dosahují lepších pevnostních charakteristik a nižší plasticity než vzorky vyrobené ve vertikální poloze.

Tabulka 5: Výsledky zkoušky rázem Inconelu 718.[66]

tloušťka vrstvy	vzorek	nárazová síla [J/cm ²] Charpy V-zářez
50 μm	horizontální	59,6
30 μm	horizontální	83,8

V Tabulka 5 jsou uvedeny výsledky ze zkoušky rázem, ze kterých lze vyčíst, že vzorek vyráběný s použitím vrstvy o tloušťce 30 μm dosahuje vyšší hodnoty nárazové síly. [66]

4.2 Výkon laseru, skenovací rychlost, rozteč šrafování

Jedna z dalších studií se zabývala vlivem tiskových parametrů na výsledné vlastnosti u Al slitin. Konkrétně se zabývala hustotou, povrchovou topologií a rozměrovou přesností u slitiny materiálu AlSi10Mg v závislosti na výkonu laseru, skenovací rychlosti a rozteči šrafování. Cílem této studie bylo zjištění limitů technologie SLM při výrobě součástí z výše zmíněné hliníkové slitiny pro použití v leteckém a kosmickém průmyslu.[69]

4.2.1 Parametry tisku

Pro vzorky ze slitiny AlSi10Mg byly zvoleny tiskové parametry viz Tabulka 6.

Tabulka 6: Tiskové parametry SLM procesu pro slitinu AlSi10Mg.[69]

číslo vzorku	výkon laseru [W]	rychlost laseru [mm/s]	rozteč šrafování [mm]	energetická hustota [J/mm ³]
AS1	370	1000	0,19	65
AS2	370	1300	0,15	63,2

AS3	370	1300	0,19	50
AS4	350	1300	0,19	47,2
AS5	370	1500	0,19	43,3
AS6	300	1300	0,19	40,5
AS7	370	1300	0,25	38
AS8	200	1300	0,19	27

4.2.2 Rozložení velikosti částic

U použitého prášku slitiny AlSi10Mg byla provedena charakteristika vlastností, při které bylo zjištěno chemické složení (Tabulka 7) a distribuce velikosti částic (Tabulka 8).

Tabulka 7: Zastoupení chemických prvků v jednotlivých Al slitinách.[69]

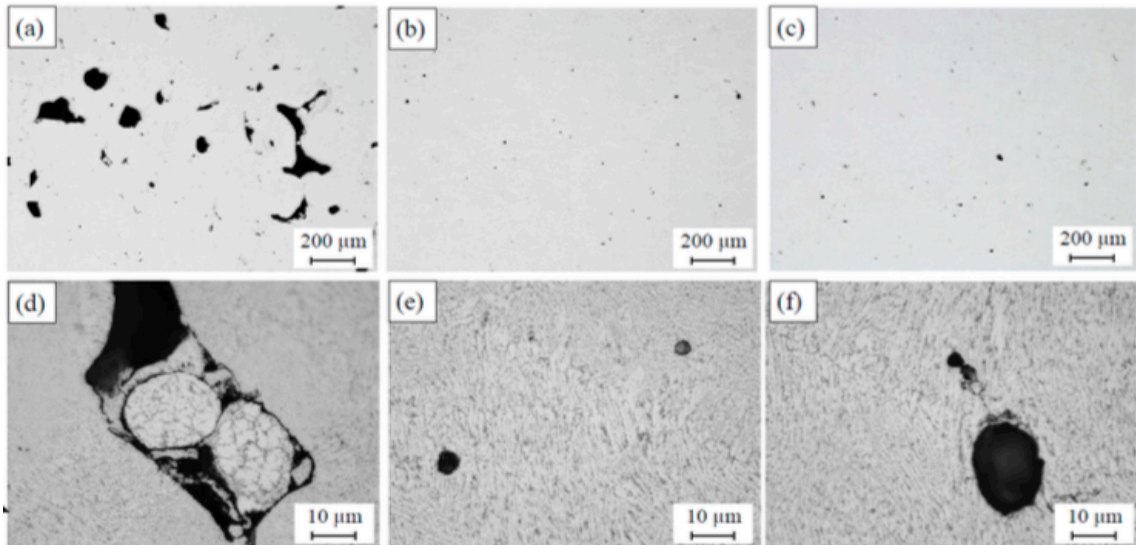
hm. [%]	Si	Mg	Cu	Fe
AlSi10Mg	11,34	0,28	0,08	0,32

Tabulka 8: Hodnoty rozložení velikosti práškových částic.[69]

průměr [μm]	D (0,1)	D (0,5)	D (0,9)
AlSi10Mg	23,16	39,62	66,55

4.2.3 Relativní hustota

Snímky na Obr. 30 ukazují vliv hustoty energie na výskyt pórů uvnitř součásti tištěné z prášku slitiny AlSi10Mg. Z výsledků je patrné, že hustota energie 27 J/mm³ u vzorku AS8 může způsobit značnou porozitu z důvodu nízkého stupně natavení práškových částic což je viditelné na Obr. 30d, kde se vyskytují téměř neroztavené práškové částice. Při zvýšení energetické hustoty nad 50 J/mm³ porozita téměř vymizela.

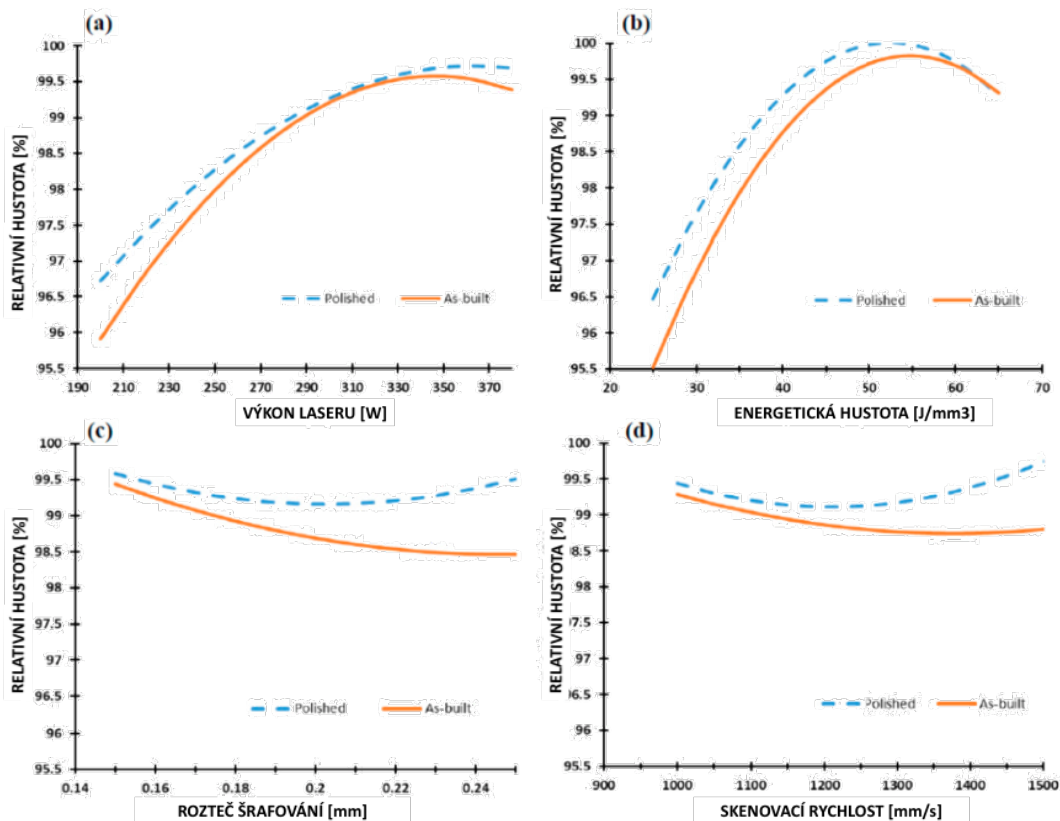


Obr.30: Porozita vzorků AlSi10Mg; (a,d) AS8, (b,e) AS3, (c,f) AS1.[69]

Na Graf 7 je zobrazen vliv výkonu laseru, skenovací rychlosti, rozteči šrafování a energetické hustotě na relativní hustotě tištěných vzorků ze slitiny AlSi10Mg. Z výsledků je možné odvodit ideální rozmezí výrobních parametrů k dosažení nejvyšší možné relativní hustoty tištěné součásti.

Při použití energetické hustoty v rozmezí 50-60 J/mm³ dosahuje relativní hustota hodnoty 99,7 %. Mimo toto rozmezí se relativní hustota snižuje z důvodu nízkého stupně natavení práškových částic nebo při vyšších hodnotách energetické hustoty z důvodu zachycování vodíku uvnitř práškových částic. Z důvodu zlepšení měření byl povrch vzorků přešetřen, aby byl minimalizován vliv povrchové topologie vzorků. Přešetření zvýšilo u vzorků relativní hustotu o 0,1-1 % při 50 J/mm³.

Z porovnání původních a přešetřených vzorků je možné usoudit, že zvýšení rozteče šrafování nebo skenovací rychlosti značně zvyšuje porozitu na povrchu součásti. Změna parametru výkonu laseru ukazuje taktéž velký vliv na relativní hustotu vzorku, kdy při nižších výkonech nedochází k dokonalému roztavení práškových částic.



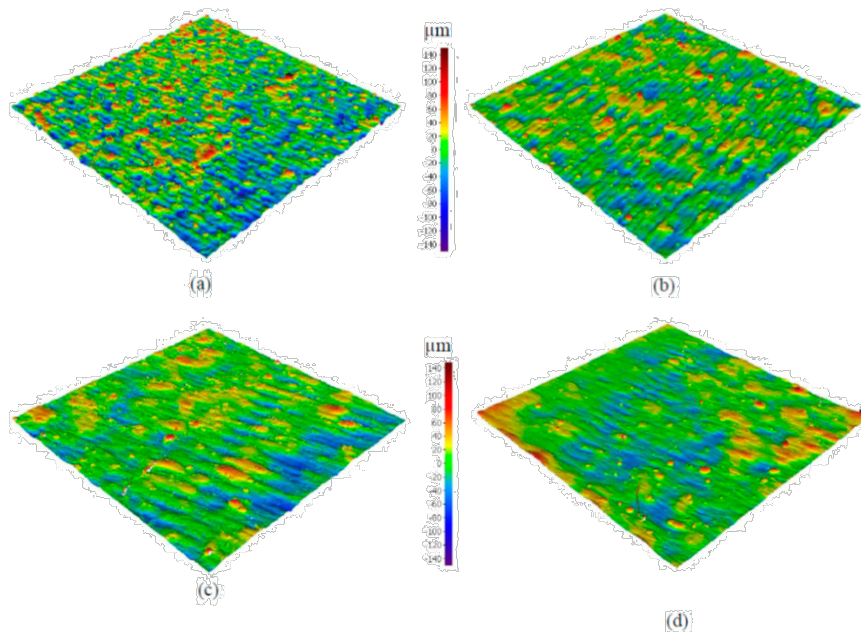
Graf 7: Relativní hustota vzorků ze slitiny AlSi10Mg.[69]

4.2.4 Textura povrchu

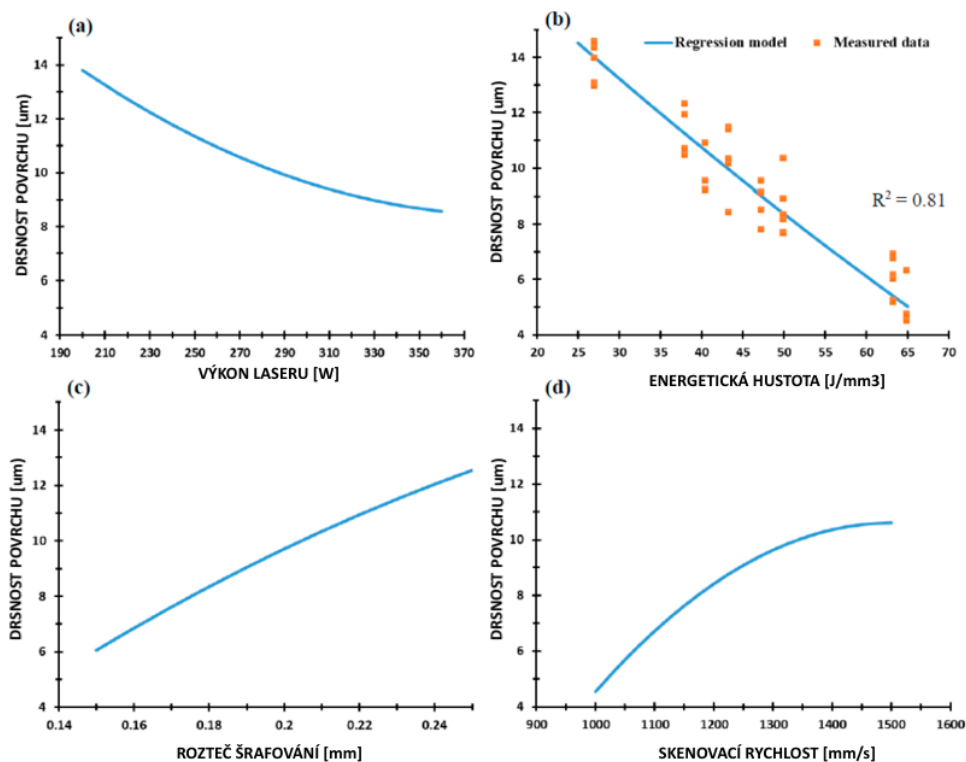
Z Graf 8 je názorně viditelná závislost drsnosti povrchu na energetické hustotě, kdy s rostoucí energetickou hustotou klesá drsnost povrchu. Při použití nízké energetické hustoty o hodnotě 27 J/mm^3 je možné na povrchu součásti naměřit drsnost v průměru $15 \mu\text{m}$. S energetickou hustotou kolem $40,5 \text{ J/mm}^3$ je možné naměřit drsnost kolem $10 \mu\text{m}$ a dále klesá s rostoucí energetickou hustotou až na $4,5 \mu\text{m}$ při 65 J/mm^3 .

Vliv energetické hustoty a výkonu laseru je téměř totožný, viz Graf 9. Se zvyšováním energetické hustoty a výkonu laseru je trend téměř totožný a dochází k poměrně rapidnímu snižování povrchové drsnosti. Naproti tomu zvyšování hodnot rozteče šrafování a skenovací rychlosti má negativní vliv na drsnost povrchu. Nejlepších

hodnot drsnosti povrchu bylo dosaženo při použití energetické hustoty 65 J/mm^3 , výkonu laseru 370 W , skenovací rychlosti 1000 mm/s a rozteči šrafování $0,19 \text{ mm}$.



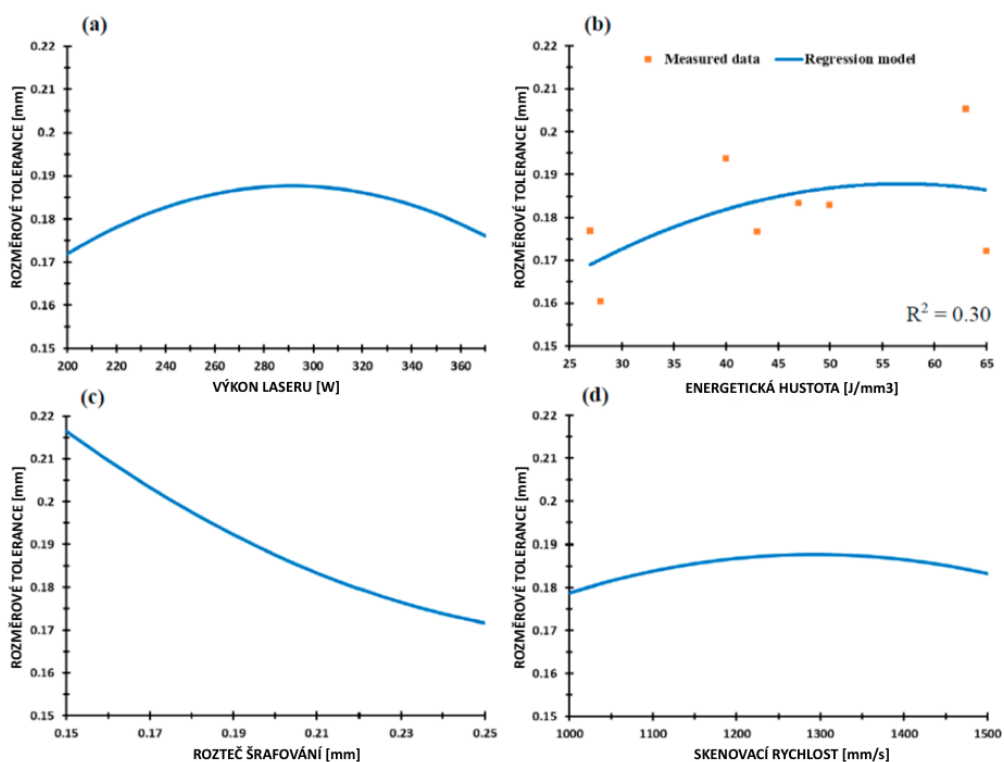
Graf 8: 3D textura povrchu slitiny AlSi10Mg; (a) AS8, (b) AS6, (c) AS3, (d) AS1.[69]



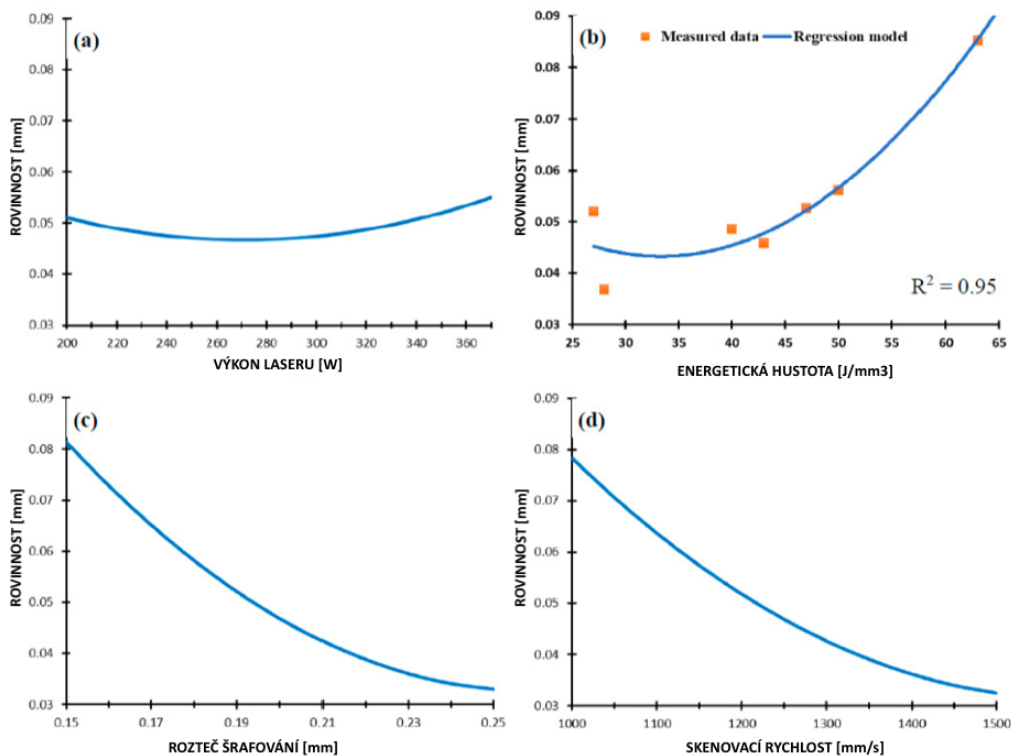
Graf 9: Drsnost povrchu vzorků ze slitiny AlSi10Mg[69]

4.2.5 Rozměrová přesnost

V rámci rozměrové přesnosti byly vyhodnoceny tolerance délkových rozměrů a plošná rovinnost u vzorků ze slitiny materiálu AlSi10Mg. Na Graf 10 jsou uvedeny rozměrové tolerance průměrné délky vzorků. Vzhledem k naměřeným hodnotám a hodnotám uvedeným v CAD modelu nebylo u žádného vzorku zjištěno zkrácení, naopak zvětšení rozměrů bylo zjištěno u většiny vzorků. Tento jev je způsoben částečným a nedokonalým natavením částic na povrchu vzorků. Po odečtení 0,02mm offsetu laserového paprsku se rozměrové tolerance pohybovaly v rozmezí od 0,15 do 0,195 mm. Graf 10c ukazuje, že rozteč šrafování má společně s výkonem laseru zásadní vliv na rozměrovou toleranci. Hodnoty plošné rovinnosti vzorků jsou uvedeny na Graf 11 a vykazují relativně malý rozptyl hodnot, ten je způsoben použitou vrstvou prášku o tloušťce 30 μm . Hlavní vliv na plošnou rovinnost má rozteč šrafování a skenovací rychlost. S rostoucí velikostí skenovací rychlosti a roztečí šrafování se dosahuje lepší plošné rovinnosti. Naopak s rostoucí energetickou hustotou se zhoršuje plošná rovinnost. [69]



Graf 10: Rozměrové tolerance vzorků ze slitiny AlSi10Mg. [69]



Graf 11: Plošná rovinnost vzorků ze slitiny AlSi10Mg.[69]

4.3 Výkon laseru, skenovací rychlost, průměr paprsku, úhel natočení

Vliv těchto parametrů byl popsán v jedné z dalších studií u materiálu Inconel 625.

4.3.1 Textura povrchu

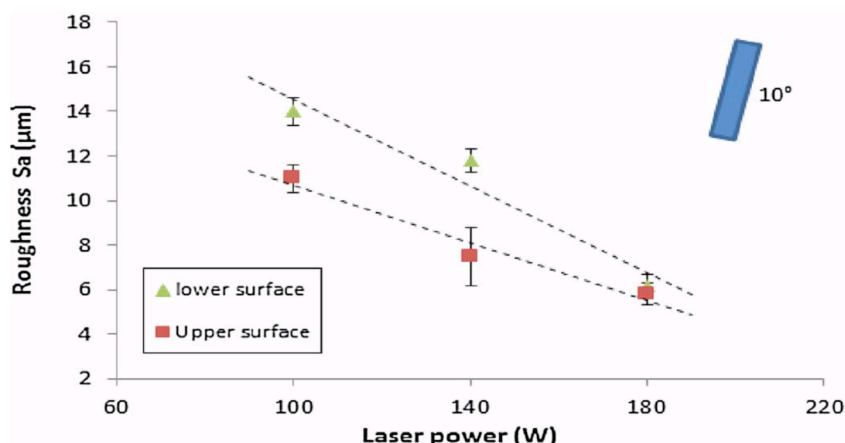
Během tohoto testu byly pro zjištění vlivu na drsnost, porozitu a únavové vlastnosti použity různé hodnoty tiskových parametrů: výkon laseru v rozmezí 100–400 W, skenovací rychlost 0,5–1,8 m/s, průměr laserového paprsku 70–160 μm . Zároveň byl zkoumán vliv úhlu natočení tištěné součásti vůči stavební desce, který byl v rozmezí od 0° do 35°. Z pohledu únavové životnosti součástí je drsnost povrchu a nízká porozita klíčová, protože povrchové nebo vnitřní vady mohou zvyšovat riziko iniciace únavové trhliny. Přesné hodnoty všech parametrů a výsledné drsnosti povrchu jednotlivých vzorků jsou viditelné v Tabulka 9.

Tabulka 9: Tiskové parametry pro kontury vzorků č. 1–6 a jejich plošná drsnost.[70]

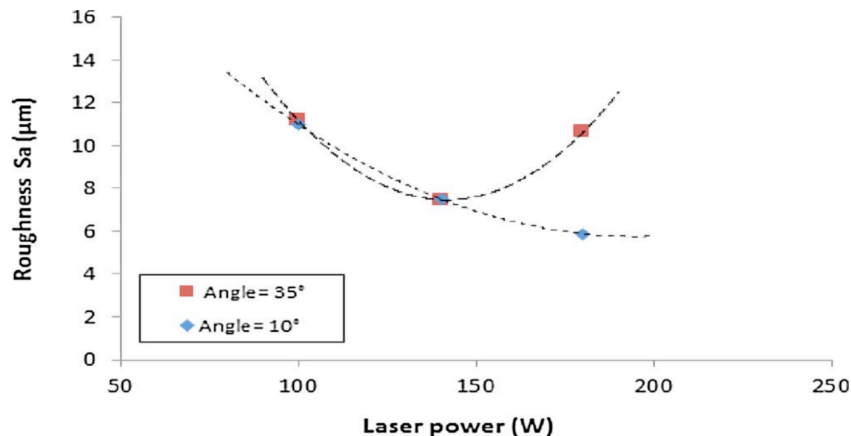
číslo vzorku	úhel natočení [°]	výkon laseru [W]	rychlost laseru [mm/s]	průměr paprsku [μm]	energetická hustota [J/mm ³]	plošná drsnost Sa* [μm]
1	10	100	500	70	52	11/14
2	10	140	500	70	72,8	7,5/11,8
3	10	180	500	70	93,6	5,9/6,2
4	35	100	500	70	52	11/16,5
5	35	140	500	70	72,8	7,5/20,5
6	35	180	500	70	93,6	10,6/23

*tučně=horní povrch, normálně=dolní povrch

V první části byl u prvních šesti vzorků zjištěn vliv nastavení parametrů výkonu laseru a úhlu natočení na plošnou drsnost, ostatní parametry byly konstantní. Hodnoty výkonu laseru se pohybovaly v rozmezí 100–180 W a úhly natočení byly 10° a 35°. Z výsledků je patrné, že se zvyšujícím se výkonem laseru se drsnost povrchu snižuje (Graf 12), nicméně u vzorku č. 6 s náklonem 35° je vidět, že při zvýšení výkonu laseru došlo ke zvýšení drsnosti povrchu (Graf 13). Tento jev je pravděpodobně následkem zhoršené schopnosti odvodu tepla z tenké okrajové kontury, kde dojde k natavení okolního prášku. Tento výsledek částečně vysvětluje nutnost použití podpurných struktur při větším náklonu stěn. Stejný jev je patrný i u vzorku s náklonem pouhých 10°, kde je taktéž vidět velký rozdíl v drsnosti horního a dolního povrchu (viz Graf 12).



Graf 12: Vliv nastavení parametru výkonu laseru na drsnost povrchu.[70]



Graf 13: Vliv nastavení parametru výkonu laseru na drsnost povrchu v závislosti na úhlu natočení.[70]

Z výše uvedených výsledků lze shrnout, že na jednu stranu vyšší výkon laseru snižuje drsnost povrchu, ale na druhou stranu v případě kombinace vyššího výkonu laseru a většího úhlu natočení součásti dochází k přehřívání převislých kontur a natavování okolních práškových částic, které zvyšují drsnost povrchu.

V druhé části byl zkoumán vliv rychlosti laseru a průměru laserového paprsku u vzorků č. 7-16. Výkon laseru byl zvýšen na konstantní hodnotu 400 W, což je maximální hodnota použitého SLM systému. Byly použity tři různé průměry paprsků (70, 160 a 240 µm) a čtyři různé rychlosti laseru (1000, 1400, 1800 a 2000 mm/s). Z kombinací těchto parametrů bude získána výsledná hodnota energetické hustoty a bude zkoumán její vliv na drsnost povrchu.

Z výsledných hodnot drsnosti uvedených v Tabulka 10 lze odvodit, že zvýšení hodnot energetické hustoty způsobuje snížení hodnot plošné drsnosti. Zároveň je viditelný trend zvyšování hodnot drsnosti se zvětšujícím se průměrem paprsku. S konstantním průměrem paprsku a klesající rychlostí laseru je možné pozorovat růst drsnosti.

Tabulka 10: Tiskové parametry pro kontury vzorků č. 7–16 a jejich plošná drsnost.[70]

číslo vzorku	úhel natočení [°]	výkon laseru [W]	rychlost laseru [mm/s]	průměr paprsku [μm]	energetická hustota [J/mm ³]	plošná drsnost Sa [μm]
7	0	400	1000	70	104	10,5
8	0	400	1400	70	74,3	12,3
9	0	400	1800	70	57,8	12,4
10	0	400	2000	70	52	9,5
11	0	400	1000	160	19,9	21
12	0	400	1400	160	14,2	18,9
13	0	400	1800	160	11,1	17,1
14	0	400	2000	160	10	15,2
15	0	400	1000	240	8,8	21
16	0	400	1400	240	6,3	20,3

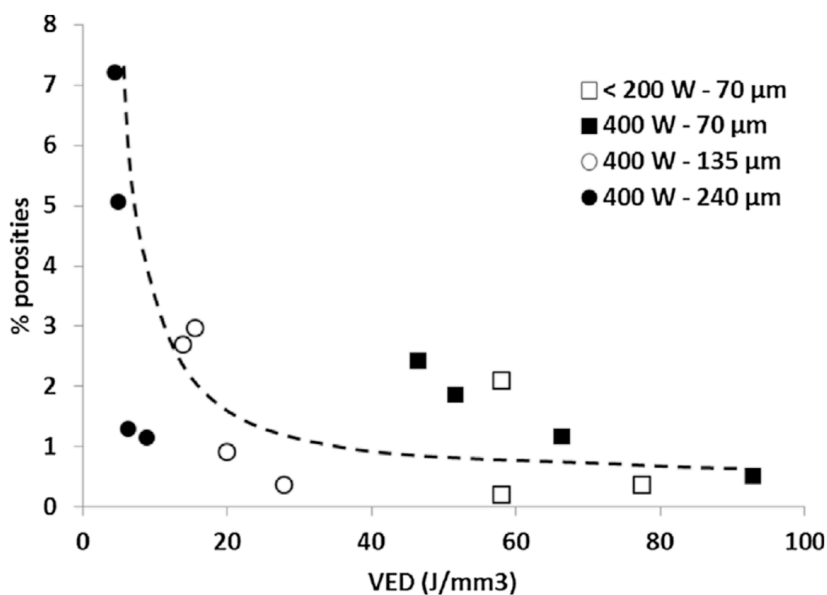
4.3.2 Porozita

Pro zjištění porozity v závislosti na tiskových parametrech šrafování byly použity parametry viz Tabulka 11.

Tabulka 11: Tiskové parametry pro šrafování u vzorků č. 7–29 a jejich výsledná porozita.

číslo vzorku	úhel natočení [°]	výkon laseru [W]	rychlost laseru [mm/s]	průměr paprsku [μm]	energetická hustota [J/mm ³]	porozita [%]
7	0	400	1000	70	104	0,51±0,05
8	0	400	1400	70	74,3	1,17±0,4
9	0	400	1800	70	57,8	1,85±0,34
10	0	400	2000	70	52	2,43±0,9
11	0	400	1000	160	19,9	0,36±0,09
12	0	400	1400	160	14,2	0,91±0,12
13	0	400	1800	160	11,1	2,96±0,8
14	0	400	2000	160	10	2,7±0,4
15	0	400	1000	240	8,8	1,16±0,09
16	0	400	1400	240	6,3	1,3±0,6
17	0	400	1800	240	5,1	5,06±0,2
18	0	400	2000	240	4,6	7,2±0,3
19	0	175	600	70	79,3	1,44±0,4
20	0	175	600	70	79,3	0,7±0,16
21	0	175	700	70	68	1,29±0,22
22	10	150	600	70	68	0,2±0,08
23	10	200	600	70	90,7	0,37±0,18
24	10	175	700	70	68	2,1±0,51
25	10	175	800	70	59,5	6,32±1,26
26	35	150	600	140	17	0,36±0,04
27	35	200	600	140	22,6	0,12±0,02
28	35	175	700	140	17	0,66±0,06
29	35	175	800	140	14,8	1,61±0,3

Z výsledných hodnot vzorků č. 7–21, u kterých nebyl použit úhel natočení, je patrné, že porozita klesá se vzrůstající energetickou hustotou. V případě použití úhlu natočení u vzorků č. 22–29 je vidět celkově nižší porozita při použití obdobných energetických hustot. Při ideální optimalizaci parametrů je možné dosáhnout velmi nízké porozity (0,1–0,25 %) jako je tomu např. u vzorku č. 22 a 27. Závislost energetické hustoty na porozitě je vynesena v Graf 14.



Graf 14: Závislost množství porozity na tiskových parametrech.[70]

4.3.3 Únavová životnost

Při zavádění aditivní výroby je všeobecným cílem získání dílů s lepší nebo alespoň srovnatelnou kvalitou v porovnání se součástmi vyráběnými konvenčními metodami. Pro každý nový materiál vyvinutý pro použití v aditivních technologiích je zcela nezbytné najít optimální výrobní parametry, které i u náročných aplikací zajistí požadovanou únavovou životnost při cyklickém namáhání. U aditivních technologií se nelze spolehnout na odhad této hodnoty z meze pevnosti získané tahovou zkouškou jako je tomu v běžné v technické praxi u konvenčně vyráběných součástí. Vzhledem k jiné mikrostruktuře kovů u součástí vyráběných aditivními technologi-

emi na spékání kovových prášků se mohou únavové vlastnosti těchto součástí významně lišit. Detailní znalost únavových vlastností těchto materiálů umožní bezpečnou optimalizaci tiskových parametrů, a hlavně jistotu při implementaci těchto součástí do běžné výroby.

4.3.3.1 Volba parametrů

V předchozích částech byl zjištěn vliv tiskových parametrů na drsnost a porozitu. Pro tisk vzorků pro testování únavové životnosti byly vybrány parametry, které se ukázaly jako ty, které zaručují nízkou drsnost a porozitu. Pro kontury byla zvolena energetická hustota o hodnotě 93 J/mm³ a pro šrafování 87 J/mm³, úhel natočení součásti na stavební desce byl zvolen 10°. Parametry pro tisk vzorků jsou uvedeny v Tabulka 12.

Tabulka 12: Parametry tisku vzorků pro tahovou a únavovou zkoušku.[70]

úhel natočení [°]	kontury			šrafování		
	výkon laseru [W]	rychlost laseru [mm/s]	průměr paprsku [μm]	výkon laseru [W]	rychlost laseru [mm/s]	průměr paprsku [μm]
10	180	500	70	175	600	70

4.3.3.2 Tahová zkouška

Před samotnou únavovou zkouškou byly provedeny dvě zkoušky tahem na vytištěných vzorcích bez dodatečné úpravy s výsledky uvedenými v Tabulka 13. Výsledky tahové zkoušky odpovídají hodnotám uváděným pro materiál Inconel 625 v literatuře.

Tabulka 13: Výsledky tahové zkoušky tištěných vzorků.[70]

vzorek	modul pružnosti [GPa]	σ_Y [MPa]	A [%]	mez pevnosti v tahu [MPa]
1	177	711	35	976
2	179	727	35	971

4.3.3.3 Únavová zkouška

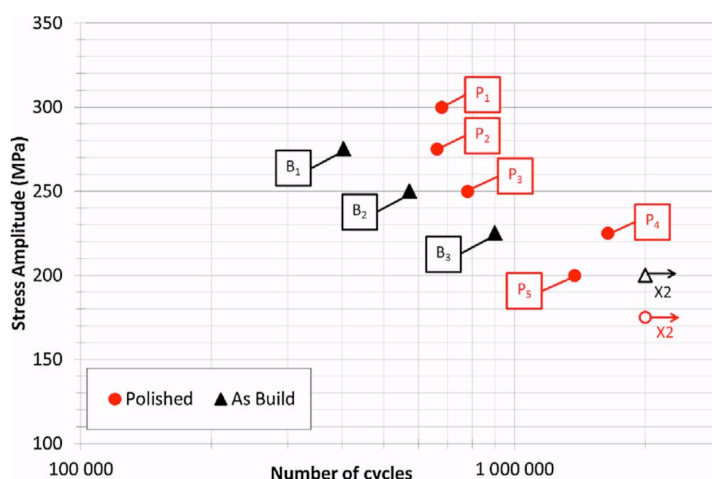
V rámci únavové zkoušky bylo provedeno celkem 7 zkoušek vzorků pro zjištění počtu cyklů potřebných k selhání součásti. Testy byly prováděny pro leštěné vzorky

a vzorky bez dodatečné úpravy. Vzorky byly testovány při frekvenci cyklického namáhání 20 Hz a ty, které přežily 2×10^6 cyklů byly otestovány znovu při amplitudě napětí zvýšené o 25 MPa. Výsledky jsou uvedeny v Tabulka 14.

Tabulka 14: Výsledky únavové zkoušky vzorků leštěných i bez dodatečné úpravy.[70]

leštěné			vytištěný stav		
vzorek	σ_a [GPa]	N [cykly]	vzorek	σ_a [GPa]	N [cykly]
P1	300	678 663	B1	275	403 887
P2	275	662 916	B2	250	573 095
P3	250	779 395	B3	225	901 787
P4	225	1 641 598	B4	200	2 000 000
P5	200	1 373 450	B4	225	1 069 045
P6	175	2 000 000	B5	200	2 000 000
P6	200	1 190 074	B5	225	2 000 000
P7	175	2 000 000	B5	250	355 349
P7	200	261 270			

Výsledné hodnoty prozrazují, že limity tištěných vzorků jsou v oblasti mezi 175 a 200 MPa (cca 20 % meze pevnosti v tahu), což jsou mnohem nižší hodnoty, než jaké jsou běžné u konvenčně vyráběných součástí. U leštěných vzorků je možno pozorovat u amplitudy napětí 225, 250 a 275 MPa velký rozdíl v počtu cyklů u leštěných vzorků a vzorků ve vytištěném stavu. Výsledky jsou vyneseny v Graf 15.[70]



Graf 15: Výsledky únavové zkoušky tištěných vzorků.[70]

5 Metodika zavádění aditivních technologií ve společnosti

V rámci praktické části je cílem navrhnout metodiku, pomocí které by bylo možné identifikovat kritické položky na základě řady parametrů konvenčních výrobních postupů ovlivňujících výsledné vlastnosti produktu. Metodika se v této závěrečné práci zabývá výběrem položek, které jsou určeny pro nově vyráběný letoun vybrané společnosti. Tato společnost s dlouholetou tradicí vždy využívala konvenční metody výroby jednotlivých dílů, nicméně v současnosti by se ráda zaměřila na aditivní způsoby výroby dílů, jelikož celé letecké odvětví se ubírá tímto směrem a je nutné držet s konkurencí krok.

Metodika slouží k identifikaci dílů, které by na základě parametrů, jako je např. cena, hmotnost či tvarová složitost, mohly být vhodnými adepty pro výrobu aditivní technologií. Za vhodné díly pro tuto výrobu se považují zejména součásti komplexních tvarů s vysokými výrobními náklady, které lze topologicky optimalizovat, a tím ušetřit nejen hmotnost, ale i značné výrobní náklady. Tato metodika je navržena jako první krok výběru položek, po kterém vždy musí následovat diskuze a podrobné vyhodnocení vhodnosti využití navrhované technologie. Nelze ji tedy považovat za zcela plnohodnotný nástroj k výběru dílů.

5.1 Vize metodiky

Na samotném počátku byly stanoveny parametry, které by měly být dohledatelné u konvenčních technologií výroby. Tyto parametry lze následně využít pro určení vhodnosti aditivní technologie pro výrobu dané součásti, případně pro redukci množství dílů v databázích a omezení časové náročnosti výběru součástí. Tuto technologii je ekonomicky výhodné používat zejména u takových položek, u kterých:

- není možná výroba jinou technologií (např. různě tvarované chladicí kanály, nepřístupné zákoutí a plochy pro obráběcí stroj)
- je požadováno snížení hmotnosti při zachování tuhosti a funkčnosti součásti

- je nutno zakomponovat více součástí do jedné a konvenčními metodami je nelze vyrobit nebo je to finančně nerentabilní

Vzhledem k ekonomické stránce aditivní technologie je nutné vyhodnotit dostupná data, aby bylo možné rozhodnout, zdali je technologie vhodná pro výrobu daných součástí a zdali jejich výroba touto metodou bude mít smysl nejen z již zmiňovaného ekonomického, ale i z konstrukčního a technologického hlediska.

Jako hlavní parametry byly stanoveny následující:

- materiál
- cena
- hmotnost
- doba montáže
- přesnost
- čas výroby
- velikost
- počet dílů v podsestavě
- tepelné namáhání
- mechanické namáhání
- umístění dílu v sestavě nebo v letounu

Tato vize metodiky je založena na tom, že výše jmenované parametry lze získat z výrobních databází společnosti. Vyhodnocování dat z této databáze by mělo probíhat v krocích, které budou redukovat databázi čítající tisíce dílů, a to vždy pomocí předem určeného parametru pro daný krok. Tento krok bude vždy aplikován na celou databázi, přičemž budou ponechány ty položky, které danému parametru vyhovují nebo jejichž ponechání lze racionálně zdůvodnit. Následně bude přistoupeno k další redukci položek v rámci dalšího kroku.

5.2 Realita provedení metodiky

V reálném světě aditivní výroby je nutno počítat s fakty, které jsou neopomenutelné při vytváření metodiky. Ať už se jedná o kvalitu a čistotu dat ve vybrané společnosti, nebo o technologické limity strojů pro aditivní výrobu. Ve vybrané společnosti je využíváno několik databázových systémů, které jsou vzájemně propojeny. Nicméně ne zcela dokonalým způsobem. Databáze dílů obsahují podstatné informace, které jsou podstatné pro správný a funkční návrh metodiky. V případě této společnosti bylo nutné si dát práci s vyčištěním dostupných dat

5.2.1 Stanovení jednotlivých kroků

Stanovení jednotlivých kroků vychází z technologického kusovníku jedinečných položek³ pro daný letoun. Obsahuje vše z konstrukčního kusovníku, ale u sestav vyráběných mimo vybranou společnost mohou chybět jednotlivé díly, do kusovníku vstupuje nakupovaná sestava jako komplet bez rozpadu dílů. V kusovníku jedinečných položek je vždy uvedena vyšší úroveň položky, do které patří. V případě sestavy pak další díly a v případě dílu polotovar nebo jiný druh vstupního materiálu.

Pro vybraný letoun obsahuje technologický kusovník celkem 13 936 jedinečných položek. V první fázi filtrace položek budou odstraněny ty položky, které nemají pro metodiku význam. Jsou identifikovány pomocí čísla položky. Součásti určené pro nový cvičný proudový letoun mají několik tvarů databázového čísla, které znesnadňují rozklíčování informací, které toto číslo nese. V kusovníku lze nalézt tyto formáty čísla položky:

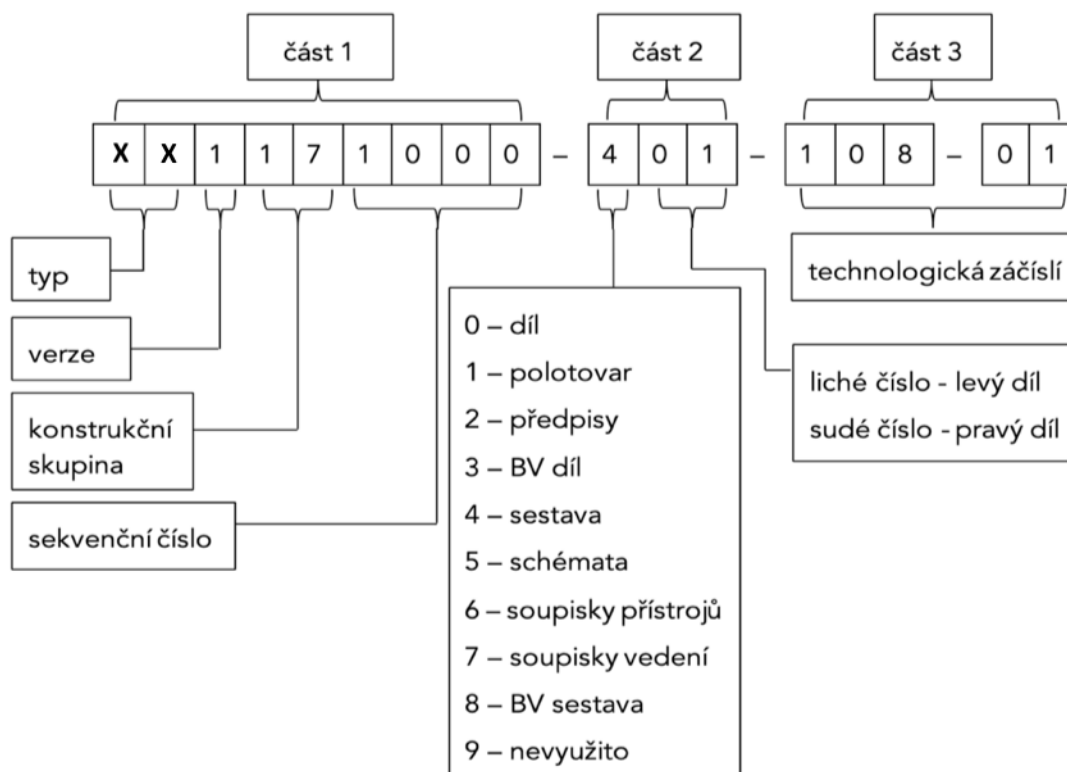
- MAE10042: materiál
- MA000321: materiál
- 39167170: položka z odlišné verze letounu

³Kusovník jedinečných položek obsahuje pouze jednu instanci položky i v případě, že se v některých sestavách může vyskytovat vícekrát.

- R4102138: položka z odlišné verze letounu
- A-XX-Z 0032: změnový dokument
- MST20007: materiál
- MSY01-107-006: materiál
- MSC10133: materiál
- M1EA000020: materiál
- M1E6930431: materiál
- M1576725.XXXXX.86: materiál
- M2E8467307: materiál
- M4005962-T03: materiál

Ze seznamu výše vyplývá, že některé položky používané pro nový cvičný proudový letoun jsou převzaty ze starších modelů letounů. K jejich číselnému označení je dostupná pouze zastaralá vnitropodniková norma, která neumožňuje požadovaný způsob rozklíčování jednotlivých pozic v čísle.

Schéma 4: Rozložení čísla položky dle vnitropodnikové normy a vysvětlení významu jednotlivých částí.



Vnitropodniková norma ve vyhovující podobě byla zavedena až pro nové díly – vyvíjené přímo pro nový cvičný proudový letoun. S použitím normy (viz Schéma 4) lze v základní části čísla položky určit: typ letounu, jeho verzi, konstrukční skupinu a sekvenční číslo. V následujícím trojčíslí (část 2) je na první pozici uvedena konstrukční povaha dílu, tedy zdali se jedná o díl, polotovar, předpis, BV díl atd. Z druhé a třetí pozice lze zjistit, zdali se jedná o „Originální levý díl“ nebo „Symetrický pravý díl“. V poslední části (část 3) se nachází technologické „záčíslí“, jehož význam není pro tuto metodiku podstatný.

5.2.1.1 Příprava dat

Před tím, než bylo možné začít s databází pracovat, bylo nezbytně nutné zorientovat se ve všech používaných databázových systémech společnosti. Zároveň bylo klíčové porozumění významu jednotlivých údajů uvedených v těchto systémech, aby bylo možné je využít požadovaným způsobem a aby u dílů uvedená hodnota měla vypovídající význam pro tuto metodiku. Ve vybrané společnosti se vyskytují 3 databázové systémy, ve kterých je možné vyhledávat data ke konstrukčním prvkům letounu. Jedná se o konstrukční a technologický kusovník, čítající každý mezi 10 až 20 tisíci položkami, a dále o kusovník, který je ve společnosti nazýván jako „vnitropodnikový databázový systém“ a který je využíván jako databáze konstrukčních dat. Pro zjednodušení práce je nutné provést konsolidaci dat z těchto kusovníků, což znamená sjednocení uvedených dat do jedné tabulky. Cílem sjednocení je získání maximálního množství dostupných informací k jednotlivým položkám. V této sjednocené databázi je následně možné provádět filtraci dat podle předem stanovených parametrů a klíčů. V rámci vnitropodnikového databázového systému se vyskytují důležité informace. Jedná se např. o tyto informace:

- třídící znak položek
- rozměrová obálka dílů
- rozměrová obálka sestav
- použitý materiál

Počet položek po konsolidaci dat je 13 936, což je zároveň počet, který bude vstupovat do prvního kroku metodiky.

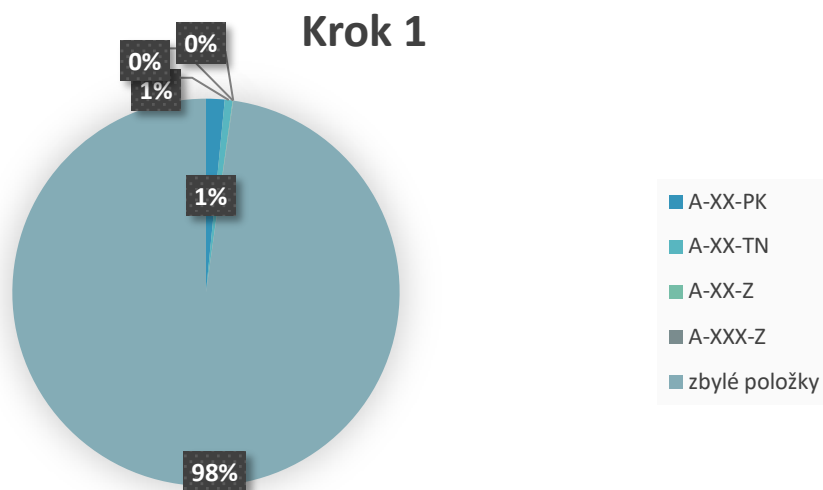
5.2.1.2 Krok 1

V prvním kroku jsou odstraněny položky, pod jejichž číslem se nevyskytuje fyzická položka, ale pouze výrobní, postupové, technologické a jiné druhy dokumentace. Tyto položky lze v databázi identifikovat pomocí čísla položky, které může mít jeden z následujících tvarů: A-XX-PK, A-XX-TN, A-XX-Z nebo A-XXX-Z. Tyto položky nemají pro vytvoření metodiky význam.

Konečný stav položek: 13 622

Tabulka 15: Počet položek vyfiltrovaných v kroku 1

Krok 1	
A-XX-PK	216
A-XX-TN	91
A-XX-Z	6
A-XXX-Z	1
zbylé položky	13622



Graf 16: Množství položek dle kroku 1

5.2.1.3 Krok 2

Do kroku 2 vstupují položky označené jako „zbylé“ z předchozího kroku. Jedná se o 13 622 položek. V rámci tohoto kroku jsou odstraněny všechny polotovary a nakupovaný materiál. Mezi polotovary patří položky, které jsou následně obráběny,

tvářeny nebo prochází jiným výrobním procesem. Mezi tyto položky patří různé tyče, trubky, plechy, bloky atp. Mezi nakupovaný materiál se řadí položky, které jsou nakupovány jako hotové a neprochází výrobním procesem ve společnosti, ale jsou přímo použity na samotné sestavování letounu nebo jeho podsestav, jako je např. různý spojovací materiál, normalizované součásti, barvy atp. Polotovary a nakupovaný materiál vyskytující se v kusovníku vždy patří pod danou sestavu nebo díl.

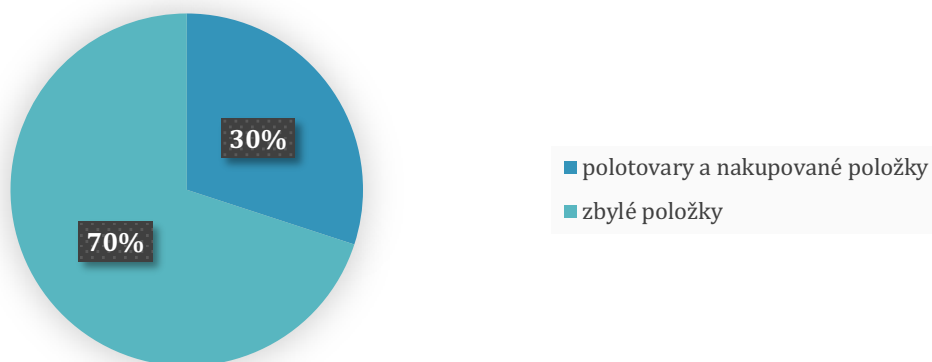
Právě z tohoto důvodu bylo v plánu využít tyto informace a použít rozměry polotovarů pro určení přibližné velikosti z nich vyráběných dílů. Tyto přibližné rozměry byly nakonec díky součinnosti IT oddělení společnosti nahrazeny přesnějšími rozměrovými obálkami dílů, které byly hromadně vypsány ze systému společně s materiálem uvedeným v CAD modelu. V kusovníku lze položky polotovarů a nakupovaných dílů identifikovat pomocí čísla položky, které vždy začíná písmenem M.

Konečný stav položek: 9 532

Tabulka 16: Počet položek vyfiltrovaných v kroku 2

Krok 2	
polotovary a nakupované položky	4090
zbylé položky	9532

Krok 2



Graf 17: Množství položek dle kroku 2

5.2.1.4 Krok 3

Do tohoto kroku vstupují zbylé položky z předchozího kroku, tedy 9 532 položek. V rámci kusovníku jsou použity jednotlivé části čísla položek, které je možné dle vnitropodnikové normy (viz Schéma 4) rozložit a získat cenné informace pro další redukci databáze. Tento postup lze aplikovat pouze pro položky začínající písmeny XX, pro něž je tato norma určena. Jedná se o díly navržené přímo pro nový letoun vyvíjený vybranou společností. Pomocí čísla položky, konkrétně jeho druhé části, je možné zjistit informaci, zdali se jedná o položku, pod kterou se ukrývá díl, polotovár, předpis, BV díl, sestava, schéma, soupiska přístrojů, soupiska vedení nebo BV sestava.

Po vypsání této informace je možné odfiltrovat zbylé polotovary, schémata, soupisky přístrojů a soupisky vedení, které nebyly identifikovány a odfiltrovány metodikou v předchozím kroku. Dále je možno odstranit BV sestavy, jelikož se jedná o velké montážní celky, o kterých lze s jistotou říci, že je není možné vyrábět aditivní technologií v jednom kuse.

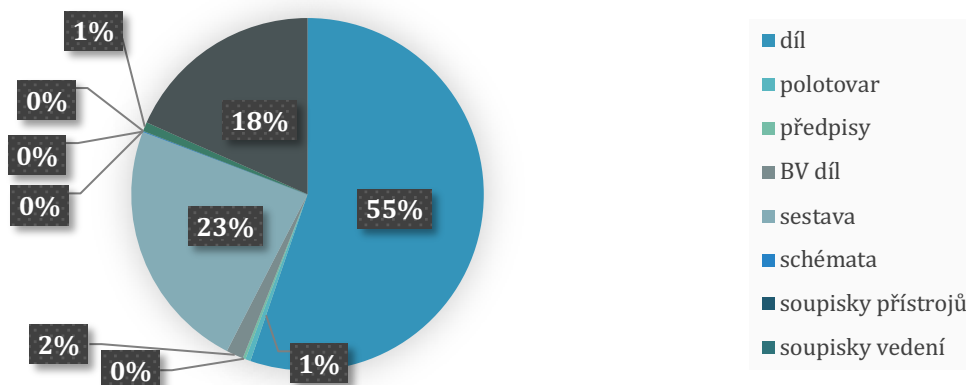
Konvenčně vyráběné sestavy jsou z pohledu aditivní technologie výroby zajímavé. V případě konvenční výroby jednotlivých dílů je nutno brát v potaz „vyrobitelnost“ a následnou „smontovatelnost“ jednotlivých prvků v kompletní sestavu. V případě využití aditivní výroby je možno na tuto sestavu pohlížet z naprosto jiného pohledu. Není nutno brát ohled na tvarovou složitost, ani na smontovatelnost jednotlivých komponent, jelikož je možné tuto sestavu, při splnění určitých kritérií, vyrobit jako jeden díl. Tímto způsobem lze u takových sestav ušetřit značné množství času, hmotnosti a financí. Po tomto kroku zůstávají v kusovníku pouze položky dílů, BV dílů, sestav a také díly, které tímto způsobem nelze rozlišit.

Konečný stav položek: 9 373

Tabulka 17: Počet položek vyfiltrovaných v kroku 3

Krok 3	
díl	5267
polotovar	46
předpisy	24
BV díl	150
sestava	2210
schémata	7
soupisky přístrojů	3
soupisky vedení	0
BV sestava	79
zbylé položky	1746
díl + BV díl + sestava + zbylé položky	9373

Krok 3



Graf 18: Množství položek dle kroku 3

5.2.1.5 Krok 4

Do této části vstupuje 9 373 položek, u kterých budou identifikovány třídící znaky využívané ve výrobě. V databázových systémech jsou zavedeny následující znaky:

- KO – kompozity
- NE – nekovy
- OD – obráběný
- PD – tvářený
- PO – potrubí
- PR – předpisy
- SE – sestavy nýtované
- SM – sestavy mechanické
- SZ – sestavy systémy

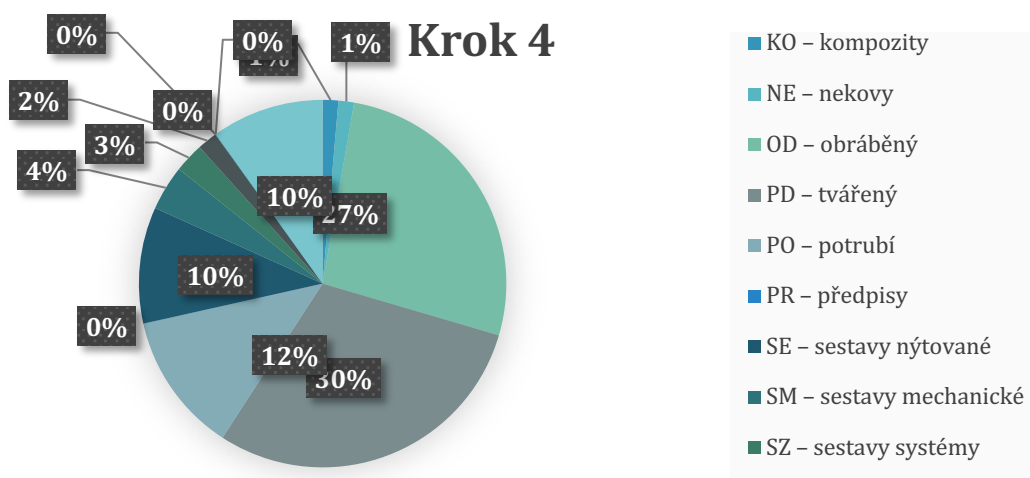
- SV – svazky
- SY – systémové výkresy a schémata
- LS – logistika
- SO – soupisy

Položky s třídícím znakem KO, NE, PO, PR, SV, SY, LS a SO lze v tomto kroku odfiltrout, protože nejsou pro danou metodiku relevantní.

Konečný stav položek: 7 790

Tabulka 18: Počet položek vyfiltrovaných v kroku 4

Krok 4	
KO – kompozity	129
NE – nekovy	129
OD – obráběný	2511
PD – tvářený	2777
PO – potrubí	1154
PR – předpisy	2
SE – sestavy nýtované	960
SM – sestavy mechanické	372
SZ – sestavy systémy	244
SV – svazky	164
SY – systémové výkresy a schémata	5
LS – logistika	0
SO – soupisy	0
zbylé položky	926
OD + PD + SE + SM + SZ + zbylé položky	7790



Graf 19: Množství položek dle kroku 4

5.2.1.6 Krok 5

Do tohoto kroku vstupuje celkem 7 790 položek kusovníku, které budou rozděleny na díly vyvíjené přímo pro nový typ letounu, tedy díly a BV díly s počátečními znaky XX v čísle položky. A dále na sestavy vyvíjené přímo pro tento letoun, které začínají opět znaky XX. Poslední skupina dílů obsahuje zbylé díly, které byly vyvíjeny pro starší typ letounu, ale jsou použité i v tomto novém letounu. Tyto položky není možné popsat, jelikož k nim není dostupná dostatečně obsáhlá vnitropodniková norma a zároveň u nich chybí v kusovnících další informace.

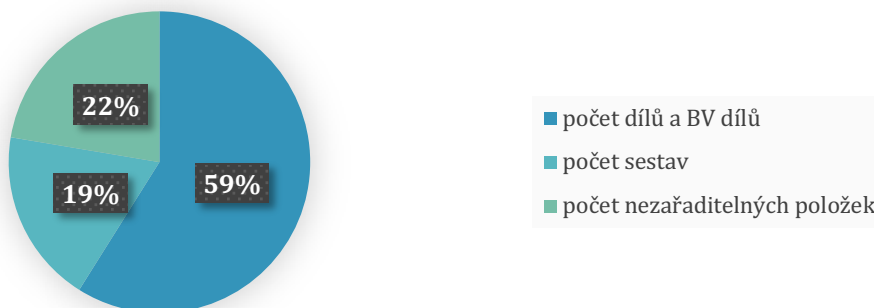
Výsledkem tohoto kroku jsou tedy celkem tři skupiny dílů, které budou vyhodnoceny separátně:

- skupina dílů a BV dílů čítající 4 591 položek
- skupina sestav čítající 1 458 položek
- skupina ostatních položek čítající 1 742 položek (jedná se zpravidla o díly nebo sestavy, které pochází ze starších modelů letadel, které společnost vyráběla nebo stále vyrábí, a zároveň jsou využity v tomto novém letounu)

Tabulka 19: Počet položek vyfiltrovaných v kroku 5

Krok 5	
počet dílů a BV dílů	4591
počet sestav	1458
počet nezařaditelných položek	1742

Krok 5



Graf 20: Množství položek dle kroku 5

5.2.2 Vyhodnocení skupiny dílů

Do této části vstupuje celkem 4 591 dílů, u kterých bude v následující části zjištěn maximální rozměr, výrobní náklady a hmotnost. Na základě maximálního rozměru je možné určit, zdali je v dnešní době na trhu aditivní zařízení s dostatečnou velikostí tiskového prostoru, ve kterém je daný díl vyrobitelný. Na základě uvedeného materiálu dílu je možné vyhodnotit, zdali se na trhu nachází kovový prášek, který se svými vlastnostmi bude blížit materiálu konvenčně vyráběného dílu.

V závěru této části jsou uvedeny dva možné přístupy k výběru dílů. V případě, že primárním cílem společnosti je šetření nákladů, je vhodné zabývat se nejnákladnějšími díly, které vyhovují z hlediska použitého materiálu a maximálních rozměrů. V případě, že cílem je úspora hmotnosti, společnost by se měla zabývat díly s vysokou hmotností, které vyhovují z hlediska použitého materiálu a maximálních rozměrů.

5.2.2.1 Rozměrová obálka dílu

V tomto kroku jsou díly vyhodnoceny z pohledu maximálních rozměrů. Z databáze lze získat informace o rozměrové obálce dílu, což jsou pomyslné maximální rozměry dílů ve směrech osy X, Y a Z. Z hodnot rozměrů v jednotlivých směrech os je vybrán maximální rozměr, pomocí něhož je možné vyloučit ty díly, které svou velikostí přesahují dnešní možnosti aditivních výrobních systémů. V současnosti jsou dostupné tiskárny s různými velikostmi tiskového prostoru – nejmenší tiskárny s tiskovým prostorem od několika stovek mm³ a ty největší s tiskovým prostorem téměř 160 dm³. Výčet tiskáren dle jednotlivých výrobců a velikostí tiskových prostorů je uveden v odstavci 3.1.

V průmyslově etablovaných tiskárnách je dnes možné tisknout součásti o maximálních rozměrech 800 × 400 × 500 mm. Na základě těchto rozměrů je možné vyloučit díly o maximálním rozměru větším než 1024,7 mm, což je hodnota délky tělesové uhlopříčky kvádra daného výše uvedenými rozměry. Aditivní technologie se vyvíjejí

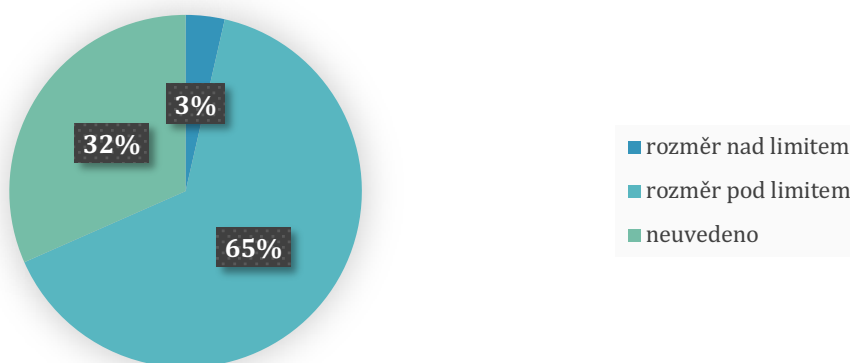
značným tempem kupředu, takže aktuální rozměrové limity se budou neustále posouvat na vyšší hodnoty. V tomto kroku jsou vyřazeny díly s nadlimitním nebo neuvedeným rozměrem.

Konečný stav položek: 2 976

Tabulka 20: Počet položek dle rozměrové obálky

Krok 6 - PN	
rozměr nad limitem	164
rozměr pod limitem	2976
neuvedeno	1451

Rozměrová obálka



Graf 21: Množství dílů dle rozměrové obálky.

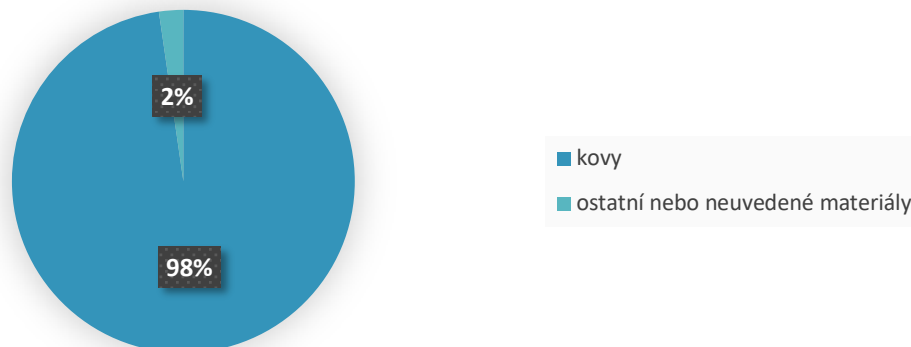
5.2.2.2 Materiál

Do tohoto kroku vstupuje celkem 2 976 dílů, které budou vyhodnoceny z pohledu použitého materiálu. Díly, které mají v databázi uvedený jiný materiál než kov, jsou odfiltrovány. Jedná se o díly např. z gumy, skla, teflonu, tkaniny, PA6, PEEK atd., které se nepodařilo odfiltrovat v průběhu předchozích kroků. Identifikace materiálu dílů je nezbytná kvůli správné volbě kovového práškového materiálu s ekvivalentními nebo lepšími vlastnostmi.

Tabulka 21: Počet položek dle materiálu

Materiál	
kovy	2908
ostatní nebo neuvedené materiály	68

Materiál



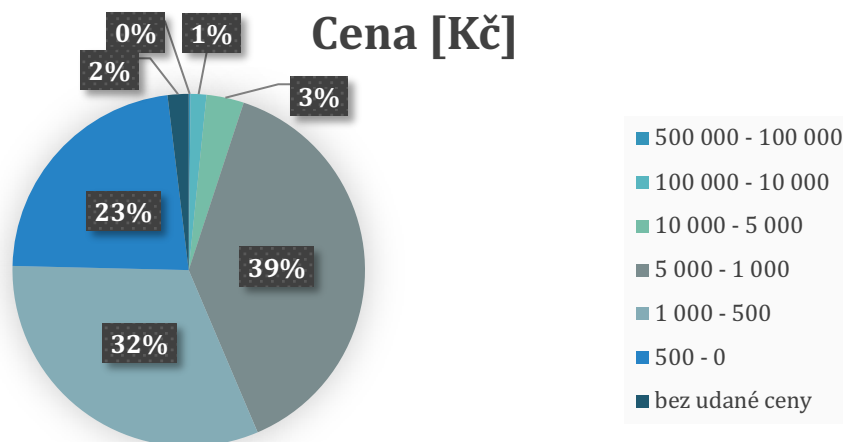
Graf 22: Počet dílů dle materiálu.

5.2.2.3 Výrobní náklady

Po pročištění vstupních dat dle dostupných parametrů a jednotlivě zvolených kroků filtrace přichází na řadu jeden z hlavních rozhodujících faktorů, a to výrobní cena daných dílů. Jedná se o jeden z možných přístupů k problematice zavádění aditivní výroby do společnosti. Do tohoto hodnocení jsou zahrnuty pouze položky s uvedeným a zároveň vyhovujícím rozměrem, do kroku tedy vstupuje 2 908 dílů. Jednotlivé skupiny položek jsou rozděleny do cenových skupin (viz Tabulka 22).

Tabulka 22: Počet dílů, dle cenové skupiny.

Cena [Kč]	Počet [ks]
500 000 – 100 000	5
100 000 – 10 000	42
10 000 – 5 000	100
5 000 – 1 000	1121
1 000 – 500	924
500 – 0	660
bez udané ceny	56



Graf 23: Počet dílů dle cenové skupiny.

Z porovnání cen jednotlivých dílů vyplývá, že největší vliv na výslednou cenu letounu mají první tři cenové skupiny, které dohromady zahrnují 147 položek o celkové hodnotě 2 285 296 Kč. Zbýlých 2 705 dílů z ostatních cenových skupin má hodnotu 3 123 376 Kč. Položek, které nelze zahrnout ani do jedné skupiny, tedy těch bez uvedené ceny, je celkem 56.

Pokud je pro společnost prioritou zlevnění výroby, je vhodné se zabývat položkami z prvních třech cenových skupin, jelikož vyhovují z hlediska rozměru, materiálu i ceny. Zavedení aditivní výroby těchto položek by mělo přinést rychlé a efektivní snížení výrobních nákladů. Položky, u nichž nejsou potřebné údaje uvedeny, bude nutné projít individuálně a jejich vhodnost výroby aditivní technologií posoudit dle jiných kritérií. Druhou možností volby dílů je kritérium hmotnosti – toto kritérium bude vyhodnoceno v následující části.

Celkem ke 147 získaným položkám byly získány CAD modely, které lze podrobit detailnímu zkoumání. Pomocí něj je možné vyloučit zbylé položky, které nedávají z pohledu aditivní výroby smysl. V těchto položkách se vyskytovaly duplikáty, jelikož společnost u nich využívá jak vlastní, tak i kooperativní výrobu. Tyto položky mají sice shodné číslo, ale nakupované mají v začísle dílů dodatek „-BUY“. Další položky,

které lze opomenout, jsou položky tzv. symetrické, tedy ty, jejichž protějšky se nacházejí na pravé straně letounu – viz Schéma 4. U těchto dílů je možné vyhodnotit pouze jeho levý díl, protože se dá předpokládat identická geometrie, materiál a mechanické vlastnosti jako u symetrického protějšku.

Tabulka 23: Počet duplikátních a symetrických dílů.

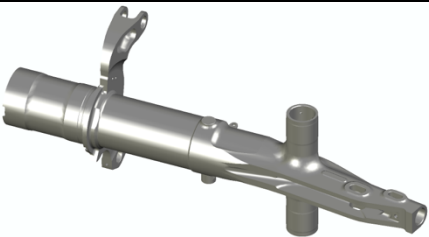

Celkový počet		147
Duplikátní díly		21
Symetrické páry		17
Jedinečné díly		109

V Tabulka 25 jsou snímky a rozměry součástí z první cenové skupiny. V této skupině se nacházely 2 díly ze symetrického páru, takže výsledné zhodnocení je provedeno pouze pro 3 součásti. Součásti budou zároveň rozděleny podle velikosti aditivního systému, který by byl potřeba k jejich výrobě dle následující tabulky.

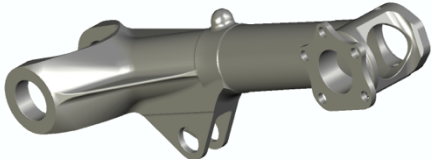
Tabulka 24: Velikost aditivního výrobního systému dle největšího rozměru součásti.

Největší rozměr	Velikost aditivního výrobního systému
do 250 mm	malý
do 500 mm	středně velký
nad 500 mm	velký

Tabulka 25: Vizuální vyhodnocení dílů z první cenové skupiny.

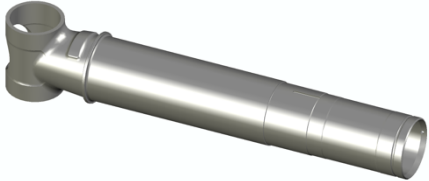
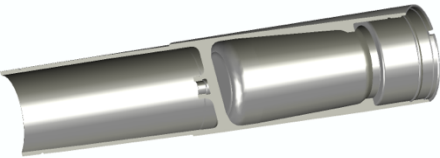
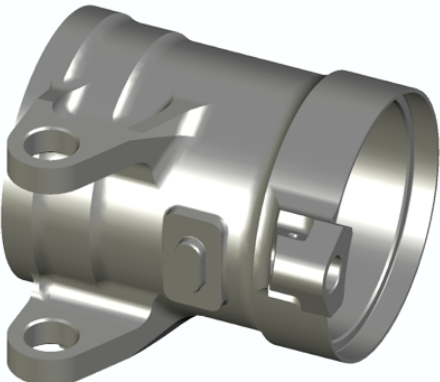
#	Pohled	Rozměry (XYZ) [mm]	Zhodnocení
1		741×271×161	Jedná se o komplexní svařence, které zahrnují normalizované, obráběné a tvářené prvky. Jedná se o perfektní ukázkou dílu, který je vhodný pro výrobu aditivní technologií.
2		937×245×162	Pro výrobu by byla potřeba tiskárna s velkým tiskovým prostorem. Materiálem je ocel.




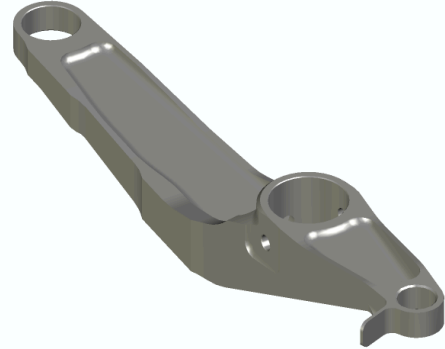
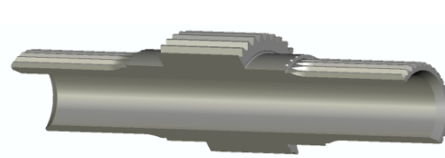
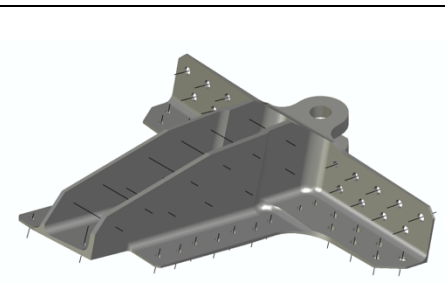
3		562×144×161	
---	---	-------------	--

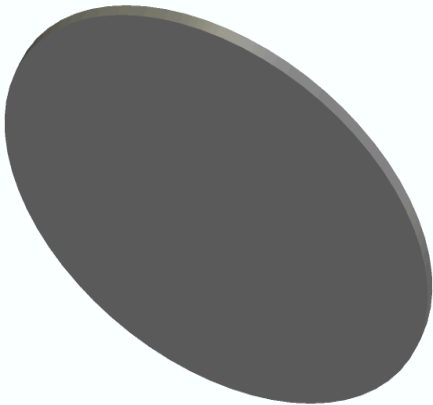
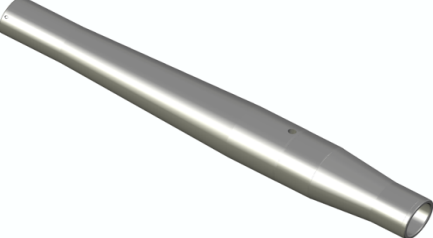
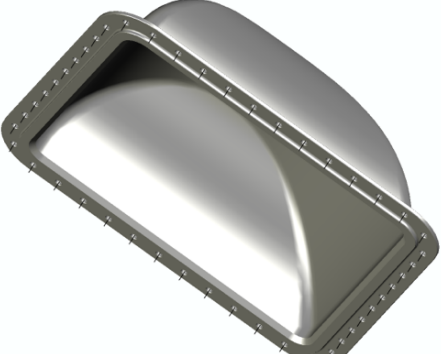

V Tabulka 26 jsou snímky a rozměrové obálky součástí z druhé cenové skupiny. V této skupině se nachází 5 dílů ze symetrického páru a 4 duplikátní díly. Výsledné zhodnocení je tedy provedeno pouze pro 33 jedinečných součástí.

Tabulka 26: Vizualní vyhodnocení dílů z druhé cenové skupiny.



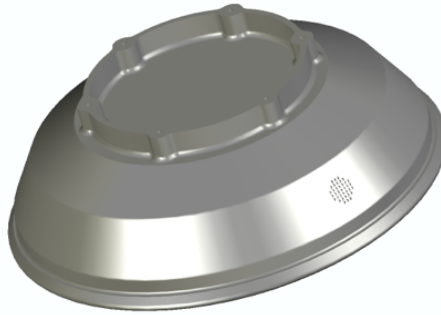

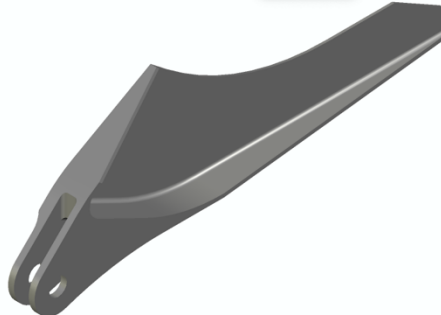
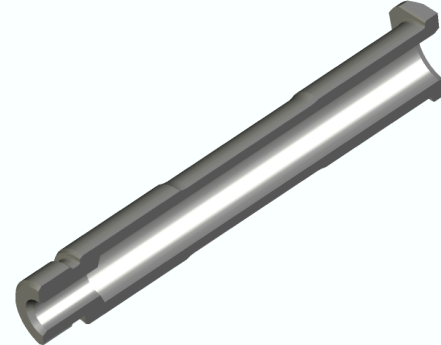
#	Pohled	Rozměry (XYZ) [mm]	Zhodnocení
1		434×80×72	Komplexní obrobek, který je vhodný pro výrobu aditivní technologií. Pro výrobu by byla potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem. Materiálem je ocel.
2		385×85×85	Rotační součást, kterou by se vzhledem ke složitosti vnitřních tvarů pravděpodobně vyplatilo vyrábět aditivní technologií. Pro výrobu by byla potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem. Materiálem je ocel.
3		166×160×142	Komplexní obrobek, který by bylo možno vyrábět pomocí aditivní technologie. Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem. Materiálem je ocel.




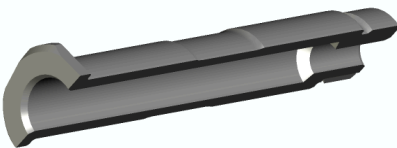
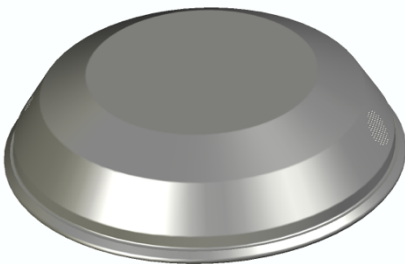
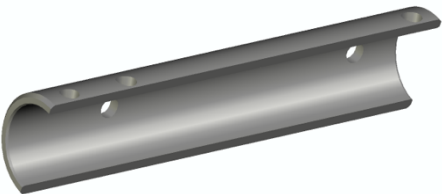
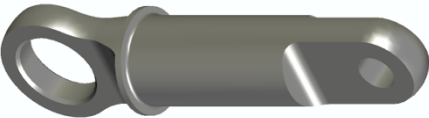
4		443×70×72	<p>Vyobrazená páka je ideálním prvkem, který je možné topologicky optimalizovat a následně vyrábět aditivní technologií.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je ocel.</p>
5		443×76×72	<p>Vyobrazená páka je ideálním prvkem, který je možné topologicky optimalizovat a následně vyrábět aditivní technologií.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je ocel.</p>
6		164×50×50	<p>Rotační součást s ozubením je dílem nevhodným pro aditivní výrobu. Požadovanou přesnost a povrchovou kvalitu ozubení nelze dosáhnout aditivní technologií.</p>
7		286×260×70	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možno topologicky optimalizovat a následně vyrábět pomocí aditivní technologie.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je ocel.</p>

8		20×20×1	<p>U této součásti se jedná pravděpodobně o chybu v databázovém systému.</p> <p>Jedná se o díl, který se zcela určitě nevyplatí vyrábět aditivní technologií.</p> <p>Uvedená cena v databázi je chybná.</p>
9		682×90×90	<p>Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.</p>
10		402×367×139	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
11		255×73×59	<p>Vyobrazená páka je ideálním prvkem, který je možné topologicky optimalizovat a následně vyrábět aditivní technologií.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je ocel.</p>

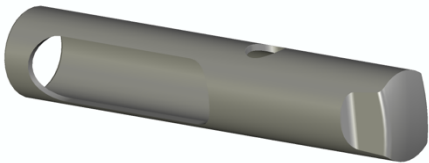

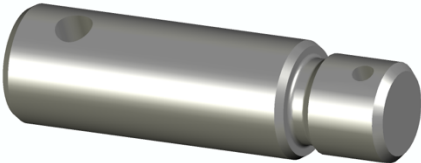
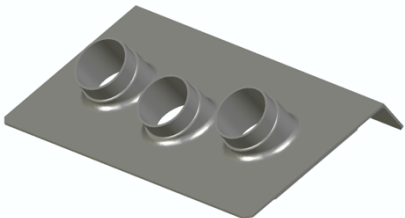
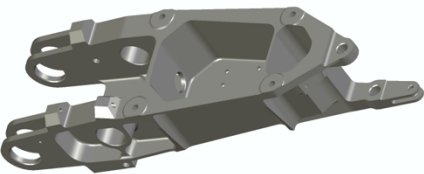


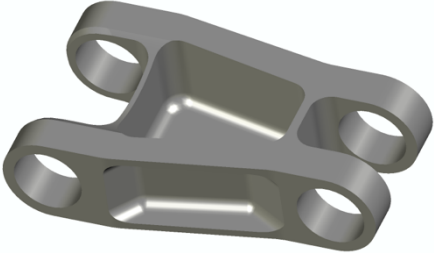
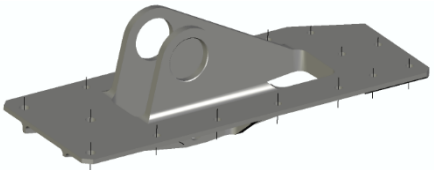

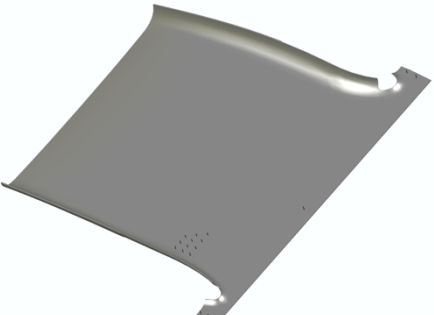
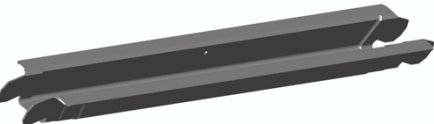
12		126×40×40	Rotační součást s ozubením je dílem nevhodným pro aditivní výrobu. Požadovanou přesnost a povrchovou kvalitu ozubení nelze dosáhnout aditivní technologií.
13		230×38×38	Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.
14		338×338×105	Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu. Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem. Materiálem je hliník.
15		213×36×36	Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.
16		372×121×35	Vyobrazená páka je ideálním prvkem, který je možné topologicky optimalizovat a následně vyrábět aditivní technologií. Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem. Materiálem je ocel.
17		124×26×26	Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.

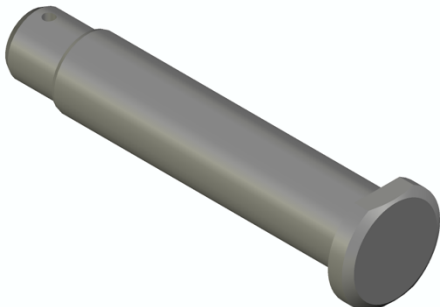


18		248×248×103	<p>Plechový díl, jehož výroba aditivní technologií by neměla žádný přínos.</p> <p>V rámci databáze není možné plechové díly jednoznačně identifikovat.</p>
19		111×26×26	<p>Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.</p>
20		338×338×85	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
21		196×45×45	<p>Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.</p>
22		138×35×30	<p>Rotační součást, kterou by se vzhledem ke složitosti vnitřních tvarů pravděpodobně vyplatilo vyrábět aditivní technologií.</p> <p>Pro výrobu by byla potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je ocel.</p>



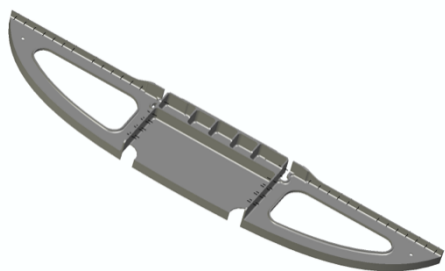
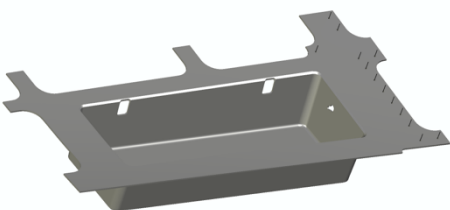
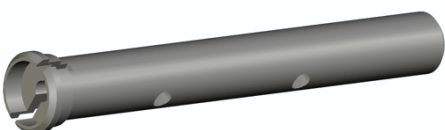
23		152×28×32	<p>Rotační součást, kterou by se vzhledem ke složitosti vnitřních tvarů pravděpodobně vyplatilo vyrábět aditivní technologií.</p> <p>Pro výrobu by byla potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je ocel.</p>
24		71×71×30	<p>Obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit relativně velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
25		52×15×15	<p>Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.</p>
26		271×167×68	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu. Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
27		478×142×114	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možno topologicky optimalizovat a následně vyrábět pomocí aditivní technologie.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>

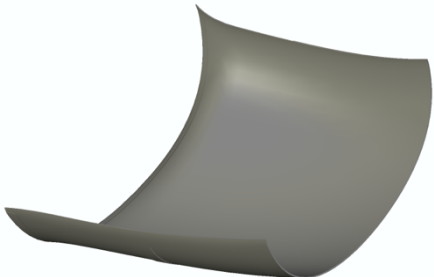
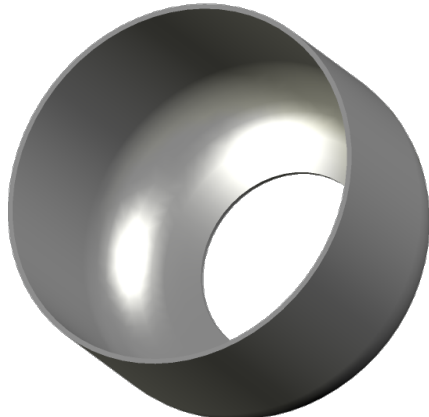

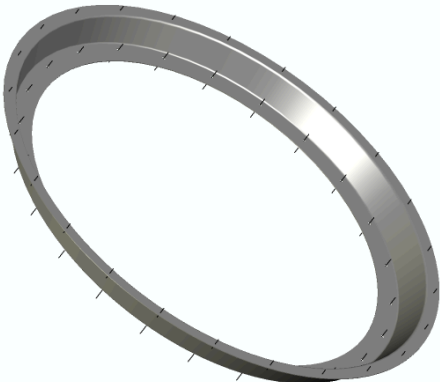
28		145×79×37	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možno topologicky optimalizovat a následně vyrábět pomocí aditivní technologie.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je ocel.</p>
29		251×99×77	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možno topologicky optimalizovat a následně vyrábět pomocí aditivní technologie.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
30		905×718×367	<p>Plechový díl, který se do tohoto finálního zhodnocení neměl na základě nastavených filtrů dostat. Jedná se pravděpodobně o chybu v databázových systémech. Plechové díly se nevyplátí vyrábět aditivní technologií.</p>
31		859×844×89	<p>Plechový díl, který se do tohoto finálního zhodnocení neměl na základě nastavených filtrů dostat. Jedná se pravděpodobně o chybu v databázových systémech. Plechové díly se nevyplátí vyrábět aditivní technologií.</p>
32		970×87×47	<p>Jedná o obráběný díl z plného materiálu. S ohledem na rozměr dílu není realistické uvažovat o aditivní výrobě.</p>

33		119×32×28	Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.
----	---	-----------	--

V Tabulka 27 jsou snímky a rozměry součástí z třetí cenové skupiny. V této skupině se nacházelo 15 dílů ze symetrického páru a 12 duplikátních dílů, takže výsledné zhodnocení je provedeno pouze pro 73 jedinečných součástí.

Tabulka 27: Vizualní vyhodnocení dílů z třetí cenové skupiny.


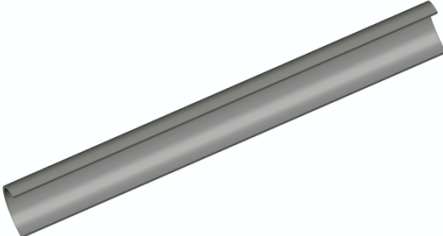
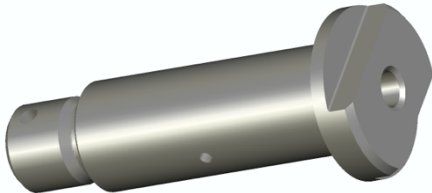
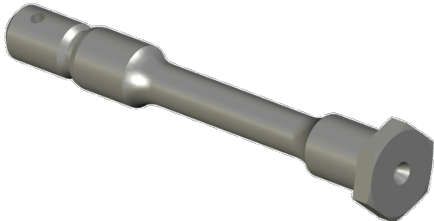
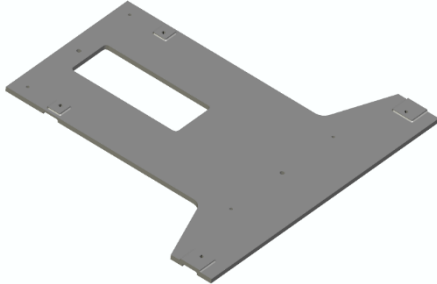
#	Pohled	Rozměry (XYZ) [mm]	Zhodnocení
1		944×177×61	Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu. Pro výrobu je potřeba tiskárna s velkým tiskovým prostorem. Materiálem je hliník.
2		538×251×89	Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu. Pro výrobu je potřeba tiskárna s velkým tiskovým prostorem. Materiálem je hliník.
3		100×16×16	Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.

4		685×670×249	<p>Plechový díl, jehož výroba aditivní technologií by neměla žádný přínos.</p> <p>V rámci databáze není možné plechové díly jednoznačně identifikovat.</p>
5		110×110×76	<p>Plechový díl, který se do tohoto finálního zhodnocení neměl na základě nastavených filtrů dostat. Jedná se pravděpodobně o chybu v databázových systémech. Plechové díly se nevyplátí vyrábět aditivní technologií.</p>
6		179×38×9	<p>Tvarově jednoduchý díl, jehož výroba aditivní technologií by neměla žádný přínos.</p>
7		722×722×55	<p>Plechový díl, který se do tohoto finálního zhodnocení neměl na základě nastavených filtrů dostat. Jedná se pravděpodobně o chybu v databázových systémech. Plechové díly se nevyplátí vyrábět aditivní technologií.</p>

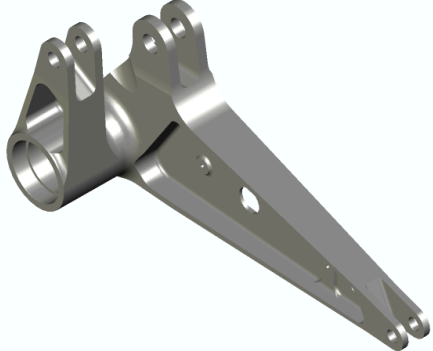
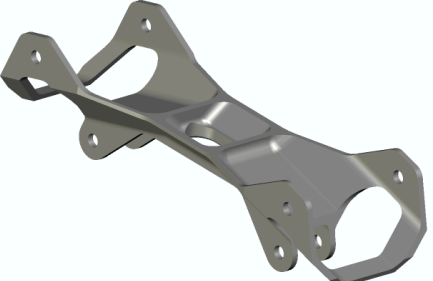
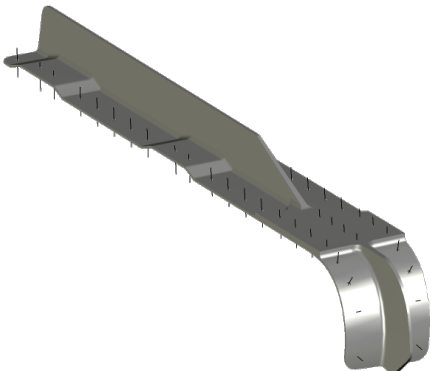
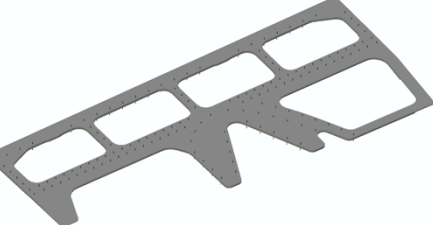


8		54×13×15	Součást, u které je pravděpodobně chybně uvedena cena. Aдитivní výroba by u této součásti neměla smysl.
9		387×232×76	Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu. Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem. Materiálem je hliník.
10		110×110×80	Plechový díl, který se do tohoto finálního zhodnocení neměl na základě nastavených filtrů dostat. Jedná se pravděpodobně o chybu v databázových systémech. Plechové díly se nevyplácí vyrábět aditivní technologií.
11		262×57×57	Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aдитivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.

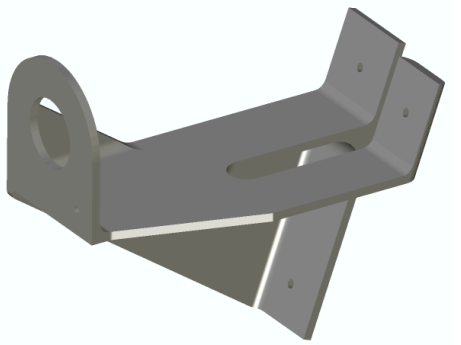
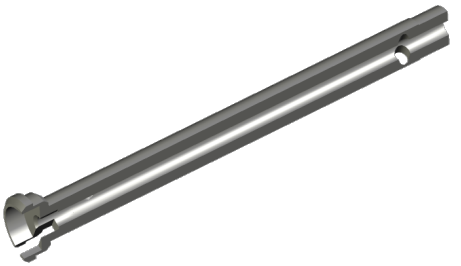

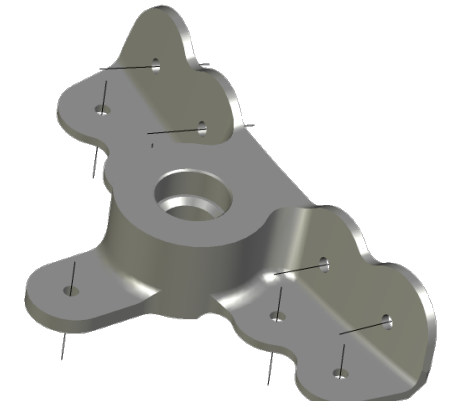


12		284×256×62	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možno topologicky optimalizovat a následně vyrábět pomocí aditivní technologie.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
13		270×40×40	<p>Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.</p>
14		62×25×25	<p>Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.</p>
15		71×14×13	<p>Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.</p>
16		540×580×13	<p>Plechový díl, jehož výroba aditivními technologiemi by neměla žádný přínos.</p> <p>V rámci databáze není možné plechové díly jednoznačně identifikovat.</p>


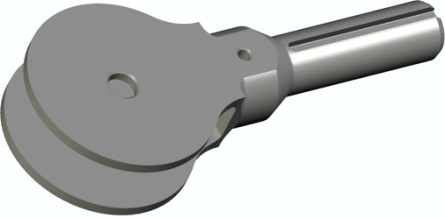
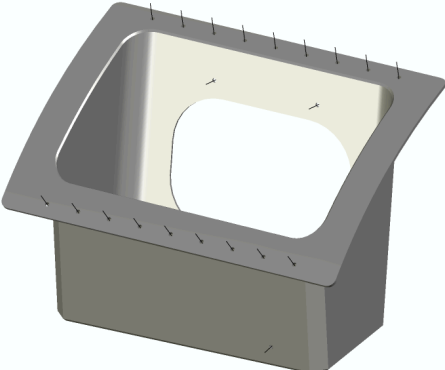
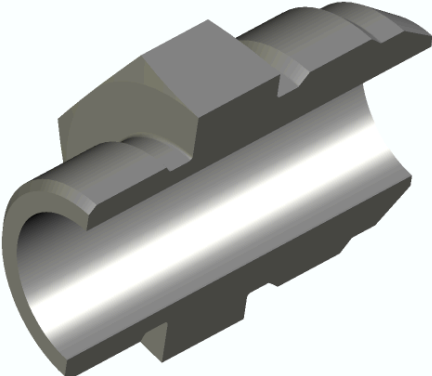


17		330×154×122	<p>Vyobrazená páka je ideálním prvkem, který je možné topologicky optimalizovat a následně vyrábět aditivní technologií.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
18		166×56×45	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možno topologicky optimalizovat a následně vyrábět pomocí aditivní technologie.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
19		555×96×67	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
20		853×380×14	<p>Plechový díl, jehož výroba aditivní technologií by neměla žádný přínos.</p> <p>V rámci databáze není možné plechové díly jednoznačně identifikovat.</p>

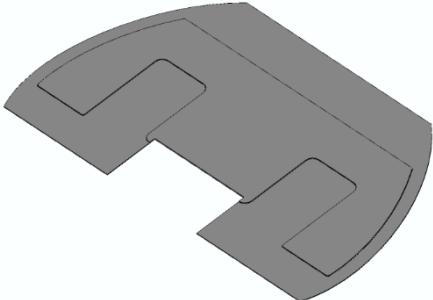
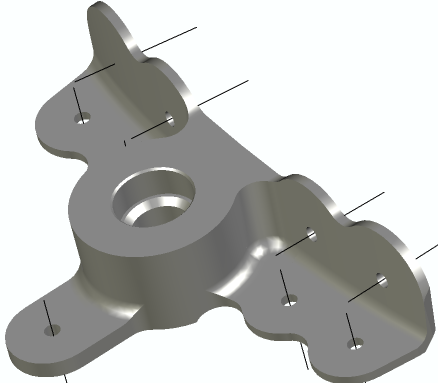
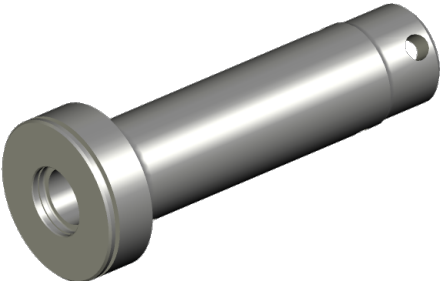
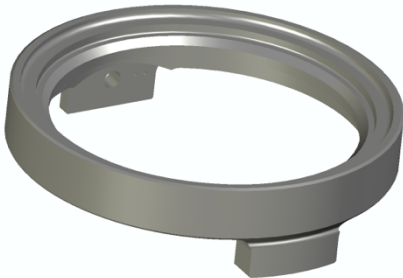


21		92×82×62	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možno topologicky optimalizovat a následně vyrábět pomocí aditivní technologie.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
22		96×15×16	<p>Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.</p>
23		68×60×12	<p>Obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p>
24		87×49×18	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možno topologicky optimalizovat a následně vyrábět pomocí aditivní technologie.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je korozi-vzdorná ocel.</p>

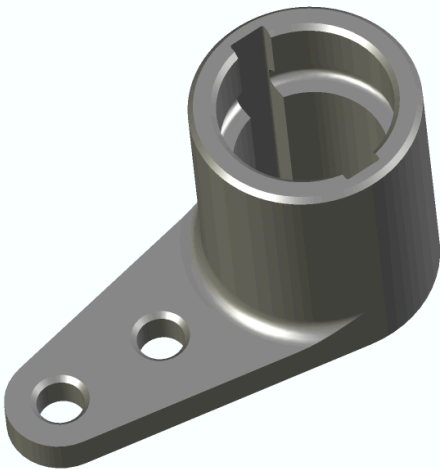
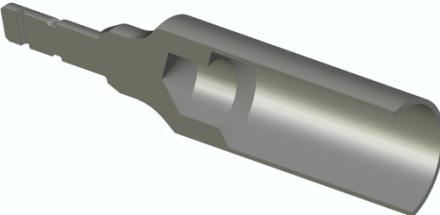
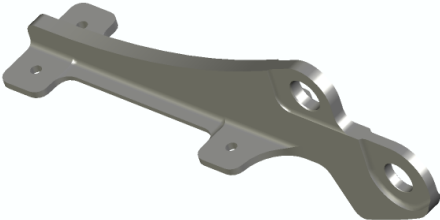
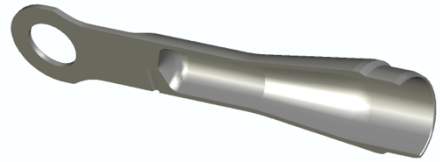


25		690×126×63	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
26		126×52×21	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je korozivzdorná ocel.</p>
27		217×187×127	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
28		50×38×44	<p>Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.</p>

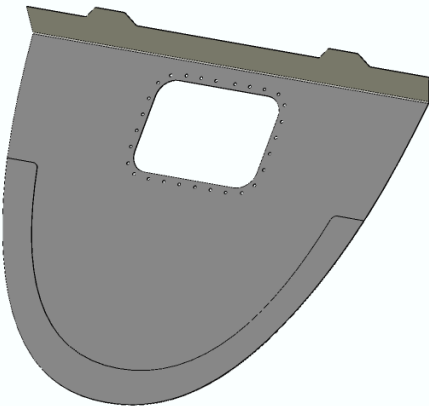
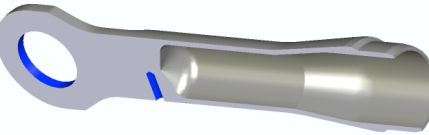
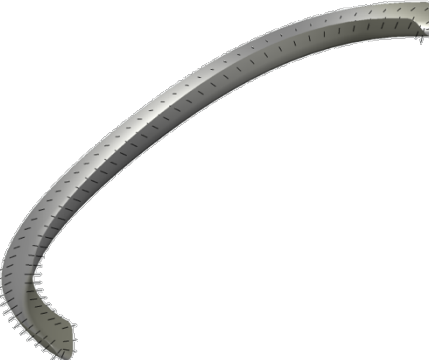
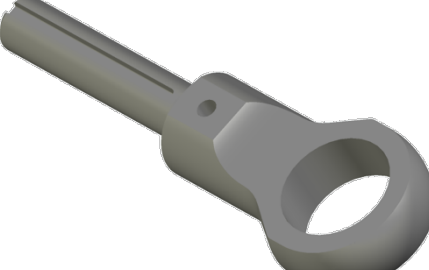


29		948×597×3	<p>Plechový díl, jehož výroba aditivní technologií by neměla žádný přínos.</p> <p>V rámci databáze není možné plechové díly jednoznačně identifikovat a odfiltrovat.</p>
30		86×49×17	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možno topologicky optimalizovat a následně vyrábět pomocí aditivní technologie.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je korozivzdorná ocel.</p>
31		201×75×75	<p>Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.</p>
32		110×110×29	<p>Obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p>


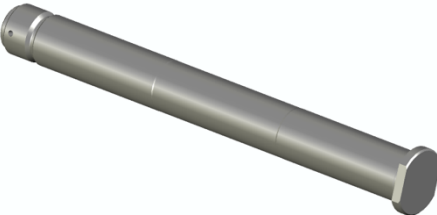

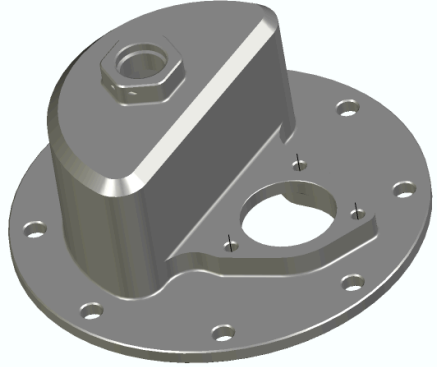
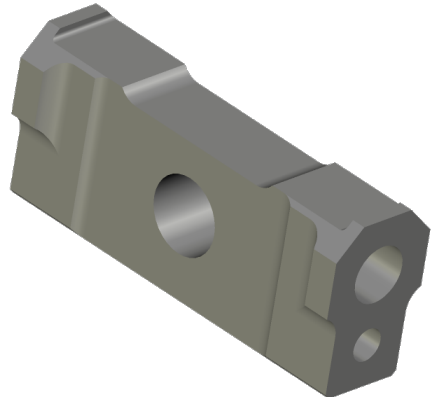


33		50×31×21	<p>Obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
34		122×34×34	<p>Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.</p>
35		209×72×50	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možno topologicky optimalizovat a následně vyrábět pomocí aditivní technologie.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
36		178×40×40	<p>Obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je ocel.</p>


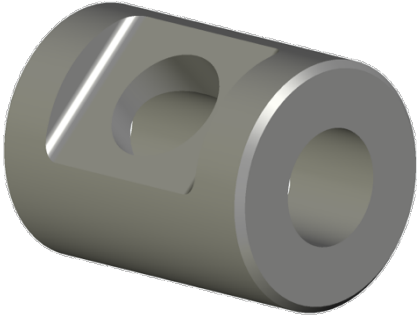
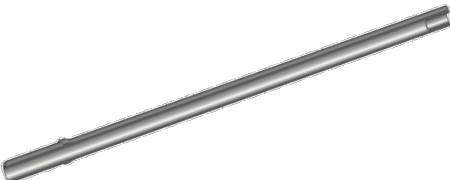



37		763×628×49	<p>Plechový díl, který se do tohoto finálního zhodnocení neměl na základě nastavených filtrů dostat. Jedná se pravděpodobně o chybu v databázových systémech. Plechové díly se nevyplácí vyrábět aditivní technologií.</p>
38		170×40×35	<p>Obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je ocel.</p>
39		747×248×40	<p>Plechový díl, který se do tohoto finálního zhodnocení neměl na základě nastavených filtrů dostat. Jedná se pravděpodobně o chybu v databázových systémech. Plechové díly se nevyplácí vyrábět aditivní technologií.</p>
40		94×28×16	<p>Obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>

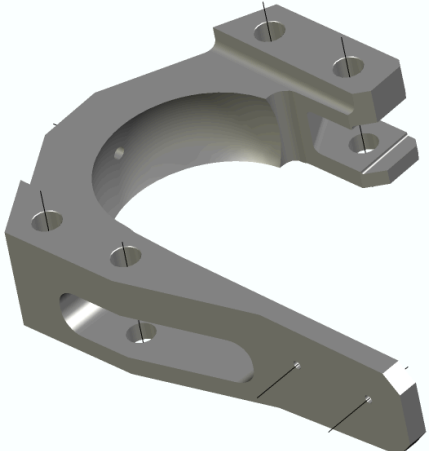
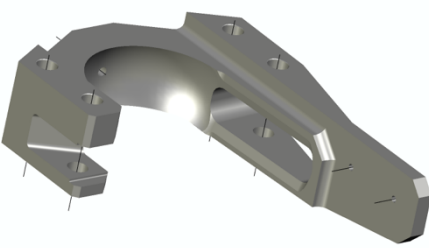
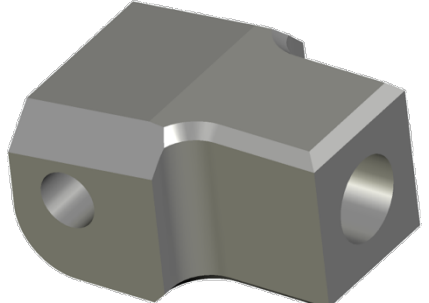
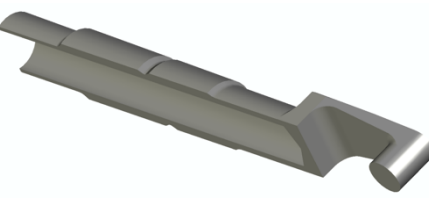


41		135×135×36	Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.
42		306×42×35	Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.
43		208×171×20	Obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu. Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem. Materiálem je ocel.
44		135×131×74	Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu. Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem. Materiálem je hliník.
45		84×36×24	Obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu. Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem. Materiálem je korozi-vzdorná ocel.

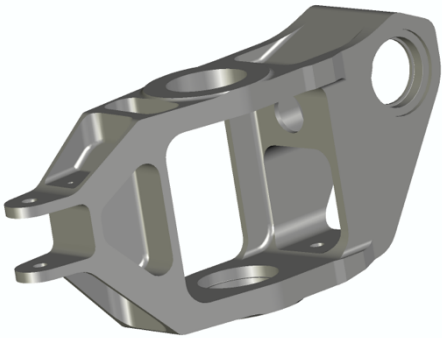

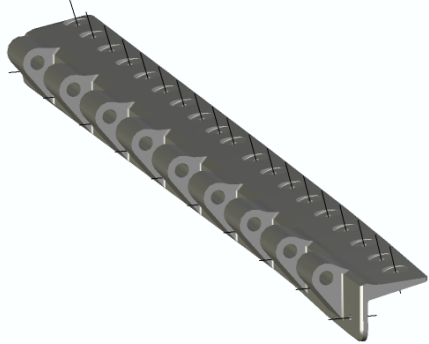

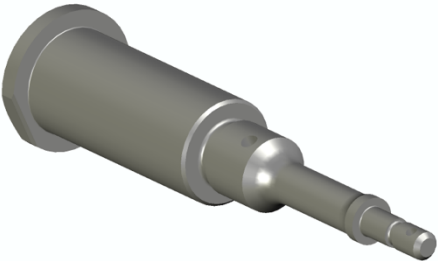


46		105×105×25	Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.
47		23×17×17	Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.
48		325×20×20	Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.
49		81×65×11	Obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu. Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem. Materiálem je korozivzdorná ocel.

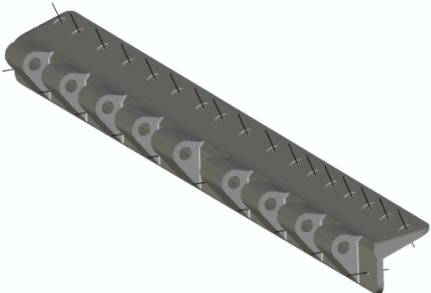
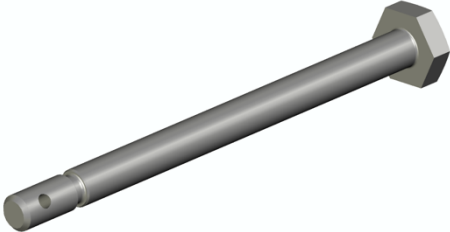

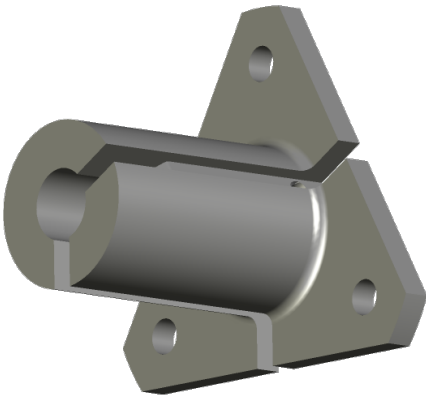


50		157×106×35	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
51		157×105×38	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
52		25×20×14	<p>Obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
53		167×34×24	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je ocel.</p>

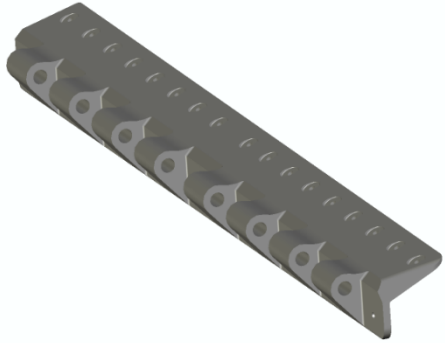


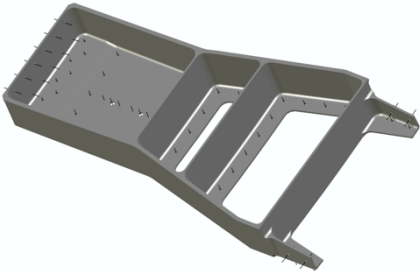


54		291×137×72	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
55		325×25×26	<p>Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.</p>
56		427×41×31	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
57		84×14×11	<p>Obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
58		96×24×23	<p>Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.</p>

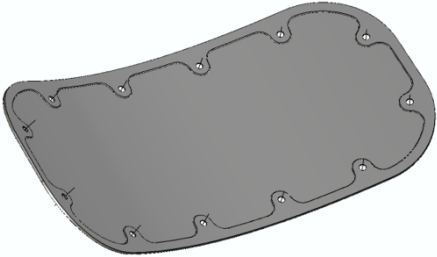
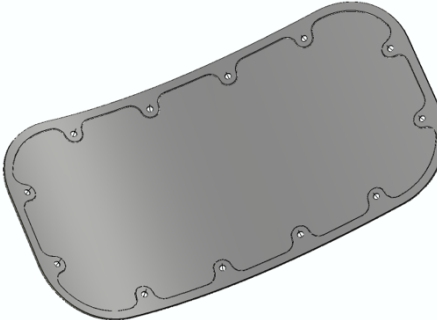
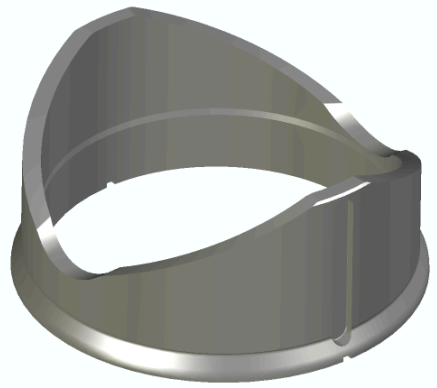
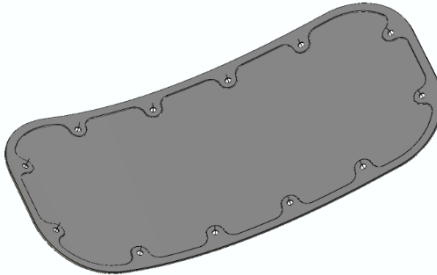



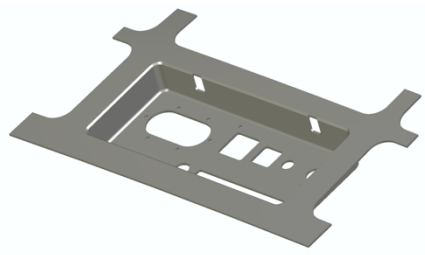
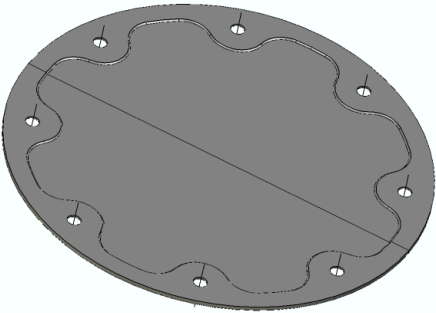
59		409×41×28	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
60		71×11×10	<p>Rotační součást, u které je požadován broušený povrch téměř v celé délce. Aditivní výroba by pro tuto součást neměla přínos.</p>
61		303×138×72	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
62		27×32×37	<p>Obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je bronz.</p>



63		371×42×27	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
64		129×36×25	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
65		40×20×18	<p>Obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna s malým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
66		361×186×52	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>



67		324×153×44	Plechový díl, který se do tohoto finálního zhodnocení neměl na základě nastavených filtrů dostat. Jedná se pravděpodobně o chybu v databázových systémech. Plechové díly se nevyplátí vyrábět aditivní technologií.
68		339×182×45	Plechový díl, který se do tohoto finálního zhodnocení neměl na základě nastavených filtrů dostat. Jedná se pravděpodobně o chybu v databázových systémech. Plechové díly se nevyplátí vyrábět aditivní technologií.
69		84×84×39	Součást, u které by vzhledem k použitému materiálu aditivní výroba neměla smysl. Materiálem je bronz.
70		347×168×45	Plechový díl, který se do tohoto finálního zhodnocení neměl na základě nastavených filtrů dostat. Jedná se pravděpodobně o chybu v databázových systémech. Plechové díly se nevyplátí vyrábět aditivní technologií.
71		76×76×2	Plechový díl, který se do tohoto finálního zhodnocení neměl na základě nastavených filtrů dostat. Jedná se pravděpodobně o chybu v databázových systémech. Plechové díly se nevyplátí vyrábět aditivní technologií.

72		439×236×47	<p>Komplexní obrobek, který by bylo možné vyrábět pomocí aditivní technologie a ušetřit velké množství odpadového materiálu.</p> <p>Pro výrobu je potřeba tiskárna se středně velkým tiskovým prostorem.</p> <p>Materiálem je hliník.</p>
73		150×150×3	<p>Plechový díl, který se do tohoto finálního zhodnocení neměl na základě nastavených filtrů dostat. Jedná se pravděpodobně o chybu v databázových systémech. Plechové díly se nevyplácí vyrábět aditivní technologií.</p>

Tabulka 28: Výsledky vyhodnocení.

Vhodnost technologie	Množství
velké aditivní výrobní systémy	7
středně velké aditivní výrobní systémy	23
malé aditivní výrobní systémy	27
nehodné	52

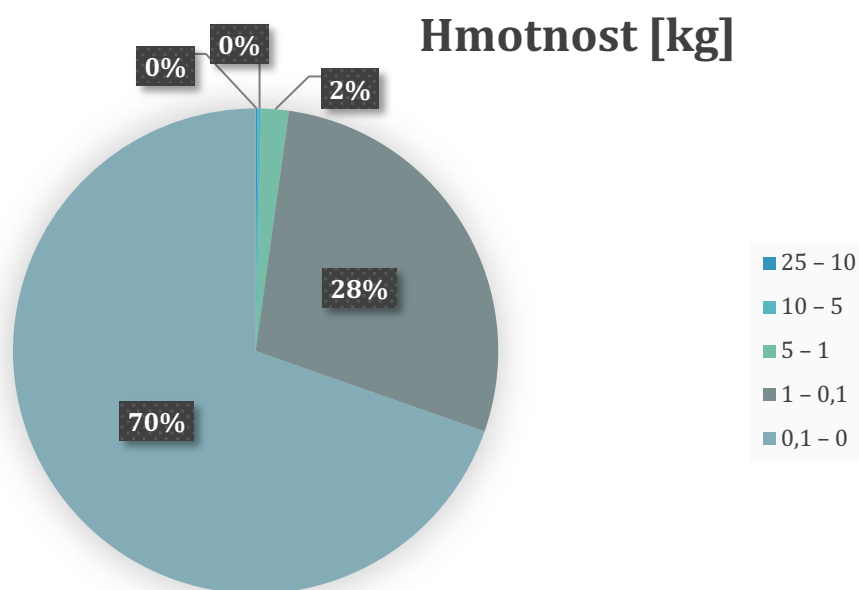
5.2.2.4 Hmotnost

Druhým možným přístupem k problematice zavádění aditivní výroby do společnosti je posuzování z hlediska hmotnosti dílů. V případě, že je třeba ušetřit hmotnost v některé části letounu kvůli optimalizaci vyvážení, je možné díly roztrdit dle hmotnosti a zaměřit se na ty, které mají největší dopad na celkovou hmotnost. Do tohoto kroku vstupuje opět 2 908 dílů, které jsou roztrdily do skupin dle hmotnosti. Z tohoto roztrdily vychází, že největší příspěvek hmotnosti mají díly z prvních tří skupin, tedy konkrétně 64 dílů, jejichž celková hmotnost je 229 kg. Zbylých 2 844 dílů přispívá v součtu k celkové hmotnosti hodnotou 284,6 kg.

Pokud by se společnost zaměřila na tyto díly, byla by schopna v relativně krátkém čase ušetřit hmotnost při malém zásahu do výroby.

Tabulka 29: Počet dílů dle hmotnostní skupiny.

Hmotnost [kg]	Kusy
25 - 10	4
10 - 5	7
5 - 1	53
1 - 0,1	818
0,1 - 0	2021



Graf 24: Počet dílů dle hmotnostní skupiny.

5.2.3 Vyhodnocení skupiny sestav

Do této části vstupuje celkem 1 458 sestav, které lze identifikovat dle prvních dvou znaků čísla položky. Vyhodnocení sestav může být výhodné z pohledu výrazné časové úspory jak ve výrobě, tak při montáži. V případě konvenčně vyráběných dílů a z nich sestavovaných sestav je nutné řídit se zásadami pro konvenční obrábění. Tyto díly je nutno mnohdy několikrát upínat do obráběcího zařízení pro příslušné obráběcí operace, což prodlužuje čas jejich výroby, a tím se i zvyšuje výrobní cena. Zároveň je nutné navrhovat díly podle určitých zásad tak, aby byly vyrobitelné a aby z nich vytvořená sestava byla smontovatelná. V případě nedodržení těchto zásad by byla celá sestava nefunkční.

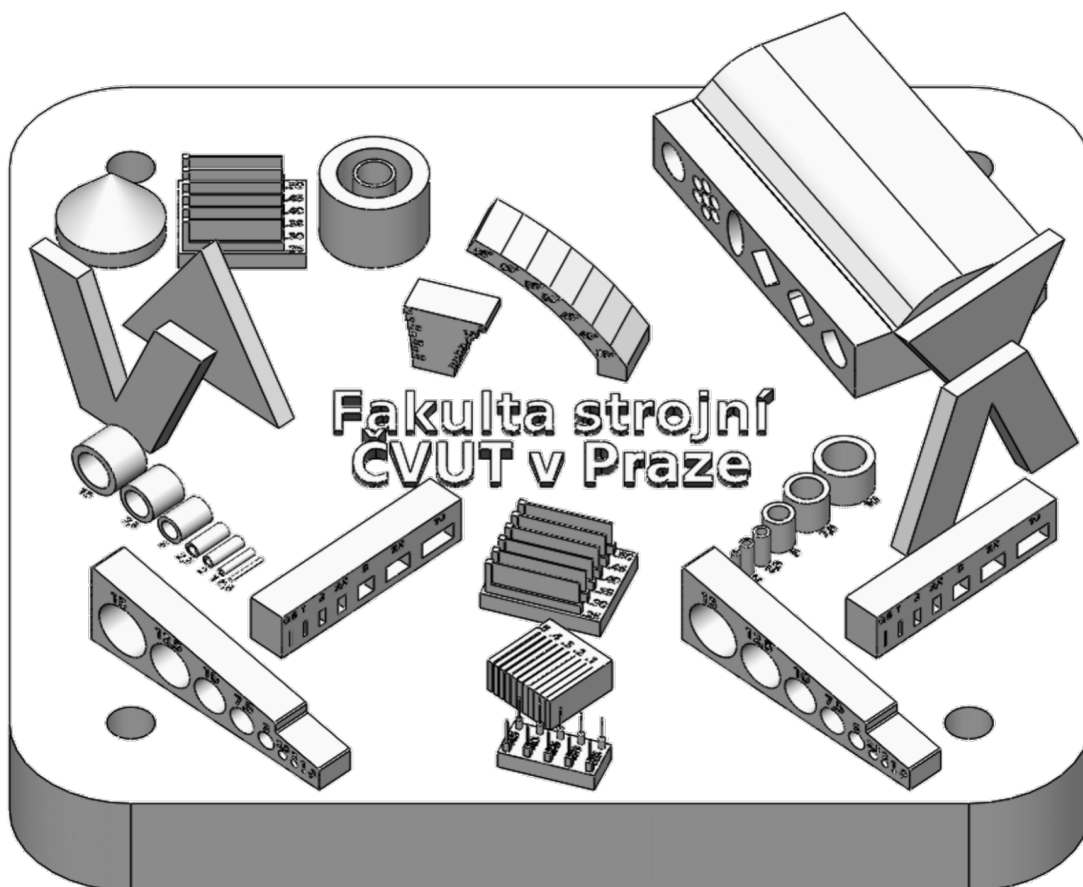
V případě aditivní výroby je možné konstruovat sestavy v jednom kuse, konstruktér není omezen tvarovou složitostí, ale pouze technologickými zásadami aditivní výroby. V případě sjednocení několika dílů sestavy do jednoho funkčního celku dochází k šetření spojovacího materiálu, tedy zejména s tím spojeného šetření ceny, hmotnosti a času montáže. Z důvodu chybějících dat rozměrových obálek sestav nebyla v rámci této práce tato část dokončena.

5.2.4 Vyhodnocení skupiny ostatních dílů

Z důvodu chybějících nebo neaktuálních dat k těmto položkám, byla tato skupina z metodiky vynechána. Pro jejich vyhodnocení by bylo třeba vytvořit zcela odlišnou metodiku.

6 Návrh technologického demonstrátoru

Ačkoliv je aditivní technologie prezentována jako technologie budoucnosti, která umožňuje vytvořit téměř jakýkoliv objekt s libovolným designem a libovolnou geometrií, je nutno podotknout, že i pro tuto technologii existují konstrukční limity, omezení a z nich plynoucí pravidla, které by měli konstruktéři dodržovat. Technologický demonstrátor slouží k předvedení technologicky správných a nesprávných řešení. Jednotlivé modely obsahují specifické konstrukční prvky, na kterých je možné po vytištění spatřit limity aditivní technologie. Pokud není možné se při konstrukčním návrhu těmto prvkům vyhnout, je nutné při přípravě tiskových dat využít podpurné konstrukce, které součást podepřou v kritických místech a umožní tisk bez nežádoucích deformací a imperfekcí. Na Obr. 31 je zobrazena paleta v podobě, v níž bude tištěna. Návrh artefaktů vychází z koncepce výzkumu aditivních technologií na U12134 FS ČVUT a bude sloužit pro jejich zavádění do výuky.

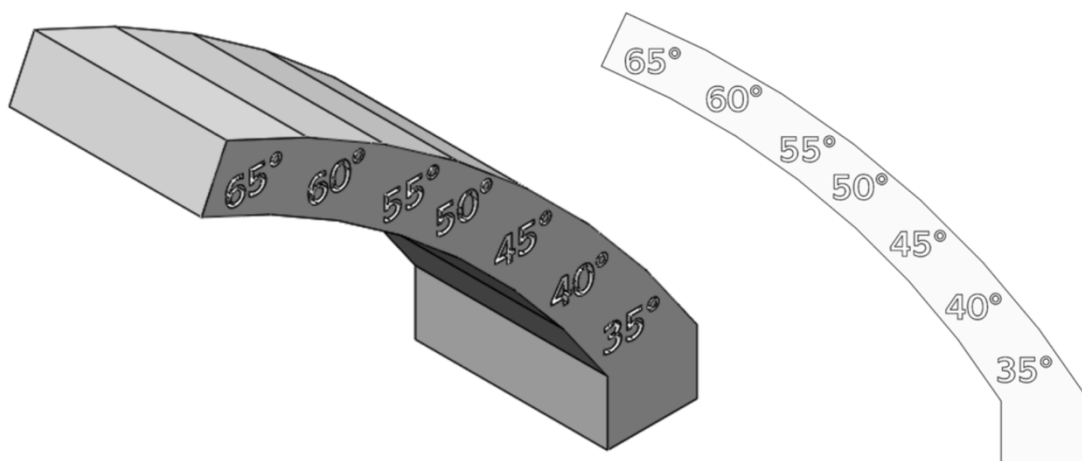


Obr. 31: Tisková paleta se zarovnanými demonstračními prvky.

6.1 Návrh

6.1.1 Sklon stěn

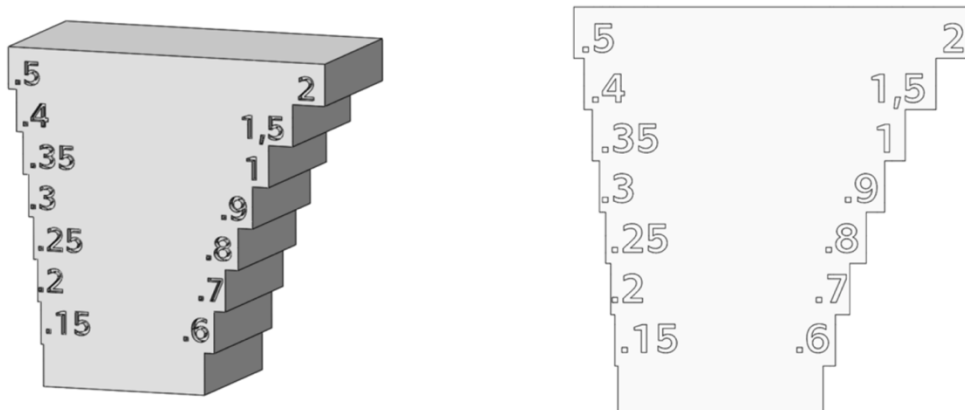
Velký sklon stěn je častým konstrukčním problémem tištěných součástí. Sklon stěny, který lze vytisknout bez použití podpor, se teoreticky pohybuje na hranici 45° měřených od vertikály. Z praktických zkušeností lze říci, že jakýkoliv sklon stěny větší než 0° má přímý vliv na povrchovou kvalitu tištěného dílu, zejména na drsnost jeho povrchu. Při sklonu 45° a více dochází k velkým vadám, které mají zásadní vliv na rozměrovou a tvarovou přesnost. Z tohoto důvodu je při sklonu stěny větším než 45° doporučeno využívat podpurné konstrukce, zajišťující bezproblémové dokončení tisku. Artefakt, na němž bude možné ověřit limitní hodnotu sklonu stěn, je na Obr. 32.



Obr. 32: CAD model artefaktu pro zkoušku sklonu stěn.

6.1.2 Převisy

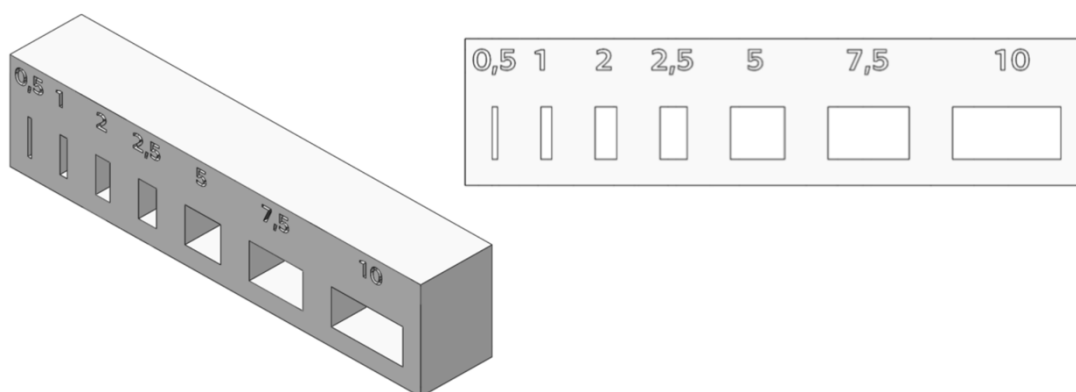
Převís je prvkem, jehož hlavním znakem je náhlá změna geometrie při tisku oproti předchozí vrstvě. U převisu o maximálním rozměru 0,5 mm zpravidla není třeba využívat podpurné konstrukce a prvek je tzv. samonosný. U převisů s rozměrem větším než 0,5 mm je třeba využívat podpurné konstrukce, které zajistí bezchybné vytištění s požadovanými vlastnostmi. Artefakt, na kterém bude možno ověřit limitní hodnotu převisu, je na Obr. 33.



Obr.33: CAD model artefaktu pro zkoušku převisů.

6.1.3 Mosty

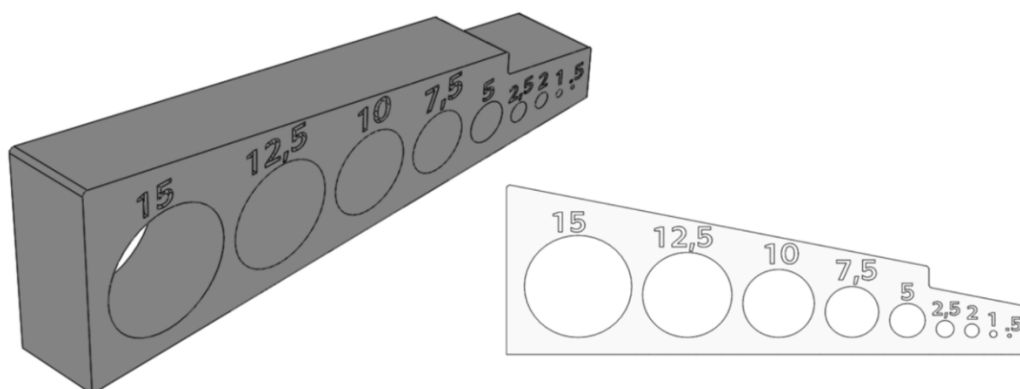
Mosty jsou podobným prvkem jako převisy s tím rozdílem, že nemají volný konec, ale mají oboustrannou oporu. Z tohoto důvodu je možné očekávat uspokojivé výsledky tisku bez využití podpůrné konstrukce až do rozměru mostu 2–2,5 mm. Artefakt, na němž bude možno ověřit limitní hodnotu mostu, je na Obr. 34.



Obr.34: CAD model artefaktu pro zkoušku schopnosti přemostění.

6.1.4 Díry

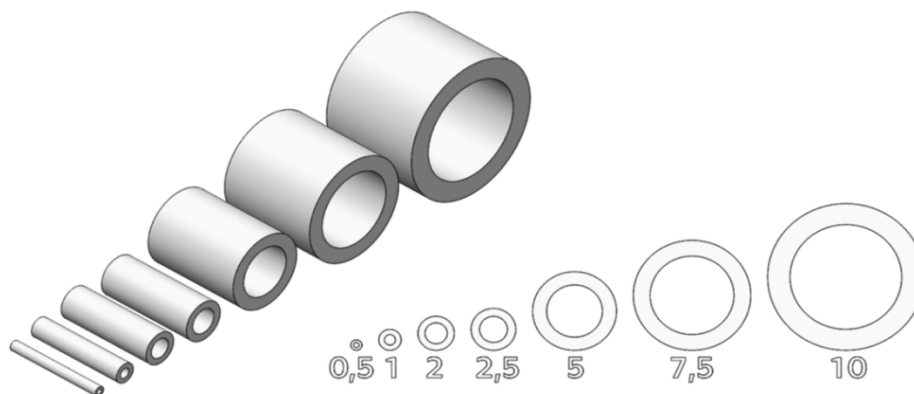
Díry v horizontální poloze je možné vytisknout bez podpůrné konstrukce do průměru přibližně 5 mm. Nad tuto hodnotu dochází k deformacím, které zásadně ovlivňují výsledný tvar a rozměry. Artefakt, na němž bude možno ověřit limitní průměr, je na Obr. 35.



Obr.35: CAD model artefaktu pro zkoušku maximálního průměru díry.

6.1.5 Potrubí / prstence

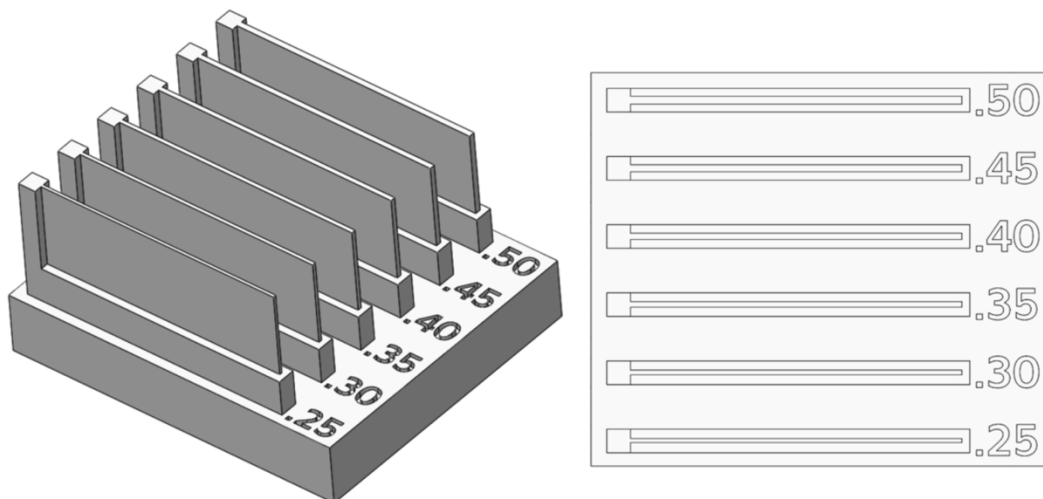
Potrubí nebo prstence jsou obdobným případem jako díry, akorát s tím rozdílem, že u tohoto prvku má na výslednou geometrii a rozměry vliv tloušťka stěn. Trubky nejsou pevně ukotveny v masivním celku, a tak se dá očekávat tendence ke zmenšování/svírání průměru v průběhu stavby. Artefakt, z něhož bude možno vyhodnotit míru deformací u jednotlivých průměrů, je na Obr. 36.



Obr.36: CAD model artefaktu pro vyhodnocení míry deformací kruhového profilu trubek.

6.1.6 Tloušťka stěn

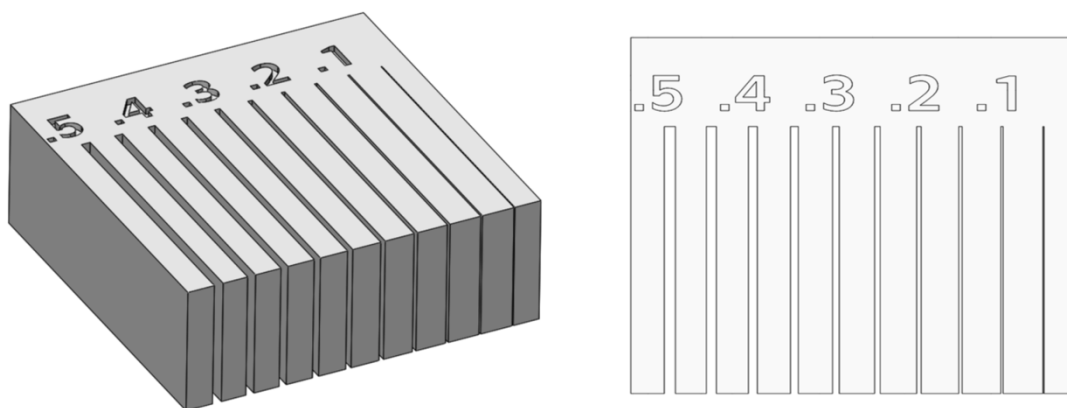
Limitující tloušťka stěn je rozdílná dle použitého typu prášku, tiskárny a parametrů. U většiny tiskáren se spodní limit tloušťky stěn pohybuje v oblasti 0,25–0,35 mm. Pod touto hodnotou vznikají velké deformace a fatální vady. Artefakt, z něhož bude možno vyhodnotit limitní tloušťku stěn, je na Obr. 37.



Obr.37: CAD model artefaktu pro vyhodnocení limitní tloušťky stěn.

6.1.7 Rozměr štěrbin

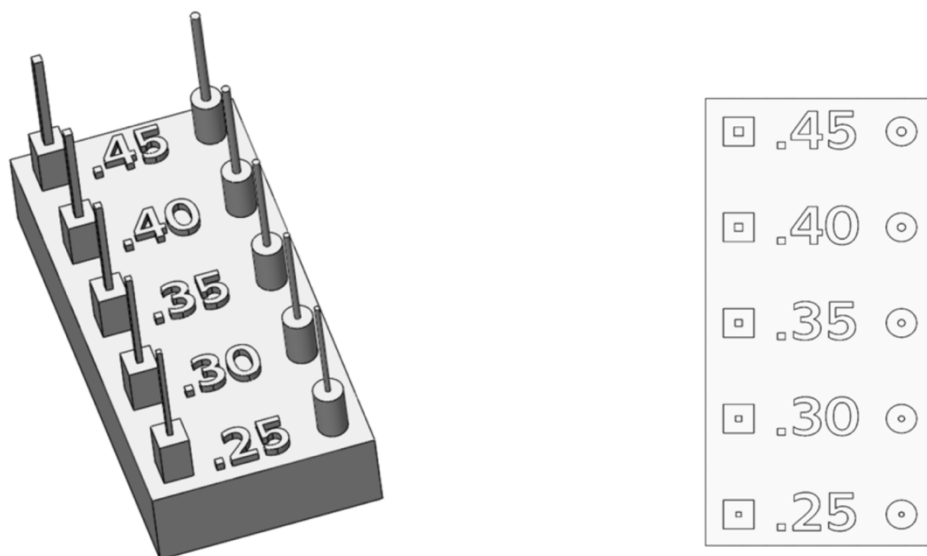
Minimální tloušťka štěrbin se pohybuje zpravidla v rozmezí 0,1–0,15 mm. Tato hodnota je opět silně ovlivněna druhem použitého prášku, tiskárny a tiskových parametrů. Artefakt, z něhož bude možno vyhodnotit minimální rozměr štěrbin, je na Obr. 38.



Obr.38: CAD model artefaktu pro vyhodnocení limitního rozměru štěrbin.

6.1.8 Rozměr kolíku

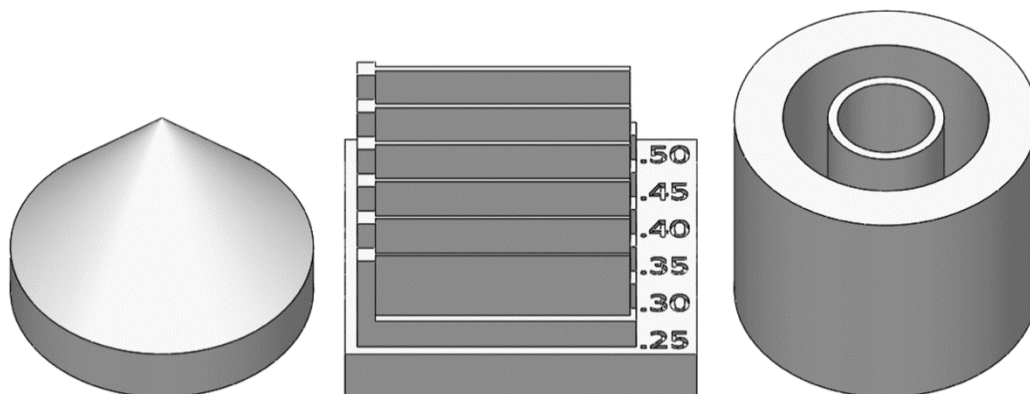
U tohoto artefaktu bude možné vyhodnotit minimální velikost kolíku v příčném směru. Zároveň bude možné vyhodnotit vliv tvaru kolíku na minimální velikost. Artefakt s čtvercovým a kruhovým průřezem s různými rozměry kolíků je na Obr. 39.



Obr.39: CAD model artefaktu pro vyhodnocení limitního rozměru a tvaru pinu.

6.1.9 Rozkmitání nanášeče

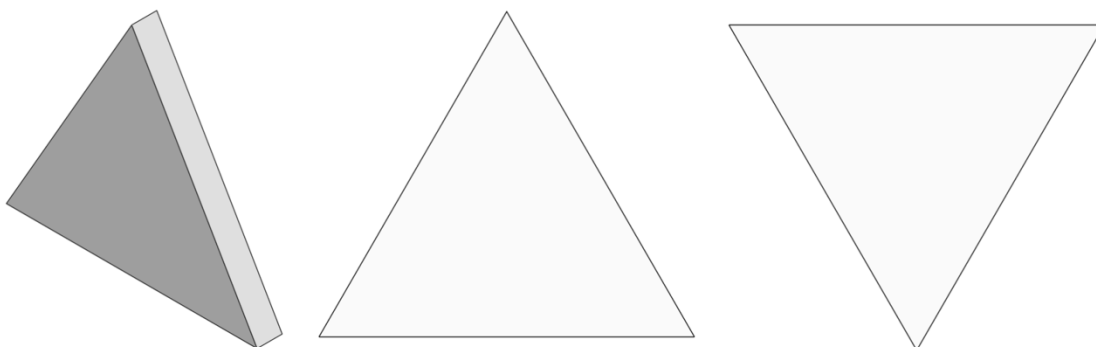
Na této sestavě artefaktů bude možné sledovat míru ovlivnění prvků vlevo a vpravo na Obr. 40 způsobenou úmyslným rozkmitáním nanášeče. V případě rovnoběžného uspořádání prvků na paletě dochází k jeho nežádoucímu rozkmitání, a následnému poškození nanesené vrstvy prášku, které se projeví vadami na výtisku.



Obr.40: CAD model sestavy artefaktů pro vyhodnocení vlivu rozkmitání nanášeče prášku.

6.1.10 Pnutí

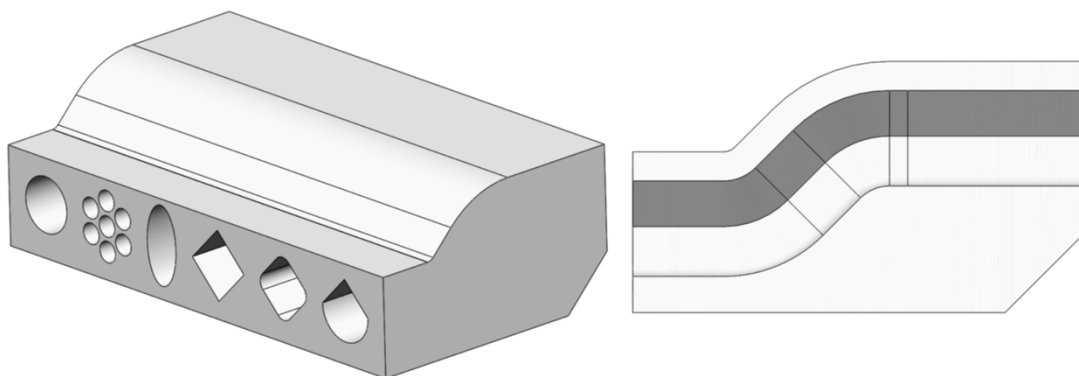
Na Obr. 41 je zobrazený artefakt, na němž bude možné zpozorovat vznikající pnutí při tisku. Při orientaci, která je uvedena na Obr. 41 uprostřed, se dá očekávat vznik velkého pnutí, které může způsobit velké deformace výtisku.



Obr.41: CAD model pro vyhodnocení vznikajícího pnutí.

6.1.11 Řešení kanálu

Na artefaktu na Obr. 42 jsou znázorněná různá konstrukční řešení kanálů. Všechny vyobrazené kanály mají stejnou průřezovou plochu. V případě použití kanálu kruhového průřezu bez podpůrné konstrukce může dojít ke značným deformacím, které mohou ovlivnit průtok nebo dynamiku kapalin. Ostatní tvary kanálů jsou navrženy tak, aby nebylo nutné používat podpůrné konstrukce a byly minimalizovány možné vady, které by bylo téměř nemožné dodatečně odstranit.



Obr.42: CAD model různých možností řešení kanálů.

6.2 Realizace tisku

Převedení počítačového modelu na reálný výrobek zahrnuje několik na sebe navazujících kroků. Vstupem jsou CAD data získána z příslušného softwaru pro počítačové konstruování a výstupem je fyzická aditivně vyrobená součást. Tisk byl realizován na tiskárně M2 cusing single laser od společnosti ConceptLaser.

6.2.1 Příprava

V rámci přípravy tiskových dat se vyexportovaný soubor z CAD softwaru ve formátu STL importuje do softwaru dodávaného nebo doporučeného výrobcem. Pro přípravu tohoto tisku byl použit software Magics ve verzi 23.0 od společnosti Materialise. V tomto softwaru je definována poloha jednotlivých prvků na stavební desce, jsou vytvořeny příslušné podpurné konstrukce v požadovaných místech a nastaveny tiskové parametry (Tabulka 30). Následně jsou tyto parametry použity k rozdělení modelu do jednotlivých vrstev a vytvoření drah laseru. Výsledný návrh je zobrazen na Obr. 43.

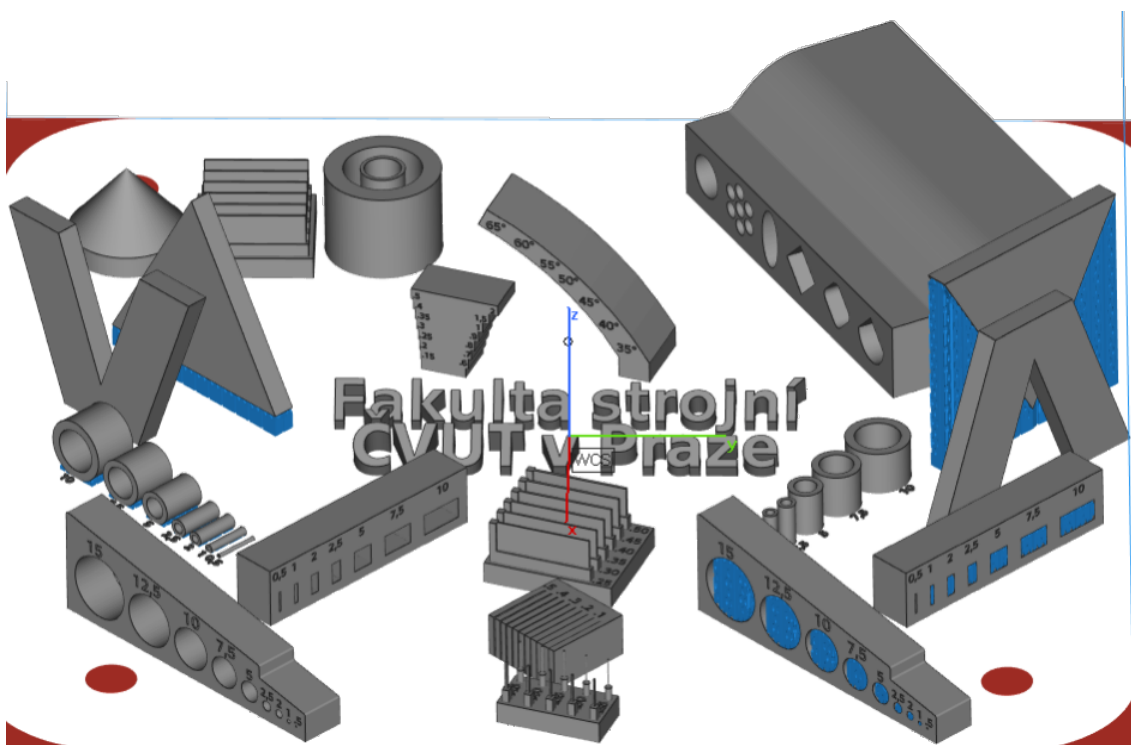
Tabulka 30: Použité parametry tisku.

typ	výkon laseru [W]	rychlost laseru [mm/s]	průměr prsku [μm]	rozteč šrafovaní [μm]	výška vrstvy [μm]
podpurná konstrukce	200	1600	50	-	25
kontury	200	1250	100	-	25
šrafovaní	370	1400	190	112	25

Příprava samotného aditivního výrobního systému zahrnuje následující úkony:

- vyčištění tiskové a přípravné komory (~30 minut)
- prosetí potřebného prášku (~60 minut)
- montáž tiskové desky (~10 minut)
- kontrola a případná výměna nanášeče prášku (~30 minut)
- seřízení nanášeče na správnou výšku (~10 minut)
- zarovnání os přístroje (~10 minut)
- zaplnění zásobovací komory prosetým práškem (~50 minut)

- vytvoření a kontrola první vrstvy prášku na tiskové desce (~20 minut)
- přesunutí stolu do tiskového prostoru (~5 minut)
- inertizace tiskového prostoru (~30-90 minut)
- přenesení a načtení tiskových dat (~10 minut)
- ručně řízené vypálení první vrstvy tisku (~10 minut)
- spuštění tisku



Obr.43: Demonstrátor s podpůrnými konstrukcemi v požadovaných místech.

6.2.2 Materiál

Pro tisk technologického demonstrátoru byl zvolen materiál CL 31AL dle značení výrobce. Jedná se o práškový materiál ze slitiny hliníku AlSi10Mg s chemickým složením viz Tabulka 31, mechanickými a fyzikálními vlastnostmi viz Tabulka 32.

Tabulka 31: Chemické složení prášku CL 31 AL.[72]

	Si	Mg	Fe	Mn	Ti	Cu	Zn	C	Ni	Pb	Sn
obsah [%]	9-11	0,2-0,45	<0,55	<0,45	<0,15	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05

Tabulka 32: Mechanické a fyzikální vlastnosti (hodnoty po tepelném zpracování).

	90°	45°	0°
Mez kluzu [Mpa]	211 ± 4	215 ± 3	205 ± 3
Pevnost v tahu [MPa]	329 ± 4	346 ± 3	344 ± 2
Prodloužení [%]	9±1	7±1	6±1
Youngův modul [Mpa]	75-103	75-103	75-103
Tepelná vodivost [W/mK]	120-180	120-180	120-180
Koeficient tepelné rozpínivosti [K⁻¹]	20 * 10 ⁻⁶	20 * 10 ⁻⁶	20 * 10 ⁻⁶

6.2.3 Tisk

Samotný tisk celého demonstrátoru trval 34 hodin a 18 minut. Tisk proběhl dle očekávání a na většině artefaktů se projevily předpokládané vady způsobené zvoleným konstrukčním návrhem. Celý výtisk je možné vidět na Obr. 44. Z demonstrátoru je patrné, že největší problém způsobily velmi malé prvky. Fatální vady jsou patrné např. u tenkých žebér, kolíků a potrubí malého průměru. Detailní vyhodnocení jednotlivých artefaktů na technologickém demonstrátoru bude součástí dalšího výzkumu na ústavu 12134.



Obr.44: Vytištěný technologický demonstrátor.

7 Závěr

Aditivní technologie jsou nezastupitelnými technologiemi současnosti a v blízké budoucnosti se dá očekávat jejich rozšíření do více průmyslových odvětví, než ve kterých je můžeme nalézt dnes. Využití těchto technologií musí být vzhledem k jejich finanční náročnosti odůvodněné a vyráběné produkty dostatečně optimalizované, aby byl využit potenciál, který tyto technologie nabízejí.

V první kapitole byl shrnut historický vývoj aditivních technologií jak v jejich obecném pojetí, tak i technologií zaměřených přímo na kovové materiály. V rámci této části byl zároveň popsán aplikační potenciál těchto technologií v dnešní době. Jejich reálné využití lze nalézt v řadě odvětví, kde už dnes mají své nezastupitelné místo. Jako příklad lze jmenovat medicínu nebo oblast výroby forem s konformním chlazením, kde jsou aditivní technologie už prakticky nenahraditelné. Závěrem této části byly popsány možné způsoby výroby kovových prášků používaných v aditivních systémech a vlastnosti, které je možné u těchto prášků vyhodnocovat a sledovat.

Ve druhé kapitole byly popsány v současnosti nejpoužívanější aditivní systémy na principu spékání práškových částic a nově vyvíjené aditivní systémy s velkým potenciálem do budoucna. V další části byla zpracována rešerše vlivu nastavení tiskových parametrů na výsledné vlastnosti výtisku. Byl sledován vliv nastavení tloušťky vrstvy prášku, výkonu laseru, průměru laserového paprsku, rozteče šrafování a rychlosti skenování laserem na vlastnosti, jako je rozměrová a geometrická přesnost, textura povrchu, porozita a únavová životnost.

V rámci další kapitoly byla zpracována metodika zavádění aditivní výroby pro vybranou leteckou společnost, pomocí které je možné systematicky vybrat součásti vhodné pro aditivní výrobu, které se doposud vyráběly konvenčními technologiemi výroby. Pomocí této metodiky se podařilo zredukovat databázi čítající tisíce součástí

na několik stovek. V závěru byly nastíněny možné přístupy, jakými může tato společnost s vybranými součástmi naložit. První variantou je volba součástí dle výrobních nákladů při konvenční výrobě a druhou variantou je výběr dle hmotnosti součástí, kde je možno hmotnost vybraných součástí redukovat např. pomocí topologické optimalizace.

V poslední kapitole byl navržen technologický demonstrátor s řadou artefaktů, na nichž jsou ukázány technologické a konstrukční možnosti a limity aditivních technologií. Do artefaktů byly zakomponovány prvky jako např. proměnlivý sklon stěn, různé velikosti převisů, mostů, děr, potrubí, tloušťek stěn atd. Dále byly navrženy prvky, na kterých byly zobrazeny možnosti různého řešení kanálů a úprava orientace součásti pro minimalizaci pnutí. Tato část může dobře posloužit konstruktérům s dlouholetými návyky na konvenční výrobu, kterým může pomoci s uvědoměním si možností a limitů aditivních technologií.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LONJON, Capucine. The history of 3d printer: from rapid prototyping to additive fabrication. Sculpteo [online]. 2017 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>
- [2] History of 3D Printing – When Was 3D Printing Invented?. ALL3DP [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [3] Aditivní technologie - Concept Laser - DMLM. In: Misan s.r.o. [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <http://www.misan.cz/aditivni-technologie/obsah-kategorie/aditivni-technologie/concept-laser---dmlm/>
- [4] Systems and Equipment for Metal Manufacturing. In: EOS [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: https://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment
- [5] 3D Printers: SOLUTIONS FOR PROTOTYPING TO PRODUCTION, IN PLASTICS AND METALS. In: 3D SYSTEMS [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/3d-printers>
- [6] Metal additive manufacturing (3D printing) systems. In: RENISHAW [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/metal-additive-manufacturing-3d-printing-systems--37011>
- [7] Práškové lože. In: DMG MORI [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://cz.dmg-mori.com/produkty/stroje/aditivni-vyroba/praskove-loze>
- [8] SLM@ MACHINES. In: SLM SOLUTIONS [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://www.slm-solutions.com/en/products/machines/selectivelasermeltingmachines/>
- [9] Systémy aditivní výroby. In: TRUMPF [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/systemy-aditivni-vyroby/
- [10] History of additive manufacturing: by Terry Wohlers and Tim Gornet [online]. WOHLERS ASSOCIATES, 2014, 2014 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <http://www.wohlersassociates.com/history2014.pdf>
- [11] GOLDBERG, Dana. History of 3D Printing: It's Older Than You Are (That Is, If You're Under 30). MANUFACTURING [online]. 2018, 13 April 2018 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/redshift/history-of-3d-printing/>
- [12] Metal 3D Printing: Where are We Today?. AMFG [online]. 2019, 19 February 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2019/02/19/metal-3d-printing-where-are-we-today/>
- [13] History of 3D Printing – When Was 3D Printing Invented?. ALL3DP [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [14] The history of 3d printer: from rapid prototyping to additive fabrication. Sculpteo [online]. 2019, 1 March 2017 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>

- [15] News: Selective Laser Sintering, Birth of an Industry. The University of Texas At Austin [online]. 2012, 6 December 2012 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry>
- [16] History of additive manufacturing: by Terry Wohlers and Tim Gornet. Wohlers Report 2016 [online]. WOHLERS ASSOCIATES, 2016, 2016 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://www.wohlersassociates.com/history2016.pdf>
- [17] Frazier, W.E. J. of Materi Eng and Perform (2014) 23: 1917. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- [18] ROWE, Jeff. Wohlers Report 2018: AM Grows Overall With Metal Rising. MCADCAFÉ [online]. 3 May 2018 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://www10.mca-dcafe.com/blogs/jeffrowe/2018/05/03/wohlers-report-2018-am-grows-overall-with-metal-rising/>
- [19] Wohlers Report 2018. WOHLERS ASSOCIATES, 2018 [cit. 2019-03-15]. ISBN 978-0-9913332-4-0.
- [20] WOHLERS, Terry. Wohlers Talk: AM Material Sales Growth [online]. 2018, 11 March 2018 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <http://wohlersassociates.com/blog/2018/03/am-material-sales-growth/>
- [21] Wohlers Report 2018. WOHLERS ASSOCIATES, 2018 [cit. 2019-03-15]. ISBN 978-0-9913332-4-0.
- [22] EATON, Renee. What's the Difference Between SLS and SLM?. RapidMade [online]. 2014, 30 June 2014 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <https://www.rapidmade.com/rapidmade-blog/2014/6/30/ycjnxytvt8n85gqutk5wj67cmx4t7>
- [23] EVANS, John. DMLS: A BUMPY ROAD IN HISTORY. Design&Motion [online]. 2014, 10 November 2014 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <https://designandmotion.net/design-2/manufacturing-design/dmls-a-little-history/>
- [24] In: Mendelova univerzita v Brně [online]. [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=5824
- [25] CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu Sing LIM. Rapid prototyping: principles and applications. 2nd ed. New Jersey: World Scientific, c2003. ISBN isbn981-238-120-1.
- [26] Rapid prototyping in cardiac disease. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-53522-7.
- [27] Available Materials for Metal Additive Manufacturing: Characteristics & Applications. In: Farinia Group [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.farinia.com/additive-manufacturing/3d-materials/characteristics-and-applications-of-available-metals-for-additive-manufacturing>
- [28] Metal powders for AM. In: RENISHAW [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/metal-powders-for-am--31457>
- [29] SHINDE, Mahesh S a Kishor M ASHTANKAR. Additive manufacturing–assisted conformal cooling channels in mold manufacturing processes. Advances in Mechanical Engineering [online]. 2017, 9(5) [cit. 2019-04-07]. DOI: 10.1177/1687814017699764. ISSN 1687-8140. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1687814017699764>

- [30] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [31] WANG, Yu, Kai-Min YU, Charlie C.L. WANG a Yunbo ZHANG. Automatic design of conformal cooling circuits for rapid tooling. *Computer-Aided Design* [online]. 2011, 43(8), 1001-1010 [cit. 2019-04-07]. DOI: 10.1016/j.cad.2011.04.011. ISSN 00104485. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448511001060>
- [32] WOHLERS, Terry. Wohlers Talk: Design for AM in Montreal. In: WOHLERS ASSOCIATES [online]. 20 May 2018 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <http://wohlersassociates.com/blog/category/3d-printing/page/3/>
- [33] MIKA, Salmi. Medical applications of additive manufacturing in surgery and dental care [online]. 2013 [cit. 2019-04-20]. ISBN 978-952-60-5496-4.
- [34] Life expectancy: Life expectancy for men and women. In: Worlddata.info [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.worlddata.info/life-expectancy.php>
- [35] WHITE, Maddy. 3D printed bone implants could revolutionise medical industry. In: THE MANUFACTURER [online]. 9 July 2018 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.themanager.com/articles/3d-printed-bone-implants-could-revolutionise-medical-industry/>
- [36] SAUNDERS, Marc. Lightweight Lattices Liberate New Product Performance. In: ENLIGHTEN [online]. 10 April 2017 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://altairenligheten.com/opinion/lightweight-lattices-liberate-new-product-performance/>
- [37] A Complete Guide to Rapid Prototyping. In: GE Additive [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/information/rapid-prototyping>
- [38] COOPER, Kenneth G. Rapid prototyping technology: selection and application. New York: Marcel Dekker, c2001. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.). ISBN 0824702611.
- [39] STL. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/STL>
- [40] WANG, Wanlong, Henry W. STOLL a James G. CONLEY. Rapid tooling guidelines for sand casting. London: Springer, c2010. Mechanical engineering series (Berlin, Germany). ISBN isbn978-1-4419-5730-6.
- [41] NEE, Andrew Y C. Handbook of manufacturing engineering and technology. New York: Springer, 2014. ISBN 978-1-4471-4670-4.
- [42] TMS 2017 146th Annual Meeting & Exhibition Annual Meeting Supplemental Proceedings. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 9783319514925.
- [43] Oil Gas: Boehler Welding [online]. In: . VOESTALPINE [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: https://www.voestalpine.com/oilandgas/content/download/25602/file/13_voestalpine_Oil_Gas_voestalpine_Boehler_Welding_3DWires.pdf
- [44] Svařování pod tavidlem. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Svařování%3AD_pod_tavidlem
- [45] POPOVICH, Anatoliy a Vadim SUFIAROV. Metal Powder Additive Manufacturing. SHISHKOVSKY, Igor V., ed. New Trends in 3D Printing [online]. InTech, 2016, 2016-07-13 [cit. 2019-04-

- 22]. DOI: 10.5772/63337. ISBN 978-953-51-2479-5. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/new-trends-in-3d-printing/metal-powder-additive-manufacturing>
- [46] BOURELL, Dave, A.B. SPIERINGS, N. HERRES a G. LEVY. Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2011, 17(3), 195-202 [cit. 2019-04-22]. DOI: 10.1108/13552541111124770. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/13552541111124770>
- [47] MATERIALS & TECHNOLOGY: TECHNOLOGIES. In: *TECHNOLOGY APPLIED* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://technology-applied.com/materials-technology/>
- [48] FAQ - vysvětlení DMLS, SLS, SLM, EBM, Laser Cusing. In: *Innomia* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.innomia.cz/faq-vysvetleni-dmls-sls-slm-ebm-laser-cusing>
- [49] Electron Beam Melting Technology. In: *GE Additive* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/information/electron-beam-melting-technology>
- [50] EBM Hardware. In: *Arcam EBM* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware/>
- [51] DEGHAN-MANSHADI, A., MJ. BIRMINGHAM, M.S. DARGUSCH, D.H. STJOHN a M. QIAN. Metal injection moulding of titanium and titanium alloys: Challenges and recent development. *Powder Technology* [online]. 2017, 319, 289-301 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.06.053. ISSN 00325910. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032591017305120>
- [52] HEANEY, Donald F., ed. *Handbook of metal injection molding*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-0-85709-066-9.
- [53] FEILDEN, Ezra, Esther García-Tuñón BLANCA, Finn GIULIANI, Eduardo SAIZ a Luc VANDEPERRE. Robocasting of structural ceramic parts with hydrogel inks. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. 2016, 36(10), 2525-2533 [cit. 2019-06-28]. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.03.001. ISSN 09552219. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221916301054>
- [54] Robocasting - Direct Ink Writing. In: *EMC - EUROPE MAKES CERAMICS* [online]. [cit. 2019-06-28]. Dostupné z: <https://www.euroceram.org/en/technologies/material-extrusion/robocasting-direct-ink-writing.html>
- [55] VILLAFUERTE, Julio. Considering Cold Spray for Additive Manufacturing [online]. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: https://www.supersonicspray.com/uploads/documents/Julio_Villafuerte-AM&P-Article.pdf
- [56] COLD SPRAY. In: *METALLIZING EQUIPMENT CO. PVT. LTD.* [online]. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.mecpl.com/cold-spray.php>
- [57] Binder Jetting (BJ). In: *Additively* [online]. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting>
- [58] S., Michelle. HP Metal Jet; HP's new metal 3D printing technology. In: *3Dnatives* [online]. 10 September 2018 [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/hp-metal-jet-3d-printing-100920184/>

- [59] SILBERNAGEL, Cassidy. Additive Manufacturing 101-4: What is material jetting?. In: CANADA MAKES [online]. 26 April 2018 [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <http://canadamakes.ca/what-is-material-jetting/>
- [60] LANGNAU, Leslie. What is NanoParticle Jetting?. In: MAKE PARTS FAST [online]. 24 April 2019 [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.makepartsfast.com/what-is-nanoparticle-jetting/>
- [61] Liquid Metal 3D Printing. In: FLOW-3D [online]. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.flow3d.com/industries/additive-manufacturing/liquid-metal-3d-printing/>
- [62] Laserové práškové navařování (LMD). In: TRUMPF [online]. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/aditivni-vyroba/laser-metal-deposition-lmd/
- [63] High Level Processes: Directed Energy Deposition. In: BINTOA [online]. 30 April 2017 [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.bintoa.com/directed-energy-deposition/>
- [64] MOLITCH-HOU, Michael. DLP 3D Printing Does Metal with Prodways. In: Engineering.com [online]. 4 October 2016 [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/13295/DLP-3D-Printing-Does-Metal-with-Prodways.aspx>
- [65] SCHELMETIC, Tracey. Neurotechnology Builds Prototype 3D Printer Based on Ultrasonic Particle Manipulation. In: DesignNews [online]. 1 September 2017 [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.designnews.com/materials-assembly/neurotechnology-builds-prototype-3d-printer-based-on-ultrasonic-particle-manipulation/41559843357375>
- [66] SUFIAROV, V.Sh., A.A. POPOVICH, E.V. BORISOV, I.A. POLOZOV, D.V. MASAYLO a A.V. ORLOV. The Effect of Layer Thickness at Selective Laser Melting. Procedia Engineering [online]. 2017, 174, 126-134 [cit. 2019-07-03]. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.179. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817301790>
- [67] NGUYEN, Q.B., D.N. LUU, S.M.L. NAI, Z. ZHU, Z. CHEN a J. WEI. The role of powder layer thickness on the quality of SLM printed parts. Archives of Civil and Mechanical Engineering [online]. 2018, 18(3), 948-955 [cit. 2019-07-03]. DOI: 10.1016/j.acme.2018.01.015. ISSN 16449665. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1644966518300153>
- [68] SCHELMETIC, Tracey. StudioSystem+. In: DesktopMetal [online]. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.desktopmetal.com/products/studio/>
- [69] MAAMOUN, Ahmed, Yi XUE, Mohamed ELBESTAWI a Stephen VELDHUIS. Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Quality of Al Alloy Parts: Powder Characterization, Density, Surface Roughness, and Dimensional Accuracy. Materials [online]. 2018, 11(12) [cit. 2019-07-05]. DOI: 10.3390/ma11122343. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/11/12/2343>
- [70] KOUTIRI, Imade, Etienne PESSARD, Patrice PEYRE, Ouafae AMLOU a Thibaut DE TERRIS. Influence of SLM process parameters on the surface finish, porosity rate and fatigue behavior of as-built Inconel 625 parts. Journal of Materials Processing Technology [online]. 2018, 255, 536-546 [cit. 2019-07-07]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.12.043. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013617306349>
- [71] The world's first multi-metal printer. In: Demcon [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://www.demcon.nl/en/showcase/the-worlds-first-multi-metal-printer/>

- [72] Concept Laser a GE Additive company: CL 30AL / CL 31AL Aluminium alloys. In: Concept Laser [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: https://www.concept-laser.de/fileadmin//user_upload/Datasheet_CL_30AL.pdf
- [73] ISO/ASTM/DIS 52907:2018(E). Additive manufacturing — Technical specifications on metal powders. DRAFT. Switzerland, 2018.
- [74] ISO 3953:2011. Metallic powders — Determination of tap density. čtvrté vydání. Switzerland, 2011.

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: První objekt vytištěný Dr. Kodamou. [26].....	14 -
Obr. 2: Dr. Hideo Kodama[13]-	14 -
Obr. 3: Komerčně prodávaná tiskárna SLA-1 od společnosti 3D Systems (1988)[2]	16 -
Obr. 4: Betsy – první zařízení fungující na principu technologie SLS.[15].....	16 -
Obr. 5: Princip metody stavby 3D modelu (Baker, 1926).[43]	17 -
Obr. 6: Metoda vyvinuta společností Mitsubishi.[43]	17 -
Obr. 7: Kussmaul – systém navařování. [43].....	19 -
Obr. 8: Schéma technologie SLS vyobrazené v patentu US5597589A.	20 -
Obr. 9: Princip technologie spékání práškového lože.[17]	27 -
Obr. 10: Princip technologie navařování proudu práškového materiálu.[17]	27 -
Obr. 11: Princip technologie navařování materiálu ve formě drátu.[17]	28 -
Obr. 12: Chladicí kanály formy vyráběné konvenčně (vlevo) a aditivní technologií[29].....	28 -
Obr. 13: Příklad konvenčního (nahore) a konformního chlazení výstřiku.[31]	29 -
Obr. 14: Náhrada stehenní kosti s vnitřní strukturou, která napodobuje přirozenou strukturu kosti.[36].....	30 -
Obr. 15: Aditivně vyráběná titanová náhrada kyčelního kloubu.[35].....	31 -
Obr. 16: Přirovnání velikosti práškové částice kovu pro aditivní výrobu.[28].....	35 -
Obr. 17: Snímky práškových materiálů z elektronového mikroskopu.	41 -
Obr. 18: Tvar částic dle normy GOST 25849.[45]	42 -
Obr. 19: Princip technologií SLS, DMLS, SLM, DMLM.[47]	43 -
Obr. 20: Princip funkce technologie EBM.[49]	46 -
Obr. 21: Princip funkce technologie robocasting.[54]	47 -
Obr. 22: Princip funkce technologie Cold Spray.[56]	48 -
Obr. 23: Princip technologie Binder Jetting. [57].....	49 -
Obr. 24: Princip technologie NanoParticle Jetting[59]	50 -
Obr. 25: Metoda MIM.[51]	51 -
Obr. 26: Princip funkce technologie Drop-on-Demand.[61]	52 -
Obr. 27: Princip technologie Directed Energy Deposition. [63]	53 -
Obr. 28: Vytištěné vzorky z Inconelu 718. [67].....	58 -
Obr. 29: Drsnost povrchu pro tloušťku vrstvy 20 (vlevo) a 30 μm (vpravo).[67]	59 -
Obr. 30: Porozita vzorků AlSi10Mg; (a,d) AS8, (b,e) AS3, (c,f) AS1.[69]	63 -
Obr. 31: Tisková paleta se zarovnanými demonstračními prvky.	117 -
Obr. 32: CAD model artefaktu pro zkoušku sklonu stěn.....	118 -
Obr. 33: CAD model artefaktu pro zkoušku převisů.	119 -



Obr. 34: CAD model artefaktu pro zkoušku schopnosti přemostění.....	- 119 -
Obr. 35: CAD model artefaktu pro zkoušku maximálního průměru díry.....	- 120 -
Obr. 36: CAD model artefaktu pro vyhodnocení míry deformací kruhového profilu trubek.....	- 120 -
Obr. 37: CAD model artefaktu pro vyhodnocení limitní tloušťky stěn.....	- 121 -
Obr. 38: CAD model artefaktu pro vyhodnocení limitního rozměru štěrbiny.....	- 121 -
Obr. 39: CAD model artefaktu pro vyhodnocení limitního rozměru a tvaru pinu.....	- 122 -
Obr. 40: CAD model sestavy artefaktů pro vyhodnocení vlivu rozkmitání nanášedce prášku.....	- 122 -
Obr. 41: CAD model pro vyhodnocení vznikajícího pnutí.....	- 123 -
Obr. 42: CAD model různých možností řešení kanálů.....	- 123 -
Obr. 43: Demonstrátor s podpůrnými konstrukcemi v požadovaných místech.....	- 125 -
Obr. 44: Vytištěný technologický demonstrátor.....	- 126 -

10 SEZNAM SCHÉMAT

Schéma 1: Dělení aditivních technologií.....	- 26 -
Schéma 2: Proces rychlého prototypování. Proces začíná u CAD modelu a několikrát se opakuje.[38]	- 33 -
Schéma 3: Dostupné materiály v AM.[17][27]	- 36 -
Schéma 4: Rozložení čísla položky dle vnitropodnikové normy a vysvětlení významu jednotlivých částí	- 77 -

11 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Historické milníky aditivních technologie obecně.....	- 13 -
Graf 2: Historické milníky aditivních technologií kovových materiálů.....	- 18 -
Graf 3: Zastoupení aditivních systémů v průmyslu (2017) [23].....	- 23 -
Graf 4: Vývoj prodejů aditivních systémů 2000–2017.[18].....	- 23 -
Graf 5: Vývoj prodejů materiálu pro aditivní technologie v letech 2000–2016 (uvedené ceny v milionech dolarů).[32].....	- 24 -
Graf 6: Porovnání rychlé výroby nástrojů oproti konvenční výrobě.[40].....	- 34 -
Graf 7: Relativní hustota vzorků ze slitiny AlSi10Mg.[69].....	- 64 -
Graf 8: 3D textura povrchu slitiny AlSi10Mg; (a) AS8, (b) AS6, (c) AS3, (d) AS1.[69].....	- 65 -
Graf 9: Drsnost povrchu vzorků ze slitiny AlSi10Mg.[69].....	- 65 -
Graf 10: Rozměrové tolerance vzorků ze slitiny AlSi10Mg.[69].....	- 66 -
Graf 11: Plošná rovinnost vzorků ze slitiny AlSi10Mg.[69].....	- 67 -
Graf 12: Vliv nastavení parametru výkonu laseru na drsnost povrchu.[70].....	- 68 -
Graf 13: Vliv nastavení parametru výkonu laseru na drsnost povrchu v závislosti na úhlu natočení.[70].....	- 69 -
Graf 14: Závislost množství porozity na tiskových parametrech.[70].....	- 71 -
Graf 15: Výsledky únavové zkoušky tištěných vzorků.[70].....	- 73 -
Graf 16: Množství položek dle kroku 1.....	- 79 -
Graf 17: Množství položek dle kroku 2.....	- 80 -
Graf 18: Množství položek dle kroku 3.....	- 82 -
Graf 19: Množství položek dle kroku 4.....	- 83 -
Graf 20: Množství položek dle kroku 5.....	- 84 -
Graf 21: Množství dílů dle rozměrové obálky.....	- 86 -
Graf 22: Počet dílů dle materiálu.....	- 87 -
Graf 23: Počet dílů dle cenové skupiny.....	- 88 -
Graf 24: Počet dílů dle hmotnostní skupiny.....	- 115 -

12 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Výsledné rozměry vzorků v závislosti na tloušťce vrstvy. [67].....	- 59 -
Tabulka 2: Mechanické vlastnosti součástí vytištěných horizontálně v závislosti na tloušťce vrstvy.[67].....	- 59 -
Tabulka 3: Relativní hustota vzorků v závislosti na výrobních parametrech.[66].....	- 60 -
Tabulka 4: Výsledky zkoušky tahem Inconelu 718.[66].....	- 60 -
Tabulka 5: Výsledky zkoušky rázem Inconelu 718.[66].....	- 61 -
Tabulka 6: Tiskové parametry SLM procesu pro slitinu AlSi10Mg.[69].....	- 61 -
Tabulka 7: Zastoupení chemických prvků v jednotlivých Al slitinách.[69].....	- 62 -
Tabulka 8: Hodnoty rozložení velikosti práškových částic.[69].....	- 62 -
Tabulka 9: Tiskové parametry pro kontury vzorků č. 1–6 a jejich plošná drsnost.[70].....	- 68 -
Tabulka 10: Tiskové parametry pro kontury vzorků č. 7–16 a jejich plošná drsnost.[70].....	- 70 -
Tabulka 11: Tiskové parametry pro šrafování u vzorků č. 7–29 a jejich výsledná porozita.....	- 70 -
Tabulka 12: Parametry tisku vzorků pro tahovou a únavovou zkoušku.[70].....	- 72 -
Tabulka 13: Výsledky tahové zkoušky tištěných vzorků.[70].....	- 72 -
Tabulka 14: Výsledky únavové zkoušky vzorků leštěných i bez dodatečné úpravy.[70].....	- 73 -
Tabulka 15: Počet položek vyfiltrovaných v kroku 1.....	- 79 -
Tabulka 16: Počet položek vyfiltrovaných v kroku 2.....	- 80 -
Tabulka 17: Počet položek vyfiltrovaných v kroku 3.....	- 82 -
Tabulka 18: Počet položek vyfiltrovaných v kroku 4.....	- 83 -
Tabulka 19: Počet položek vyfiltrovaných v kroku 5.....	- 84 -
Tabulka 20: Počet položek dle rozměrové obálky.....	- 86 -
Tabulka 21: Počet položek dle materiálu.....	- 86 -
Tabulka 22: Počet dílů, dle cenové skupiny.....	- 87 -
Tabulka 23: Počet duplikátních a symetrických dílů.....	- 89 -
Tabulka 24: Velikost aditivního výrobního systému dle největšího rozměru součásti.....	- 89 -
Tabulka 25: Vizuální vyhodnocení dílů z první cenové skupiny.....	- 89 -
Tabulka 26: Vizuální vyhodnocení dílů z druhé cenové skupiny.....	- 90 -
Tabulka 27: Vizuální vyhodnocení dílů z cenové skupiny c.....	- 97 -
Tabulka 28: Výsledky vyhodnocení.....	- 114 -
Tabulka 29: Počet dílů dle hmotnostní skupiny.....	- 115 -
Tabulka 30: Použité parametry tisku.....	- 124 -
Tabulka 31: Chemické složení prášku CL 31 AL.[72].....	- 125 -
Tabulka 32: Mechanické a fyzikální vlastnosti (hodnoty po tepelném zpracování).....	- 126 -