

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2018

**ONDŘEJ
STRÁNSKÝ**



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stránský** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **459889**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Technologie laserového spékání nástrojové oceli 1.2709

Název bakalářské práce anglicky:

Technology of laser sintering of tool steel 1.2709

Pokyny pro vypracování:

1. Technologie DMLS
2. Výhody, nevýhody, omezení technologie DMLS
3. Nástrojová ocel 1.2709
4. Mechanické vlastnosti tištěného a konvenčně vyráběného materiálu

Seznam doporučené literatury:

CHUA, Chee Kai. a Kah Fai. LEONG. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Fourth edition of Rapid prototyping. Hackensack, New Jersey: World Scientific, 2015. ISBN 9789814571418.
Aktuální katalogové materiály firem Concept Laser, Renishaw, EOS, Trumpf

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Zdeněk Pitrmuc
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

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

27.4.2018

Datum převzetí zadání

Stránský

Podpis studenta



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího bakalářské práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze: _____

Ondřej Stránský



Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Zdeňku Pitrmucovi za odborné připomínky týkající se vypracování bakalářské práce.

Dále děkuji rodině, přátelům a mé přítelkyni za veškerou pomoc (morální i věcnou), jež mi v průběhu psaní této práce poskytli.



Anotační list

Jméno autora:	Ondřej Stránský
Název BP:	Technologie laserového spékání nástrojové oceli 1.2709
Anglický název:	Technology of laser sintering of tool steel 1.2709
Rok:	2018
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí BP:	Ing. Zdeněk Pitrmuc
Klíčová slova:	laser, sintrování, nástrojová ocel 1.2709, kovový 3D tisk
Keywords:	laser, sintering, tool steel 1.2709, metal 3D printing
Anotace:	Tato bakalářská práce se věnuje technologii 3D tisku, zaměřuje se na technologii Direct Metal Laser Sintering (DMLS), snaží se zmapovat její silné a slabé stránky, doporučení pro návrh dílu, parametry procesu, vizi do budoucnosti. Práce se zaměřuje na konkrétní ocel, její vlastnosti, zpracování.
Abstract:	This bachelor thesis examines 3D printing technology with a focus on Direct Metal Laser Sintering. Its aim is to explore its strengths and weaknesses, design recommendations, process parameters and future vision. The main focus is on a specific type of steel, its properties and processing



Obsah

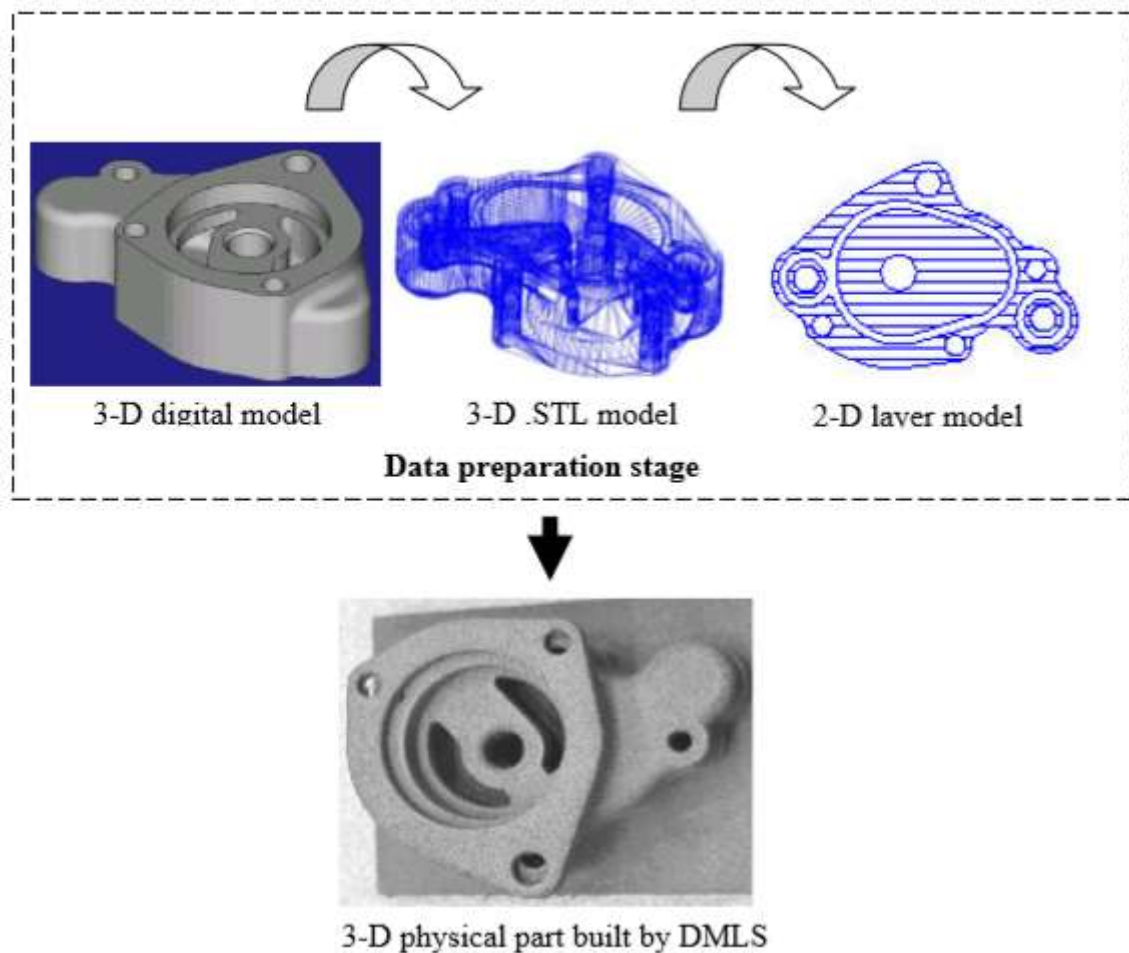
1	Úvod – 3D tisk	4
1.1	Důvody využití 3D tisku kovových materiálů	5
1.1.1	Tvarová složitost.....	5
1.1.2	Velikost dávky	7
1.1.3	Topologická optimalizace dílu.....	7
1.1.4	Pružnost výroby.....	8
1.1.5	Rychlost prototypování/rychlost od návrhu k prodeji	8
1.1.6	Snížení energetické náročnosti výroby	8
1.1.7	Tisk forem.....	9
1.2	Potenciál výroby.....	9
1.2.1	Variabilita dílu podle přání zákazníka	9
1.2.2	Průmysl 4.0.....	9
1.3	Výhody a nevýhody 3D tisku	9
1.4	Vize do budoucnosti.....	10
2	DMLS	11
2.1	Princip DMLS	11
2.2	Vznik pnutí.....	12
2.3	Optimalizace návrhu pro 3D tisk.....	12
2.3.1	Duté sekce.....	12
2.3.2	Stěny a jádra.....	12
2.3.3	Úprava kanálů	14
2.3.4	Doporučené hodnoty modelových struktur.....	15
2.3.5	Tolerance.....	19
2.4	Parametry procesu.....	19
2.5	Technologické požadavky	21
2.5.1	Tisková paleta.....	21
2.5.2	Supporty.....	21
2.6	Technologické omezení a vznik chyb	22
2.6.1	Velikost dílu.....	22
2.6.2	Tvarová přesnost.....	22
2.7	Materiály vhodné pro tisk technologií DMLS.....	23
2.7.1	Srovnání materiálu pro konvenční výrobu a DMLS.....	23
2.8	Nebezpečí technologie a hygiena práce	23
3	Tisknutý materiál ocel 1.2709	24
3.1	Tepelné zpracování	24



4	Ocel 1.2709 ve formě prášku pro technologii DMLS	27
5	Závěr.....	29
6	Bibliografie	29

1 Úvod – 3D tisk

Jako 3D tisk nebo Aditivní technologie výroby obvykle označujeme výrobu dílu vrstvu po vrstvě přímo z digitálního modelu. Materiál je ukládán/zpevňován na původní vrstvě a vytváří tak vrstvu novou. Tvar vrstvy je definován řezem 3D modelu.

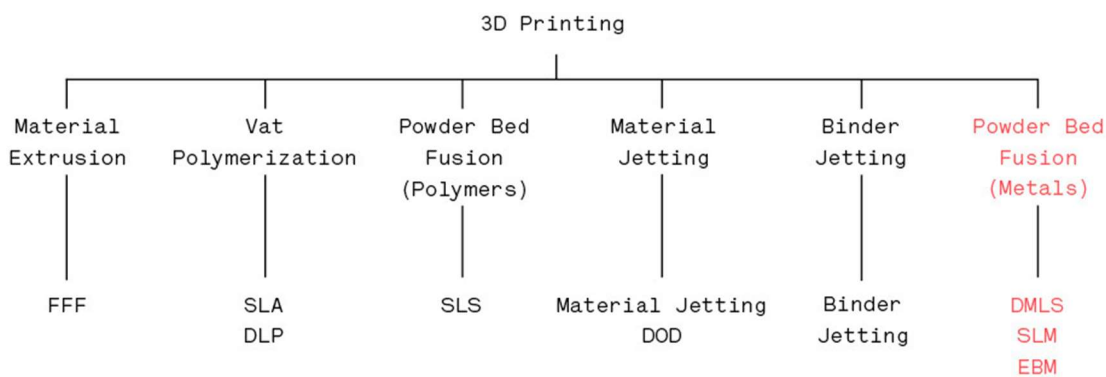


Obrázek 1 - kroky pro výrobu pomocí technologie DMLS [1]

3D tiskem lze označovat i technologii Laser Metal Deposition (LMD) což je technologie založená na nanášení materiálu bez práškového lože, a to lokálně s pomocí laserového paprsku v ochranné atmosféře. Technologie LMD není vhodná na tvorbu celého dílu, má však uplatnění v případě oprav.

3D tisk je jedním z nástrojů pro Rapid Prototyping (RP), což je metoda označující rychlou tvorbu funkčních prototypů.

Pod pojem 3D tisk spadá zároveň i technologie Layered manufacturing (LM), nebo Solid Freedom Fabrication (SFF). [2]



Obrázek 2 - Zařazení technologie DMLS [3]

Nejrozšířenější a zároveň nejjednodušší aditivní technologií je momentálně plastový 3D tisk z polotovaru ve formě drátu. Tato technologie je značená zkratkou FDM (fused deposition modeling). Princip této metody spočívá v natavování základního materiálu ve formě drátu tiskovou hlavou do polotekutého stavu a jeho nanášení po vrstvách na podložku. Tato technologie využívá nejčastěji plasty (ABS, PLA) a řadí se mezi nejlépejší.

Materiál ve formě prášku využívají technologie SLS (selective laser sintering), selective laser melting (SLM), DMLS (direct metal laser sintering), SHS (selective heat sintering), EBM (electron beam melting) a mnoho dalších. V této práci se zaměřuji na technologii DMLS. [4]

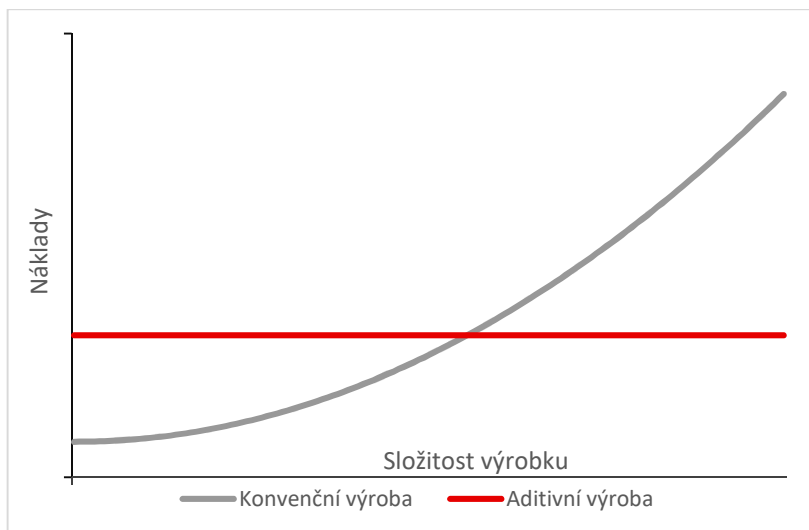
Rozdílem mezi DMLS a SLM je, že SLM kompletně taví použitý prášek a vytváří homogenní součást. DMLS prášek ohřívá pod bod tavení a spojuje ho na molekulární úrovni avšak plně ho netaví. [5] [3]

3D tisk si našel svou cestu do mnoha průmyslových odvětví včetně letecké techniky, automobilismu, lékařství i kosmonautiky. [6] [7] V mnoha případech přináší ekonomickou i časovou úsporu. Jedná se o moderní a rychle se rozvíjející technologii. [1]

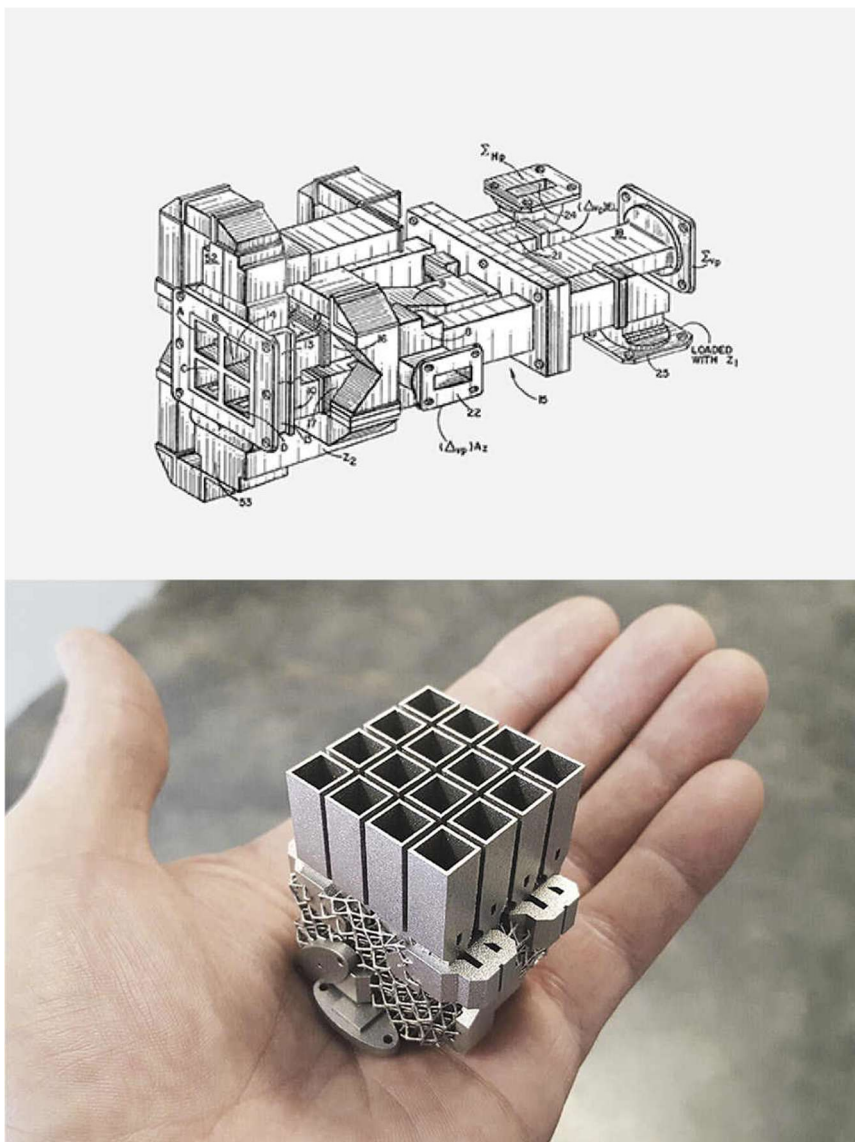
1.1 Důvody využití 3D tisku kovových materiálů

1.1.1 Tvarová složitost

Z principu technologie DMLS vyplývá, že tvarově složitý díl je tvořen se stejnými náklady jako tvarově jednodušší díl. Z Graf 1 je patrné, že pro tvarově složitější díly existuje bod, ve kterém je konvenční výroba stejně drahá jako výroba aditivní. Je-li při návrhu dosaženo této složitosti, aditivní výroba představuje vhodnou cestu, jak díl dále tvarově optimalizovat bez rapidního zvýšení nákladů v porovnání s konvenčními technologiemi. Díly pro 3D tisk proto mohou využívat komplexnějších tvarů a větší složitosti. Správnou konstrukční úpravou je takto možné uspořít váhu dílů, snížit počet potřebných nástrojů a zároveň snížit počet dílů v konstrukci čímž je možno snížit náklady na montáž [1]. Na Obrázek 3 jsou dva návrhy satelitní antény. Nový návrh zredukoval výrobní čas (z 11 měsíců na 2 měsíce), snížil hmotnost antény o 95%, přímé náklady se snížily o 20-25% a nepřímé o 75%. [3]



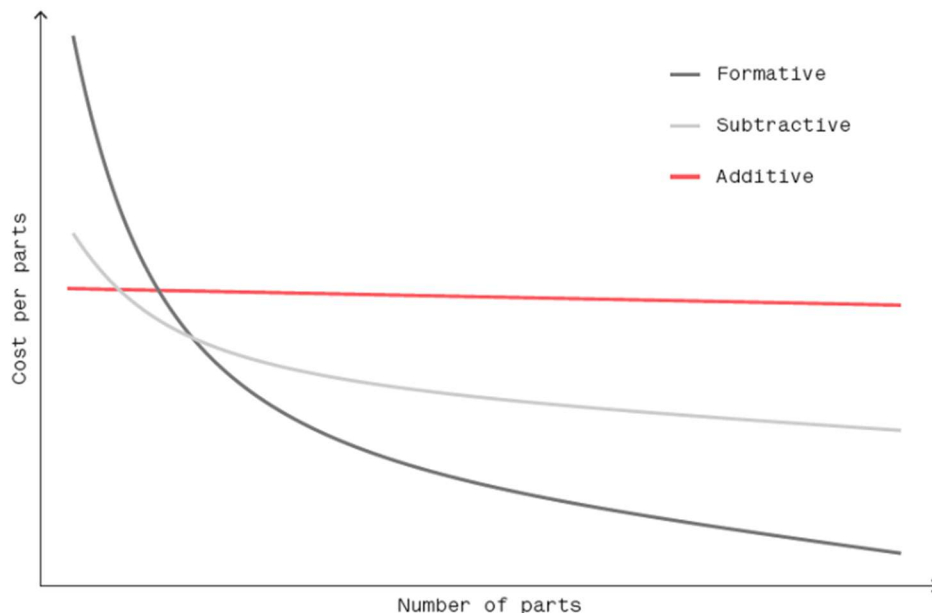
Graf 1 - Srovnání nákladů konvenční a aditivní výroby podle složitosti výroby [1]



Obrázek 3 - Dva návrhy satelitní antény. Originální návrh (nahore) se skládal ze 100 součástí, nový návrh (dole) je 1 díl vytvořený technologií DMLS. [3]

1.1.2 Velikost dávky

Z Graf 2 je patrné, že technologie 3D tisknu má smysl i v případě malých dávek dílů. Technologie umožňuje uzpůsobit každý díl přání zákazníka.

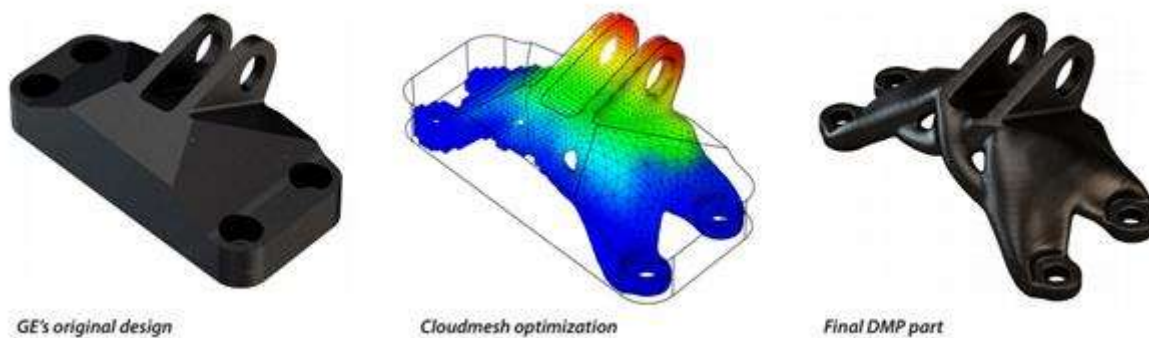


Graf 2 - Srovnání nákladů podle objemu výroby [8]

1.1.3 Topologická optimalizace dílu

Tvar daného dílu je možno optimalizovat tak, aby velikost průřezu odpovídala zatížení v daném průřezu. Tato optimalizace umožňuje snížení hmotnosti při zachování funkčnosti dílu. Takto optimalizovaný tvar konvenčními technologiemi vyrobit nelze, nebo by byly náklady na výrobu optimalizovaného dílu neúměrně vysoké.

Na Obrázek 4 je znázorněno využití topologické optimalizace v praxi. Firma GE Aviation byla schopna uspořit na klapce 70% hmotnosti při využití stejného materiálu jako v případě konvenční výroby. [9]



Obrázek 4 - Využití topologické optimalizace v praxi [10]

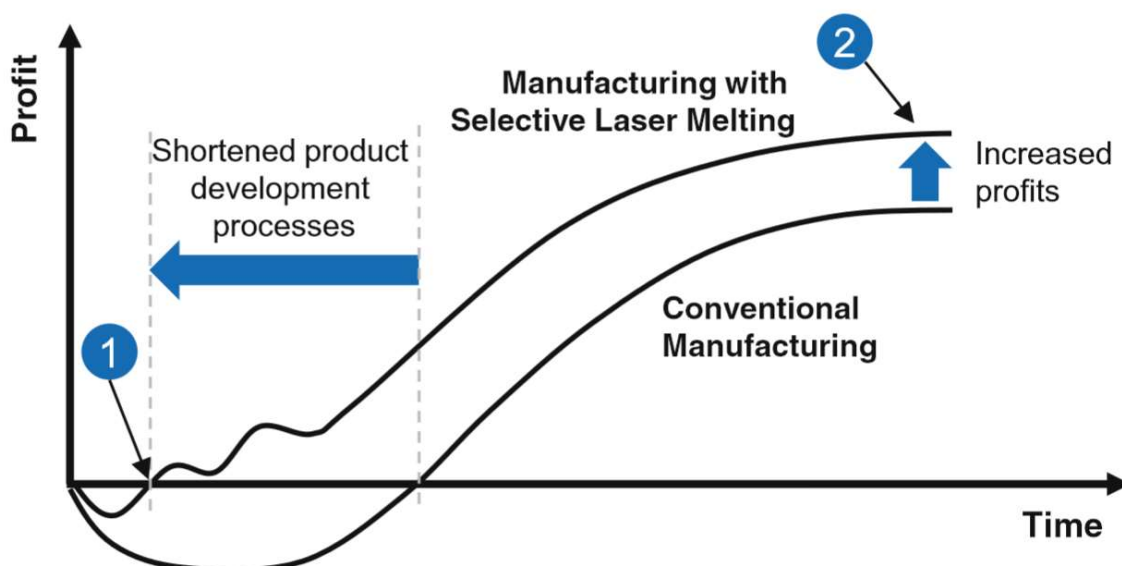
1.1.4 Pružnost výroby

Konvenční technologie jsou často vázány na výrobu specializovaných přípravků a forem. V případě využití 3D tisku tato provázanost odpadá, je možné změnu tvaru součásti okamžitě, případně po drobných úpravách promítnout do výroby. [11]

1.1.5 Rychlost prototypování/rychlost od návrhu k prodeji

Graf 3 ukazuje průběh předpokládaného zisku. Křivka pro konvenční technologii výroby (spodní křivka) začíná velkou investicí před zavedením výrobku do výroby a na trh a postupně roste ke svému maximu. Oproti tomu křivka pro 3D tisk (v tomto případě technologií SLS; horní křivka) umožňuje snížit investici do výrobku před uvedením produktu na trh, začíná tvořit zisk mnohem dříve (bod 1) a postupně roste až ke svému maximu (bod 2), které se může nacházet výše než v případě konvenční technologie.

3D tisk umožňuje snížit počáteční investici do výroby díky absenci přípravků a nástrojů, jejichž výroba je náročná investičně i časově. V případě prototypování je možné využít všechny poznatky z výroby prototypů a promítnout je přímo do následného výrobního procesu. Celkově je tak možno uvést výrobek na trh rychleji a s vyspělejším výrobním procesem což vede k maximalizaci zisku. [11]



Graf 3 - Srovnání zisku 3D tisku oproti konvenční technologii v čase [11]

1.1.6 Snížení energetické náročnosti výroby

Energetická náročnost závisí na konkrétní aplikaci, využívané tiskárně, materiálu i tiskových parametrech. Obecně platí, že díly je třeba žíhat po tisku pro snížení vneseného pnutí. Většinou jsou však při technologii DMLS využívány oceli, vyžadující tepelné zpracování. Vhodnou kombinací výběru materiálu, úpravy geometrie návrhu a tiskových parametrů je možné snížit energetickou náročnost výroby neboť díl je tvořen pouze v potřebném místě (případně s přídavkem na obrábění). Ocel je vytvářena v místě potřeby, není třeba vyrábět polotovary, spotřebováván je pouze základní materiál – kovový prášek.

1.1.7 Tisk forem

Umožňuje tisk úzkých chladicích kanálků nedosažitelných jinou technologií. Zároveň dovoluje tisknout kanály v téměř neomezených místech s téměř neomezenými průřezy. Vhodnou optimalizací tvarů kanálů je možné zlepšit přenos tepla mezi formou a výrobkem, zlepšit tak chlazení formy i odlitků a snížit objemový průtok potřebného chladiva. [11]

1.2 Potenciál výroby

1.2.1 Variabilita dílu podle přání zákazníka

Každý díl může být jiný, přesně podle přání zákazníka. Výrobek se může přizpůsobit zákazníkovi na míru. Vhodným příkladem tohoto využití technologie 3D tisku je tisk běžeckých bot. Noha je nasnímána podložkou, následně je bota vytištěna přesně podle požadavků a přesného tvaru. [12]

Technologie je obzvláště vhodná pro tisk různých implantátů (zubních, kloubních a jiných) neboť umožňuje uzpůsobit tvar dle potřeb zákazníka a zároveň využívá i materiálů netoxických pro lidské tělo (titanové slitiny, různé druhy ocelí). [13]

1.2.2 Průmysl 4.0

Technologie DMLS představuje vhodnou cestu pro postupnou digitalizaci výrobních procesů, individualizaci výrobků a optimalizaci výrobního procesu. Předpokládá se, že tato technologie bude hrát stěžejní roli při reálných aplikacích Průmyslu 4.0. [11]

1.3 Výhody a nevýhody 3D tisku

- + Odpadá řešení třískového hospodářství (recyklace, skladování).
- + Topologická optimalizace
- + Snížení hmotnosti optimalizovaného dílu
- + Možná redukce počtu součástí
- + Krátká doba od návrhu k prvnímu výrobku
- Rychlost tisku

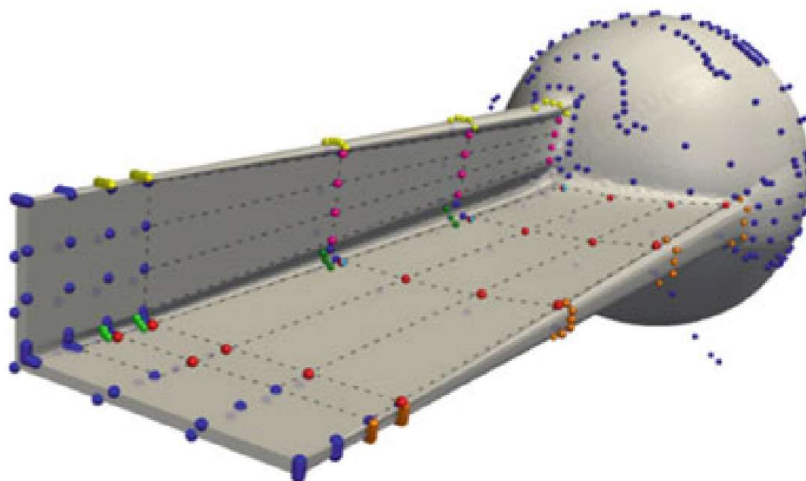
Je závislá na výrobních parametrech, je nejvíce ovlivňována požadavky na kvalitu tisku (vnitřní porozita, kvalita povrchu, výška vrstvy). Strojní čas je obvykle delší než při využití konvenčních technologií.

- Vysoká cena zavedení i využívání technologie
Do nákladů je třeba promítnout náklady na mzdu pro kvalifikovaný a speciálně proškolený personál, drahý strojní čas, náklady na základní materiál a náklady na tepelné zpracování.
- Složitě provedení optimalizace dílu
- Možná anizotropie vytištěného materiálu
- Náročná kontrola procesu
využívá se vysokorychlostní kamery pro kontrolu pozice laserového paprsku.
- Omezení velikosti tištěného dílu tiskovou plochou
- Tepelné ovlivnění
- Kvalita povrchu

Při zvolení tiskových parametrů s ohledem na rychlost výroby obvykle nedosahuje kvalita povrchu požadovaných parametrů. Často se po tisku díl tryská pro zlepšení kvality povrchu, což zaručuje odstranění ulpělého částečně sintrovaného prášku. [14]

1.4 Vize do budoucnosti

- Zrychlení procesu tisku při zachování a dalším zlepšení kvality tisku
- Širší rozšíření dané technologie
- Zrušení skladových zásob náhradních dílů v případě, že se nejedná o spotřební ani opotřebitelný díl



Obrázek 5 - Optimalizace geometrie dílu pomocí software NURBS [11]

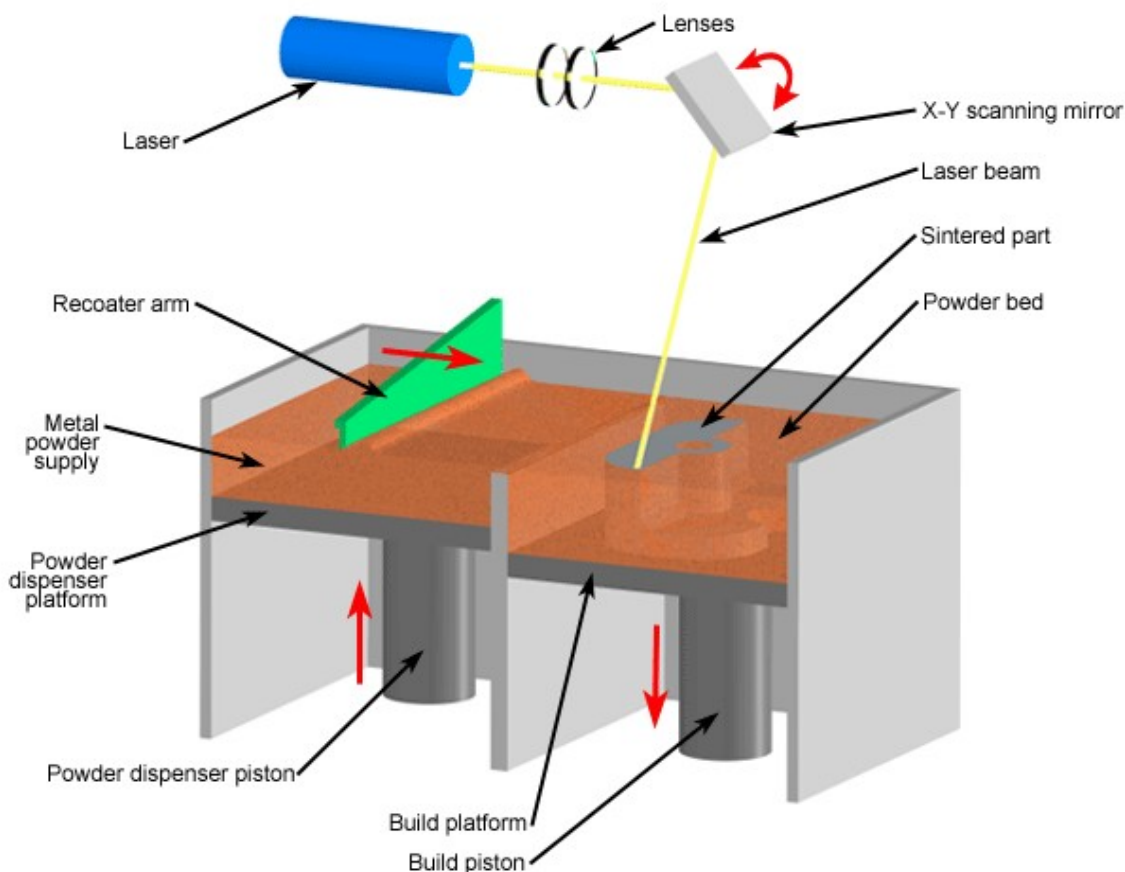
- Nastavení tiskových parametrů a optimalizace geometrie dílu s využitím umělé inteligence s ohledem na požadavky na díl
- Maximalizace zisku díky uzpůsobení dílu podle zákazníka – odborníci odhadují, že 50-90% ceny bude tvořit přidaná hodnota
- Inovativní business modely založené na pružnosti 3D tisku
- Změna toku peněz
- Samo-optimalizující produkční systémy
- Decentralizovaná produkce – koncový uživatel vyrábí pro firmu, může usnadnit vývoj a zkomercializovat zlepšení produktu [11]

2 DMLS

2.1 Princip DMLS

Direct Metal Laser Sintering (DMLS) je technologie založená na tzv. Powder Based Fusion (PBF). Principem PBF je selektivní spékání nanášeného prášku termálním zdrojem. Po spečení se válec, na kterém je vytvářen díl posune směrem dolů, válec se základním materiálem se posune směrem vzhůru a původní vrstva je překryta novou vrstvou základního materiálu. Nová vrstva je opět zapékána laserem v požadované ploše v místě dílu. Nově vytvořená vrstva je tímto způsobem protavována na původní vrstvu a následně tuhne. Postupným nanášením tenkých vrstev (20-60 μm) je díl takto vytvářen.

Celý proces probíhá v ochranné atmosféře tvořené argonem (99,7%), v některých případech dusíkem, která zabraňuje jinak okamžité oxidaci spečené vrstvy. Dusíková atmosféra má vliv na výslednou hustotu dílu a obvykle produkuje součásti s nižší hustotou než při využití argonu. [15] Vzniká součást s jediným bodem tavení, což nelze produkovat se slitinou. [3]



Obrázek 6 - Schéma DMLS tiskárny [16]

V případě DMLS je jako tepelný zdroj využíván přímý laserový paprsek (výkon 200W – 1 KW). [14] Tato technologie je podobná technologii SLS (Selective Laser Sintering) a principiálně splývají. Rozdílem mezi DMLS a SLS je použitý materiál spékáného prášku. V případě SLS jsou využívány různé typy polymerů, případně obalené kovové prášky. DMLS využívá neobalené předlegované prášky jako základní sintrovaný materiál. [17] Další podobnou technologií je SLM (Selective Laser Melting). Rozdílem je spojení kovového prášku. U technologie DMLS hovoříme o zapečení a spojení materiálu

na úrovni molekul. Technologie SLM využívá úplnou změnu skupenství, materiál se taví a následně tuhne. [3] [5]

Technologie umožňuje opakovaně využívat práškový materiál a to až 25 krát při dodržení vhodných podmínek.

V závislosti na zadefinování technologie DMLS umožňuje tisknout různé materiály (kromě kovů i plasty, keramiku a další). [13]

2.2 Vznik pnutí

Díky vytváření nové vrstvy na původní sintrováním pomocí laseru je do nové vrstvy vnášeno množství energie ve formě tepla. Nová vrstva má vyšší teplotu a postupně chladne a smršťuje se. Vzniká tak vnitřní pnutí vyžadující zpravidla tepelné zpracování a omezuje výběr materiálu. [13]

2.3 Optimalizace návrhu pro 3D tisk

2.3.1 Duté sekce

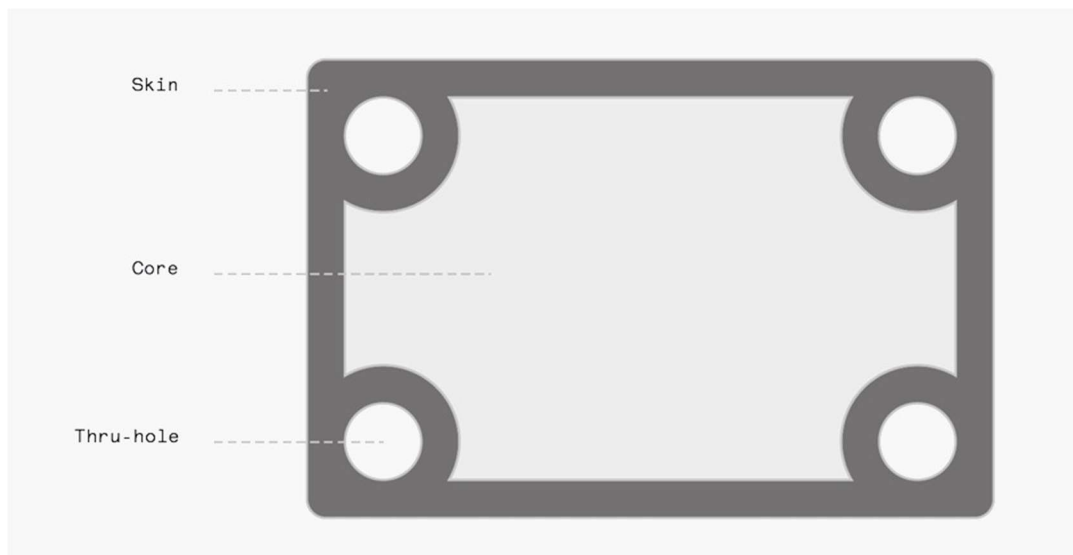
V průběhu návrhu dílu je třeba mít na paměti technologii jeho vzniku. Z principu DMLS vyplývá, že zcela uzavřené a duté sekce nelze tisknout. Dutá sekce musí být navržena s ohledem na odstranění metalického prášku, nebo je nutno počítat se zaplněním sekce práškem. Minimální průměr díry pro únik prášku by měl být alespoň 5 mm.

V uzavřených sekcích je taktéž vhodné vyvarovat se nutnosti použití podpor neboť tyto nelze odstranit.

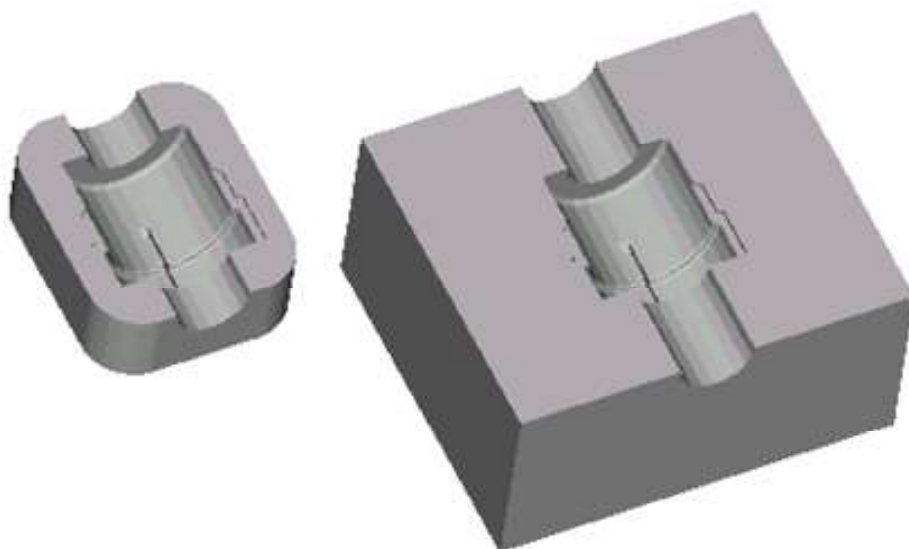
2.3.2 Stěny a jádra

Obvykle platí, že částem s velkou tloušťkou je vhodné se při návrhu vyhnout. Vyžadují-li okolnosti užití takovýchto částí, využívá se rozdílných nastavení procesu v závislosti na poloze laseru. Stěny součástí jsou sintrovány menší rychlostí s ustáleným tokem materiálu a vznikají proto s plnou hustotou. Jsou tvořeny s maximální pevností a tvrdostí. Jádro součástí může být sintrováno větší rychlostí, bez ustálení toku, což obvykle znamená vytvoření porézní struktury. Tloušťka stěny je obvykle 1-3 mm.

Rozdílné rychlosti tisku představují zmenšení strojního času bez obětování kvality povrchu a představují tak ekonomickou úsporu.

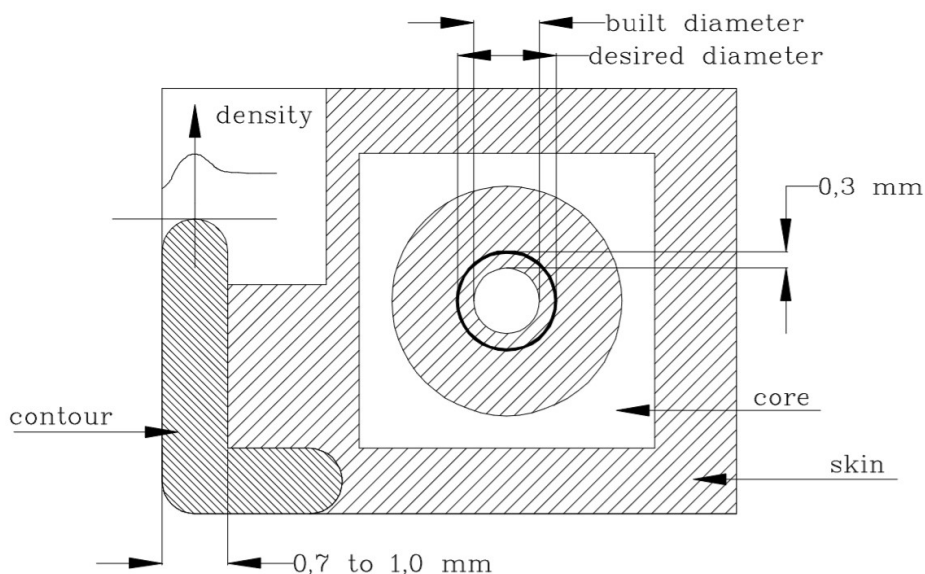


Obrázek 7 - Řez součásti tvořené pomocí stěn a jader [3]



Obrázek 8 - Možná konstrukční úprava s ohledem na objem vytvářené součásti [18]

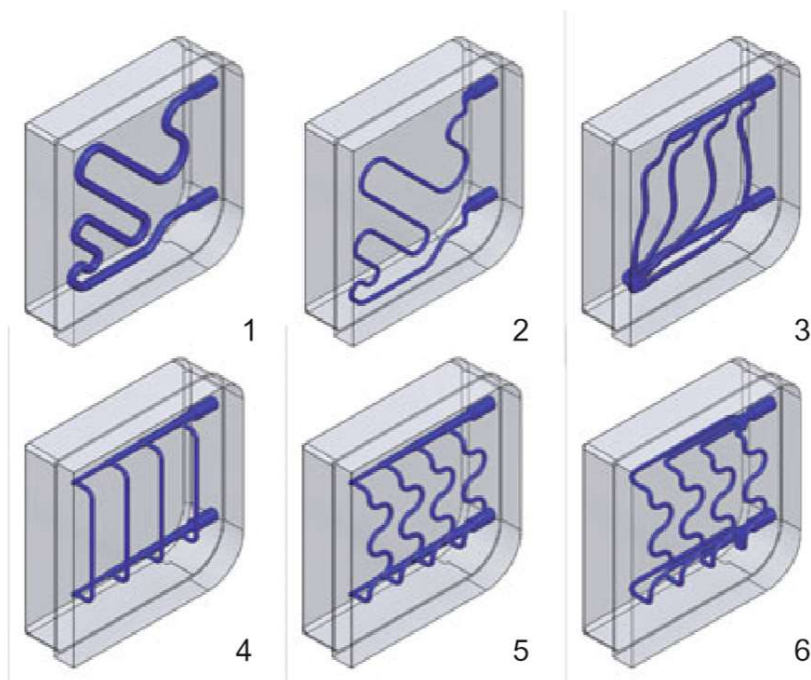
Při využívání stěn a jader je třeba dbát zvýšené opatrnosti v oblasti kolem děr do součásti. V případě vrtání do součásti po tisku je třeba, aby oblast díry byla tvořena jako stěna. Vhodná úprava návrhu je tisknout danou díru s přídavkem na obrábění (0,6 mm na průměru).



Obrázek 9 - Úprava návrhu v oblasti s dírou, větší masou materiálu a vnější povrchovou vrstvou [18]

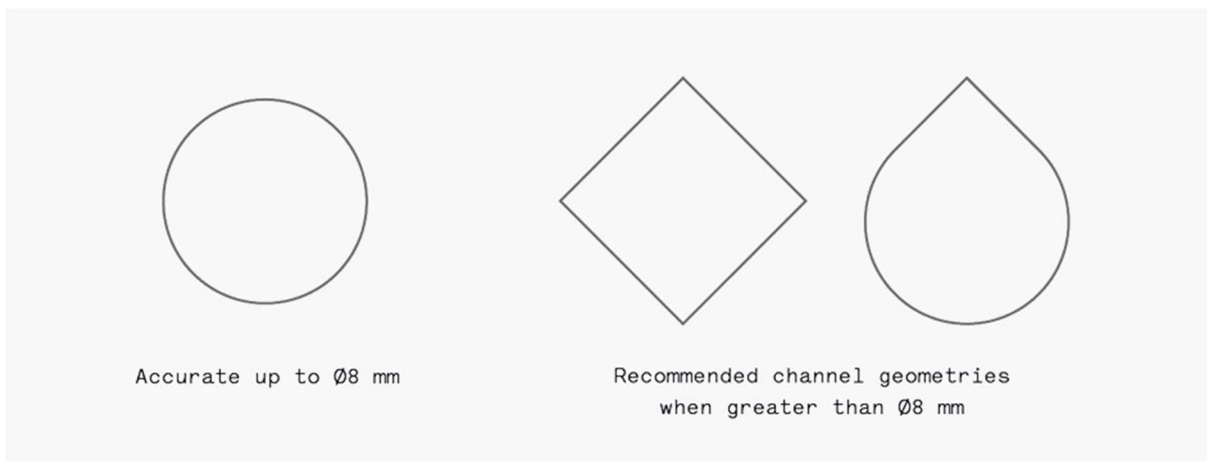
2.3.3 Úprava kanálů

Tisk kánálů (hlavně chladicích) v libovolných trasách je hlavní výhodou technologie DMLS obzvláště v případě tisku forem. Složitější trasy kanálů ve formách umožňují vznikající součásti lépe chladnout, ovlivňují tvar formy a snižují její hmotnost, což zvyšuje její životnost. [11]



Obrázek 10 - Alternativní tvary kanálů [11]

Je doporučeno tisknout kanály s kruhovým průřezem do průměru 8 mm. Kruhové kanály s větším průměrem se obvykle deformují, ve vrchní části kanálu může tisk selhat a doporučuje se využít jiného průřezu. [3]



Obrázek 11 - Obvyklý tvar chladicího kanálu a průřezy vhodnější pro 3D tisk [3]

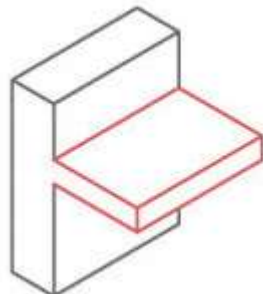
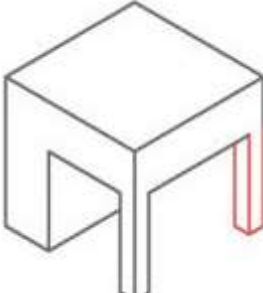
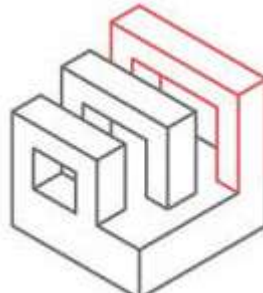
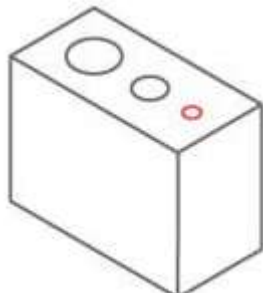
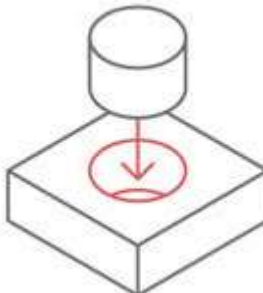
Změnou tvaru průřezu kanálu je možné zvětšit Reynoldsovo číslo a zlepšit přenos tepla mezi chladicím médiem a formou.

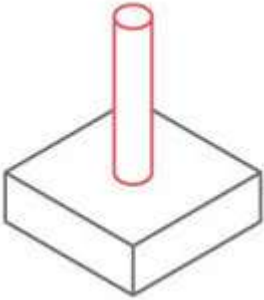
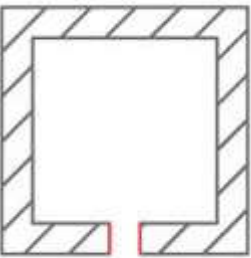
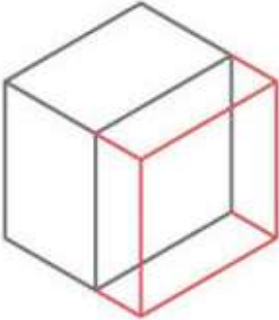
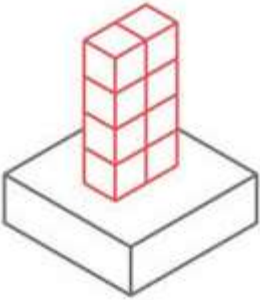
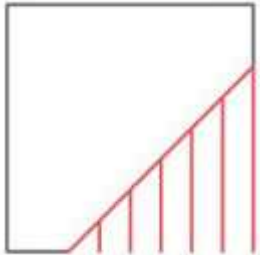
V případě tisku chladicích kanálů je třeba mít na paměti i odstranění kovového prášku po tisku. Z příliš dlouhých a úzkých kanálů se prášek může dostávat příliš obtížně, nebo nelze odstranit vůbec. [19]

2.3.4 Doporučené hodnoty modelových struktur

Tabulka 1 - Přehled doporučených hodnot rozměrů modelových struktur pro technologii DMLS [3]

Vlastnost	Popis	Doporučená hodnota pro DMLS
	<p>Připojené stěny</p> <p>Minimální tloušťka stěny připojené z alespoň 2 stran k ostatním strukturám.</p>	<p>0,4 mm</p> <p>0,4 mm je doporučeno pro zajištění přesného tisku. Tenčí stěny je možno tisknout v závislosti na materiálu, orientaci při tisku a na parametrech tisku.</p>
	<p>Samostatně stojící stěny</p> <p>Minimální tloušťka stěny, jež není připojena k ostatním strukturám jinak než jednou stranou. Samostatně stojící stěny jsou náchylnější k deformaci a nechtěnému oddělení při tisku.</p>	<p>0,5 mm</p> <p>Samostatně stojící stěny jsou méně tepelně ovlivňovány. Stejně jako u připojených stěn závisí na materiálu, orientaci součásti a tiskových parametrech.</p>

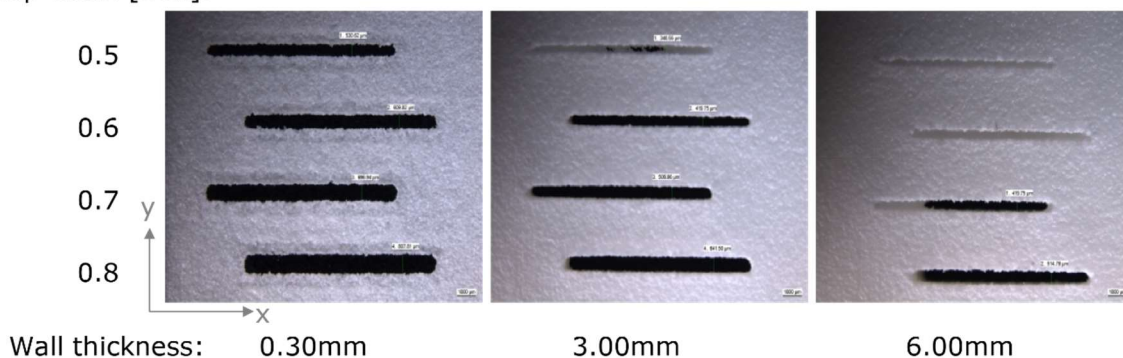
	<p>Převisy bez supportů</p> <p>Maximální vzdálenost vodorovné struktury bez využití supportů při dosažení požadované kvality tisku.</p>	<p>0,5 mm</p> <p>Maximální vzdálenost převisu od nosné struktury.</p>
	<p>Jasně rozlišení tvaru</p> <p>Minimální velikost samostatně tisknutého tvaru rozlišitelného po tisku metodou DMLS.</p>	<p>0,6 mm</p> <p>Velikost laserového paprsku určuje rozlišení s jakým je schopna tiskárna tisknout. Struktury menší než 0,6 mm nemusí být korektně sintrovány. Náchylné jsou ostré rohy a hrany.</p>
	<p>Horizontální přemostění</p> <p>Maximální vzdálenost horizontálního spojení dvou vertikálních struktur při dosažení požadované kvality tisku bez použití supportů.</p>	<p>2,0 mm</p> <p>Dovolená vzdálenost pro přemostění je ve srovnání s ostatními technologiemi 3D tisku relativně malá. Spojení ve větší vzdálenosti bez využití supportů mají špatnou kvalitu povrchu spojní části spojení a nebou strukturně spolehlivé.</p>
	<p>Díry</p> <p>Minimální průměr kruhové díry pro požadovanou tiskovou kvalitu bez splynutí do tištěné součásti.</p>	<p>1,5 mm</p> <p>Pro přesné díry nebo pro díry se závitem je doporučeno tisknout s přídatkem na obrábění a následné obrobení.</p>
	<p>Uzavřené a pohyblivé části</p>	<p>X</p> <p>Technologie DMLS spoléhá na supotech, obvykle proto není vhodná pro uzavřené a pohyblivé části.</p>

	<p>Čepy</p> <p>Minimální průměr čepu kruhového průřezu pro spolehlivý tisk samostatně stojícího vertikálního čepu.</p>	<p>1,0 mm</p> <p>Menší čepy mají zhoršené rozlišení struktury a nižší přesnost. Přesnost čepu se zmenšuje s jeho výškou. V případě nutnosti je možné zakomponovat do návrhu díru a vložit do ní klasický čep.</p>
	<p>Únikové díry</p> <p>Doporučená velikost průměru díry nutné k odstranění přebytečného metalického prášku z dutých sekcí dílu.</p>	<p>5,0 mm</p> <p>Pro snadné odstranění prášku je vhodné použít větší množství děr.</p>
	<p>Přídavek k obrábění</p> <p>Doporučená hodnota přídavku na obrábění v místech vyžadující obrábění po tisku.</p>	<p>0,5 – 1,0 mm</p>
	<p>Poměr délky a výšky</p> <p>Maximální poměr mezi délkou a výškou samostatně stojící struktury (součásti) pro dodržení požadovaných vlastností tištěné součásti.</p>	<p>8:1</p> <p>Poměr je nutno dodržet pro stabilitu součásti při tisku na paletu.</p>
	<p>Úkosy</p> <p>Minimální úhel mezi tištěnou stěnou a horizontální rovinou bez nutnosti použití suportů.</p>	<p>45°</p> <p>Pro dodržení kvality tisku je nutné využívat úkosy větší než 45°. Pro úkosy s menším úhlem je nutné využít suportů.</p>

	<p>Vystupující detaily</p> <p>Minimální výškový rozdíl nutný pro rozlišení při tisku. Příliš malý rozdíl může splynout s tištěným dílem (například text na součásti).</p>	<p>0,1 mm</p> <p>Doporučená hodnota</p>
--	---	---

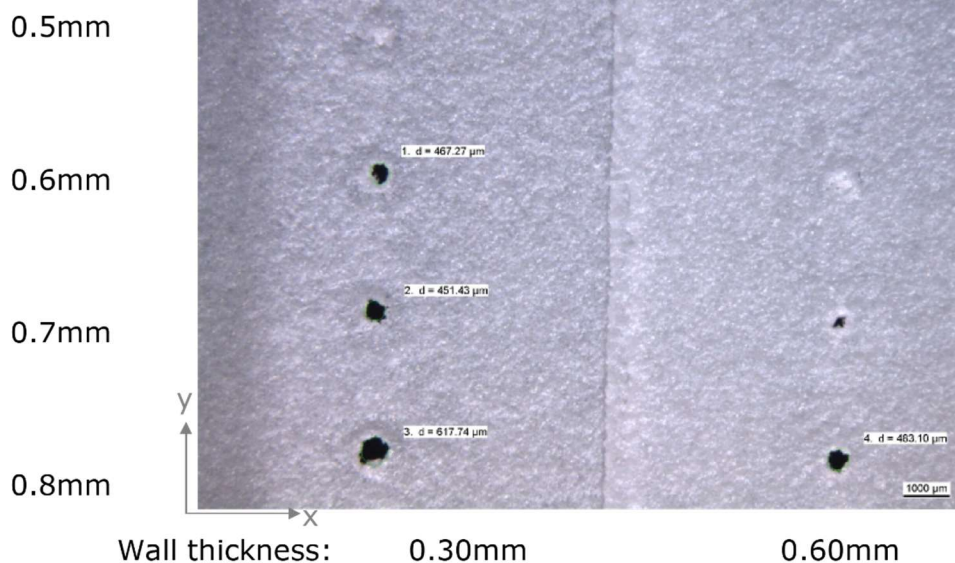
Je třeba mít na paměti, že hodnoty uvedené v Tabulka 1 jsou doporučené a maximální dosahované hodnoty při dodržení kvality tisku jsou závislé na tiskových parametrech, vlastnostech stroje, na využívaném materiálu i na geometrických vlastnostech. Například minimální průměr díry závisí na tloušťce stěny.

Gap width [mm]:



Obrázek 12 - Závislost minimální šířky štěrbiny na tloušťce stěny [19]

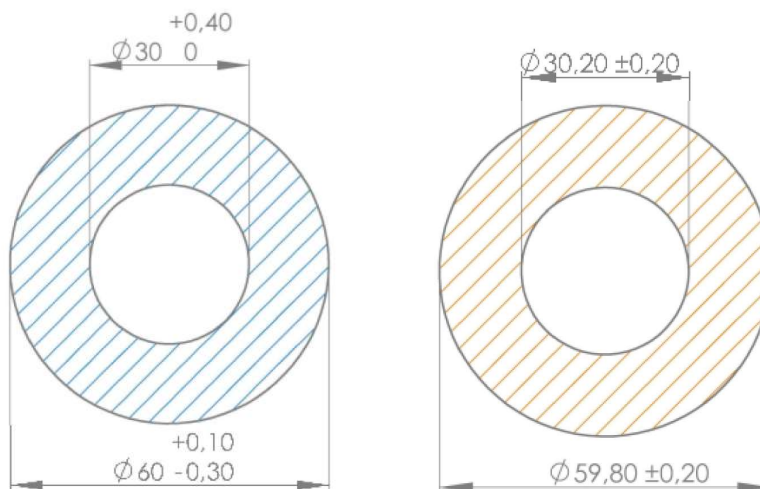
Hole diameter:



Obrázek 13 - Závislost minimálního průměru na tloušťce stěny [19]

2.3.5 Tolerance

Technologie DMLS produkuje díly v symetrickém tolerančním poli. Tiskárna tiskne díl přímo z 3D modelu a tudíž na jmenovitý rozměr modelu, proto je vhodné požadované nesymetrické tolerance převést na symetrické. [19]



Obrázek 14 - Úprava tolerancí modelu z nevhodně zvoleného tolerančního pole (vlevo) na vhodné (vpravo) [19]

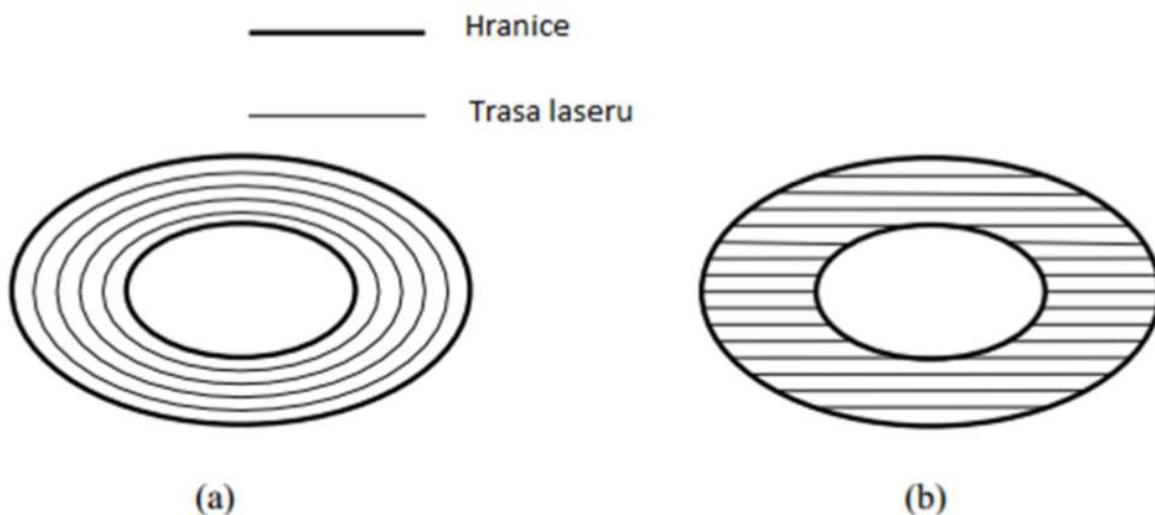
2.4 Parametry procesu

Mezi obvykle sledované parametry výrobku řadíme:

- Tvarová přesnost
- Odolnost vůči namáhání
- Strojní čas
- Drsnost povrchu
- Náklady

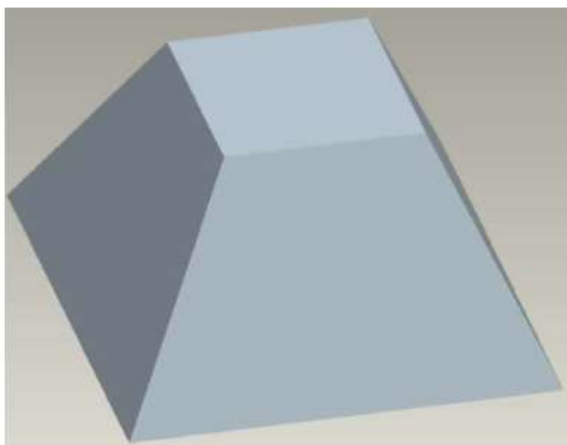
Mezi základní procesní parametry ovlivňující konečné vlastnosti výrobku řadíme:

- Způsob řádkování laseru
 - Nejvíce využívané jsou řádky spirální a rovnoběžné (paralelní). Spirální řádkování je definováno momentálním obrysem objektu a ofsetem mezi vrstvami. Rovnoběžné řádkování je definováno okamžitým tvarem, ofsetem a navíc hlavním směrem laseru. Rovnoběžné řádkování je jednodušší pro implementaci a tudíž populárnější.
- Orientace součásti při tisku
- Překrytí tras laseru (ofset)
 - Při chladnutí sintrovaného materiálu dochází ke stažení. Toto tepelné stažení je možno kompenzovat úpravou 2D vrstev objektu. Tato kompenzace se nazývá dihedral offset, normální offset a konstantní offset. Nejčastěji je využíván dihedral offset kvůli největší přesnosti. [2]

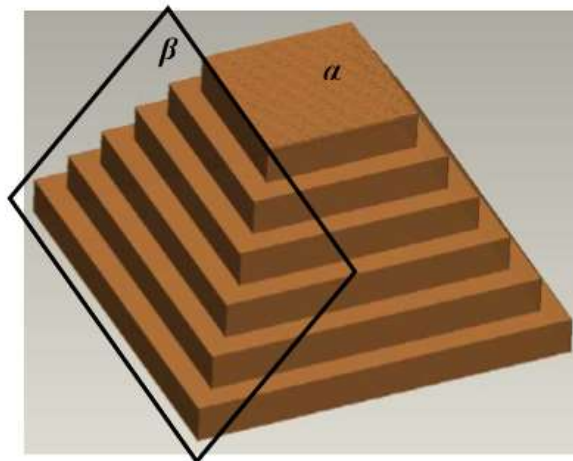


Obrázek 15 - Různé tvary tras laseru [2]

- Hustota řádkování
 - Hustotou řádkování rozumíme vzdálenost mezi dvěma sousedními drahami laseru. Tato vzdálenost má vliv na rozložení vnesené energie do výrobku.
- Tloušťka vrstvy
 - Tloušťka vrstvy má největší vliv na strojní čas, ovlivňuje odolnost vůči mechanickému namáhání a má vliv na výslednou drsnost povrchu výrobku. Zároveň ovlivňuje schopnost vytisknout detailní struktury dílu.
 - Sintrovaná vrstva má menší tloušťku než vrstva prášku nanesená pro sintrování.



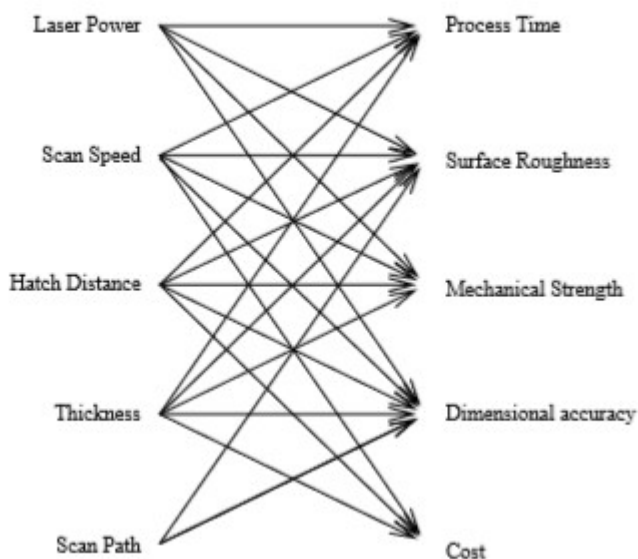
(a) Digital model



(b) Two kinds of surfaces in the physical part

Obrázek 16 – Digitální model (a) a (b) různé způsoby vzniku povrchů (povrchy označené α a β) [2]

- Rychlost tisku
- Výkon laseru [2]

Process Parameters**Resulting Properties**

Obrázek 17 - korelace procesních parametrů [2]

2.5 Technologické požadavky

Existuje riziko stažení, smrštění z povahy samotného procesu – toto riziko se minimalizuje využitím podpor.

Tisk začíná slinutím první vrstvy prášku na tiskovou paletu.

Tiskárny využívající kovový 3D tisk vyžadují zkušenou obsluhu, striktní dodržování požadavků na kalibraci, práci s materiálem, post processing a údržbu. [3]

2.5.1 Tisková paleta

Paleta slouží jako základ všech dílů, funguje jako struktura pro odvod tepla a zároveň slouží i jako tuhá struktura částečně zabraňující deformacím.

Tisková paleta (obvykle 20 – 40 mm šíře) je nejčastěji vyrobena ze stejného materiálu jako je využíváný kovový prášek.

Z principu DMLS vyplývá, že všechny díly jsou spojeny s paletou stejným způsobem, jako jsou spojeny vrstvy mezi sebou. V návrhu je proto třeba mít na paměti nutnost následného mechanického oddělení (řezání, frézování atd.) z čehož vyplývá různá drsnost v daném místě. Velikost, orientace součásti musí být brána v potaz při návrhu dílu.

2.5.2 Supporty (podporné struktury)

Obvykle je nezbytné využít supportů k dosažení požadované přesnosti, v kovovém 3D tisku jsou využívány hlavně z následujících důvodů:

- Slouží jako stavební struktura pro další vrstvy. Některé části tištěného dílu nemohou být připevněny ke stavební paletě přímo. Pro připojení těchto částí je prvně tištěn support a následně jsou na něho tyto tištěny.

- Support kotví část k tiskové paletě, zvyšují tuhost, drží tenké struktury v požadované poloze. Tato funkce supportů je vyžadována kvůli vysokým teplotním gradientům v součásti v průběhu tisku, jež vytváří zbytkové napětí. Součásti mají sklony k deformacím, prohnutím a v extrémních případech praskají.
- V závislosti na geometrii supportu slouží i jako takzvaný heat sink pro odvod tepla, odvádějící teplo od oblasti tisku a umožňují součásti kontrolovaně chladnout. [3]

2.6 Technologické omezení a vznik chyb

2.6.1 Velikost dílu

Obvyklá velikost tiskového prostoru je 200x200x200 mm. Pro velké díly nemusí být technologie DMLS vhodná. Výslednou cenu dílu a čas tisku ovlivňuje nejvíce jeho výškový rozměr při orientaci v tisku. Při návrhu je vhodné vyhnout se přebytkovému objemu materiálu.

Celková dosahovaná přesnost je technologií DMLS $\pm 0,05$ mm [1]

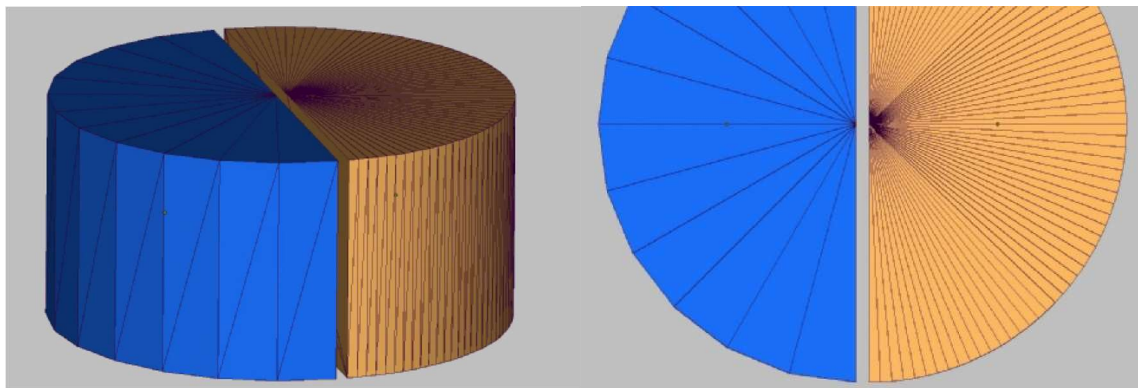
2.6.2 Tvarová přesnost

Přesná tvarová geometrie výsledného dílu je kritická pro finální uplatnění na trhu. Dosažení optimální tvarové přesnosti je komplikovaný úkol, protože tvarovou přesnost určuje mnoho faktorů:

2.6.2.1 Pre-processing error

3D díl vzniká nanášením 2D vrstev s uniformní tloušťkou. Chyba vzniká při určování přesné dráhy laseru v případě, že výška dílu, případně některé jeho části, není násobkem tloušťky vrstvy.

Další chyby jsou vnášeny při převodu 3D CAD modelu do formátu STL a následném výpočtu tvaru vrstev (slicing) [2]. Obecně platí, že hustota triangulační sítě při převodu modelu do STL formátu by neměla být hrubší než výška vrstvy avšak příliš velká hustota sítě způsobí zbytečně velké soubory 3D modelů a delší dobu zpracování dat [18].



Obrázek 18 - Různá jemnost triangulační sítě na válci [19]

2.6.2.2 Nepřesnost stroje

Nepřesnosti vnášené tiskárnou mohou být měřeny, kalibrovány a vhodně kompenzovány.

2.6.2.3 Random noise

Vlivem malé fluktuace tiskového prostředí nejsou dva 3D tisknuté výrobky kompletně stejné i při napodobení shodného nastavení parametrů. Takto vzniklé chyby definujeme jako random noise (náhodný hluk).

2.6.2.4 Chyby ve zpracování materiálu

Eliminace těchto chyb je nejkomplicovanější faktor v optimalizaci 3D tiskového procesu. Při tisku je teplota materiálu zvýšena nad bod tání. Následné ochlazování má za následek smršťování a stahování dílu. Tvarovou změnu je možno kompenzovat úpravou 3D modelu a to různými způsoby – nejjednodušší metodou je všechny 2D řezy zvětšit konstantním koeficientem [2].

2.6.2.5 Minimální radius

Technologií DMLS nelze dosáhnout libovolně malého radiusu. Na ostrých hranách a rozích tisknutého dílu je dosaženo radiusu odpovídajícího velikosti laserového paprsku (obvykle 0,4 mm). [3]

2.7 Materiály vhodné pro tisk technologií DMLS

Technologie DMLS využívá spékání kovového prášku. Z principu je možno tisknout materiály svařitelné.

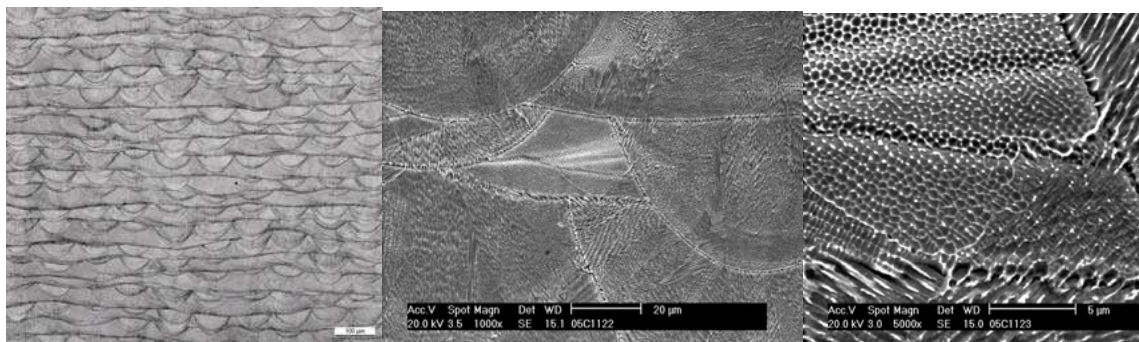
Je možné tisknout velké množství materiálů včetně hliníku, nerezové oceli, titanových, kobaltových, chromových slitin. Ve šperkařském průmyslu jsou využívány i drahé kovy jako zlato, platina, palladium a stříbro.

Teplotní vodivost materiálu hraje zásadní roli pro nastavení procesních parametrů. Pro součásti s náročnějšími požadavky, vysokými nároky na detailní strukturu, nebo kde je třeba dodržení úzkých tolerancí, je kvalifikovaným odhadem doporučováno využití nerezových ocelí nebo titanových slitin díky nízké teplotní vodivosti. [3]

Pro výběr materiálu má vliv i odolnost vůči vnitřním pnutím. [13]

2.7.1 Srovnání materiálu pro konvenční výrobu a DMLS

Díly vytvořené metodou DMLS mají mnohem menší velikost zrna ve srovnání s konvenční výrobou. Této jemnosti je dosaženo rychlým zchlazením lázně závislé na rychlosti pohybu laseru. Typicky mají zrna velikost přibližně 0,3 – 0,6 μm . [20]



Obrázek 19 - Sintrovaný materiál CobaltChrome MP1 tiskárnou EOSINT M 270, leptáno

zleva: zvětšení 10x, zvětšení 1000x, zvětšení 5000x [20]

2.8 Nebezpečí technologie a hygiena práce

Tiskárna musí být umístěna v prostředí s definovanou maximální prašností, obsluha musí být řádně vyškolená. Při přímé manipulaci s výrobkem je nutné využít ochranné pomůcky (rozhraní tištěných vrstev může být velice ostré).

Určité materiály (například titanové slitiny) mohou být ve formě prášku výbušné, je proto nutné s nimi nakládat se zvýšenou opatrností a bez styku se vzduchem. [21]

3 Tisknutý materiál ocel 1.2709

Dle značení oceli podle normy EN 10027-2 se jedná o speciální ocel skupiny 27. Komerční názvy VACO 180, MS1, V720, W720, W722 a další. [22]

Oceli 1.2709 odpovídá ocel X3NiCoMoTi18-9-5 (DIN).

Jedná se o vysokopevnou, vytvrditelnou ocel typu Maraging. Výborné tahové vlastnosti této oceli jsou získány díky precipitaci intermetalických fází tažných niklových matic s nízkým obsahem uhlíku. Tato precipitace předurčuje oceli vysokou pevnost v tahu, tažnost, vysokou rázovou energii i při nízkých teplotách, velice malou objemovou změnu při tepelném zpracování a dobrou vytvrditelnost. Tato ocel se vyznačuje malým zpevněním deformací, díky čemuž se dobře tváří i za studena. [23]

Tabulka 2 - Chemické složení oceli 1.2709 [24]

prvek	hmotnostní zlomek [%]
Fe	zbytek
Ni	17 – 19
Co	8,5 – 9,5
Mo	4,5 – 5,2
Ti	0,6 – 0,8
Al	0,05 – 0,15
Cr	≤0,5
C	≤0,03
Mn, Si	≤0,1
P, S	≤0,01

Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti [24]

Pevnost v tahu	bez vytvrzení	1100 MPa ± 100 MPa
	po vytvrzení	1950 MPa ± 100 MPa
Mez v kluzu	bez vytvrzení	1000 MPa ± 100 MPa
	po vytvrzení	1900 MPa ± 100 MPa
Proudložením při zlomu	bez vytvrzení	8% ± 3%
	po vytvrzení	2% ± 1%
Youngův modul		180 GPa ± 20 GPa
Tvrdost ¹	bez vytvrzení	33 – 37 HRC
	po vytvrzení	50 – 54 HRC
Houževnatost ²	bez vytvrzení	45 J ± 10 J
	po vytvrzení	11 J ± 4 J

3.1 Tepelné zpracování

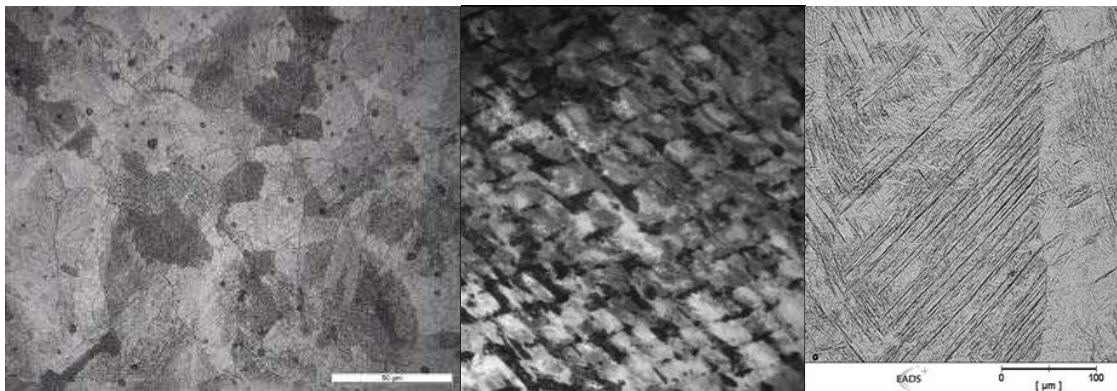
Kvůli vnášení vysokého množství měrné energie, různě vysokému odvodu tepla z lázně (různě vysokému teplotnímu gradientu v průběhu tisku) a kvůli opětovným ohřevům materiálu v průběhu tisku je obvyklé díly tištěné technologií DMLS žíhat. V závislosti na požadovaných vlastnostech lze materiál žíhat s ohledem na požadovanou tvrdost nebo houževnatost.

¹ Měření tvrdosti dle Rockwella C (HRC) podle DIN EN ISO 6508-1

² Měřeno zkouškou rázem v ohybu dle Charpyho ČSN ISO 148-1

Časté je i využití materiálů vyžadujících tepelné zpracování i v případě využití konvenční technologie obrábění. [13]

V určitých případech bylo zjištěno snížení pevnosti při obvykle nastavených parametrech žíhání. Tento zdánlivě nelogický jev je vysvětlován rozpuštěním metalických struktur austenitu a martenzitu/ferritu delta vzniklých rapidním ohřevem, natavením a rapidním ochlazením a tuhnutím. V průběhu obvykle nastaveného žíhání tyto struktury přetrvávají a tvorba martenzitu je bržděna, což má za následek menší pevnost oproti oceli konvenčně obrobenej. [20]



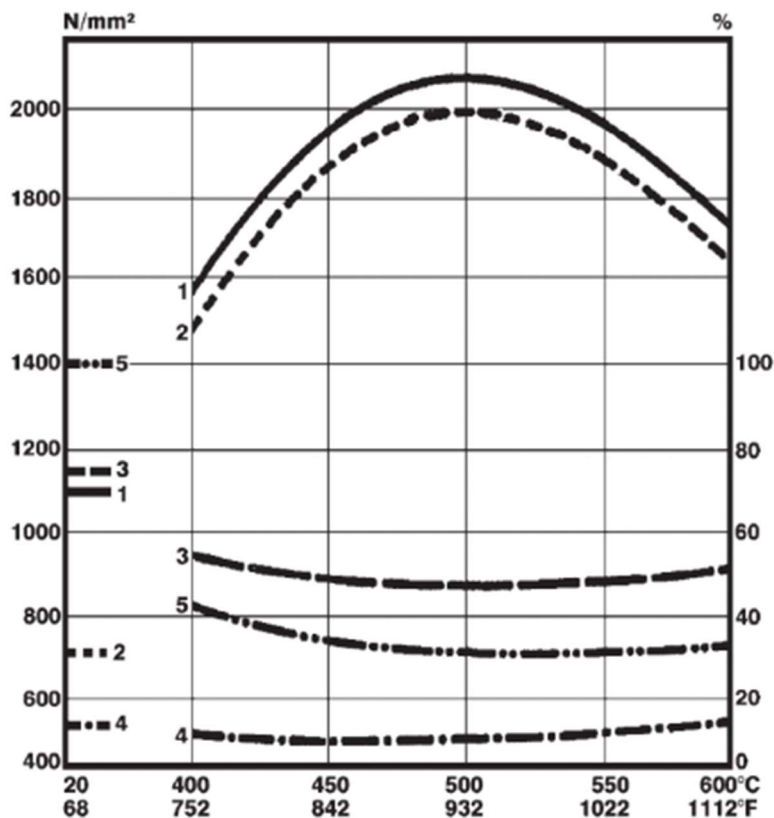
Obrázek 20 - zleva: Nerezová ocel GP1, zvětšení 50x, leptáno; Nerezová ocel GP1, TEM; Titanová slitina Ti64 optická mikrofografie [20]

Dalším důvodem k žíhání výrobků je nadměrný růst krystalů. V průběhu tisku obvykle dochází k natavení nové vrstvy po ztuhnutí předcházející. Takto vytvořený materiál se pak vyznačuje jemným zrnem a "svarovými" liniemi (Obrázek 20 - uprostřed). Může však docházet k natavení více vrstev a pomalému chladnutí. V určitých případech může materiál začít tvořit dendritické struktury kolmé k rovině nově naneseného prášku s mnohem větší výškou než je tloušťka vrstvy prášku. Jev je vysvětlován dostatečně velkým vnesením tepla do starší vrstvy a jejím natavením, díky čemuž jsou odstraněny předchozí hranice krystalu, což krystalu umožňuje následný růst a prorůstání mnoha vrstvami.

Je důležité podotknout, že výsledná materiálová struktura je závislá na tiskových parametrech a strategii tisku (tvary drah laseru). Je obvyklé s bodem laseru přeskokovat z místa na místo, pokud možno co nejvíce, pro umožnění dostatečného zchlazení sintrovaného materiálu. [20]

Dosahované parametry při tepelném zpracování:

- Žíhání při 820°C ve vzduchu – dosahovaná tvrdost maximálně 320 HB
- Precipitační vytvrzování 490°C/vzduch/6 hodin – získatelná tvrdost přibližně max 55 HRC [23]



1. Pevnost v tahu v N/mm²
2. 0,2% smluvní mez kluzu N/mm²
3. Změna průřezu %
4. Prodloužení A_s %
5. Rázová práce (DVM), J

 Graf 4 - Graf stárnutí pro 820°C/1 hodinu ve vzduchové atmosféře³ [23]

Tabulka 4 – Vlastnosti materiálu pro vytvrzený a nevytvrzený stav [25]

Vlastnost	Precipitačně vytvrzeno	Nevytvrzený stav
Pevnost v tahu, N/mm ²	1900 – 2100	980 - 1100
R _{p0,2} , N/mm ²	~1800	~900
Prodloužení A _s , %	9	10
Kontrakce, %	40	60
Rázová práce ⁴ , J	25	50
Únavová pevnost (N=10 ⁷), N/mm ²	>735	-
R _{p0,2} , N/mm ² při	100°C	1830
	200°C	1720
	300°C	1620
	400°C	1490
	500°C	1130

³ Doba výdrže při teplotě stárnutí: 3 hodiny; pro maximální tvrdost jde žíhat 6 hodin při teplotě 490°C

⁴ Měřeno zkouškou rázem v ohybu dle Charpyho ČSN ISO 148-1

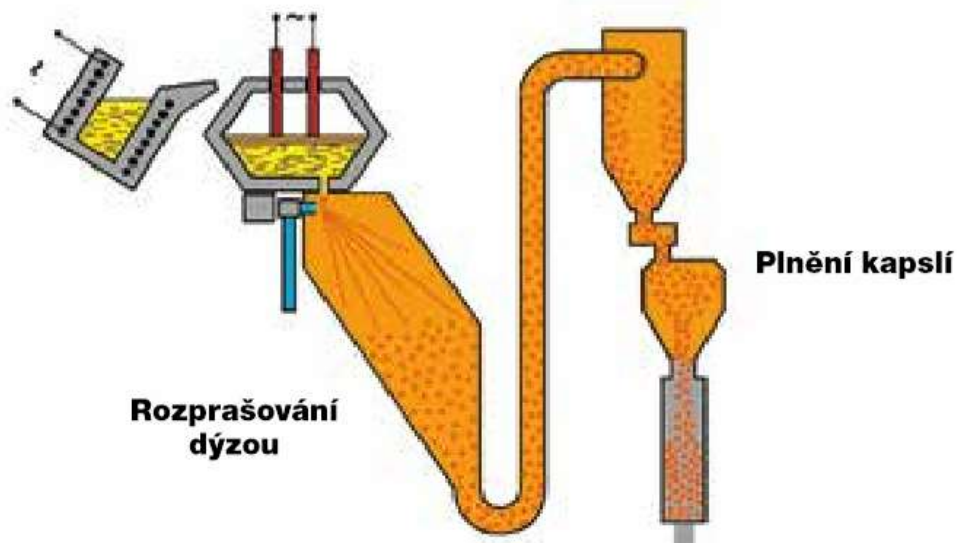
Tabulka 5 - Fyzikální vlastnosti oceli 1.2709 [25]

Hustota		8,1 kg/dm ³
Měrná tepelná kapacita		420 J/(Kg·K)
Tepelná vodivost		21 W/(m·K)
Elektrický odpor		0,42 Ω·mm ² /m
Modul pružnosti v tahu		2·10 ⁵ N/mm ²
Modul pružnosti ve smyku		73·10 ³ N/mm ²
Změna délkových rozměrů při stárnutí		0,08 %
Teplotní roztažnost oproti 20°C	100°C	10,3·10 ⁻⁶ m/(m·K)
	200°C	10,7·10 ⁻⁶ m/(m·K)
	300°C	11·10 ⁻⁶ m/(m·K)
	400°C	11,3·10 ⁻⁶ m/(m·K)
	500°C	11,6·10 ⁻⁶ m/(m·K)

3.2 Ocel 1.2709 ve formě prášku pro technologii DMLS

Prášek se pro metodu DMLS vyrábí práškovou metalurgií a to rozprašováním taveniny tlakovou dýzou viz Obrázek 21. [25]

Tavení



Obrázek 21 - Výroba prášku [25]

Výrobce Misan značí tento materiál komerčním názvem CL 50WS a udává pro něho následující vlastnosti dle tepelného zpracování. [21]



Tabulka 6 - Vlastnosti materiálu CL 50WS [21]

	CL 50WS - 1	CL 50WS - 2	CL 50WS - 3
Tepelné zpracování	Tepelně neupravený	Tepelně zpracovaný při 490°C	Tepelně zpracovaný při 540°C
Tvrdość, HRC	25-40	52-54	48
Mez kluzu, N/mm ²	950	1800	1550
Pevnosť v tahu, N/mm ²	1100	1900	1650
Prodloužení, %	4	2-3	2-3
Modul pružnosti, ·10 ³ N/mm ²	200	200	200
Tepelná vodivost, W/mK	21	21	21

Tabulka 7 - Přehled parametrů týkajících se 3D tisku udávaných výrobcem [24]

minimální doporučená tloušťka vrstvy	40 μm	
typicky dosažitelná přesnosť	±40 - 60 μm nebo ±0.2 %	
změna rozměru vytvrzování ⁵	0,08%	
minimální tloušťka stěny	0,3 - 0,4 mm	
drsnosť povrchu	po tryskání	Ra 4 – 6 μm; Ry 20 – 50 μm
	po leštění	Rz až <0,5 μm
objemový přírůstek	plná výplň	3 – 3,6 mm ³ /s
hustota při standartních podmínkách		8,0 – 8,1 g/cm ³

Tabulka 8 uvádí srovnání maximálních možných dosahovaných parametrů výrobků získaných technologií DMLS a konvenčními technologiemi. Z tabulky vyplývá, že technologie DMLS je schopna dosahovat výrobků se stejně kvalitními, nebo alespoň podobnými materiálovými vlastnostmi jako konvenční technologie. Materiály se jen málo liší v dosahované tvrdosti, výrazněji se liší v hodnotě meze kluzu.

Odlišnosti v hodnotách se dají přisuzovat rozdílným materiálovým vlastnostem (velikost zrna). [17]

Tabulka 8 - Srovnání maximálních dosahovaných vlastností technologií DMLS a konvenčními technologiemi

	Konvenční technologie	DMLS
Tvrdość, HRC	55	54
Mez kluzu, N/mm ²	2100	1800
Pevnosť v tahu, N/mm ²	1800	1900

⁵ Teplota 490°C, 6 hodin, vzduch

4 Závěr

Cílem práce bylo zmapovat technologii kovového 3D tisku, zejména technologii DMLS.

V úvodu práce byla provedena rešerše zaměřená na výhody a nevýhody kovového tisku, jeho silné a slabé stránky, vize do budoucnosti a potenciál výroby. Technologie umožňuje díly tvarově optimalizovat takovým způsobem, jež není vyrobitelný jinou technologií. V závislosti na konkrétní aplikaci dokáže technologie snížit hmotnost dílu, zlevnit výrobu, zkrátit dobu od návrhu k uvedení výrobku na trh, případně dosáhnout dalších zlepšení výrobního procesu.

Další část byla zaměřena na technologii DMLS. Byl popsán její princip, vhodné konstrukční úpravy návrhu pro maximální využití jejího potenciálu, parametry procesu a technologické požadavky s omezeními.

V závěrečné části byly popsány vlastnosti materiálu vhodného pro tisk metodou DMLS. Byly popsány odlišnosti v materiálové struktuře a v materiálových vlastnostech při využití technologie DMLS ve srovnání s konvenčními způsoby výroby.

DMLS je schopno produkovat díly ve stejné materiálové kvalitě jako konvenční technologie. Volba procesních parametrů však obvykle zohledňuje ekonomičtější pojetí tisku s ohledem na rychlost.

Technologie kovového tisku momentálně funguje jako vhodné doplnění klasické výroby, avšak na současném trhu si již vydobyla své místo a můžeme předpokládat, že expanze do dalších výrobních odvětví bude pokračovat, jakož i její optimalizace a zlepšování. [11]

Cíle práce s ohledem na rozsah byly dosaženy.

5 Bibliografie

- [1] DUDA, Thomas a L. RAGHAVAN. 3D Metal Printing Technology. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2016, **49**(29), 103-110 [cit. 2018-07-31]. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.11.111. ISSN 24058963. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896316325496>
- [2] YU, Ning. *Process Parameter Optimization for Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* [online]. National University of Singapore 21 Lower Kent Ridge Road Singapore 119077, 2005 [cit. 2018-06-14]. Dostupné z: http://scholarbank.nus.sg/bitstream/10635/14768/1/Thesis_NingYu.pdf. Disertační práce. National University of Singapore.
- [3] REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. 3D HUBS. *The 3D Printing Handbook: Technologies, desing and applications*. First edition. Amsterdam, The Netherlands: Coers & Roest, 2017. ISBN 9789082748505.
- [4] JAROSLAV, Jiroutka. *Vliv technologických parametrů na součásti vyrobené technologií DMLS*. České vysoké učení technické v Praze Zikova 1903/4 166 36 Praha 6 Česká republika, 2015. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Strojní fakulta. Vedoucí práce Jan Beránek.
- [5] Direct Metal Laser Sintering & Selective Laser Melting. SPI Lasers [online]. Southampton (UK): SPI Lasers, 2018 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.spilasers.com/application-additive-manufacturing/selective-laser-sintering-and-melting/>
- [6] KELLNER, Tomas. Fired Up: GE Successfully Tested Its Advanced Turboprop Engine With 3D-Printed Parts. GE Reports [online]. California: General Electric, 2018 [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <https://www.ge.com/reports/ge-fired-its-3d-printed-advanced-turboprop-engine/>
- [7] KADING, Benjamin a Jeremy STRAUB. Utilizing in-situ resources and 3D printing *structures for a manned Mars mission*. Acta Astronautica [online]. 2015, 107(00945765), 317-326 [cit. 2018-03-16]. DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.11.036. ISSN 00945765. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0094576514004901>
- [8] VAROTSIS, Alkaios. 3D Printing vs. CNC machining. *3D Hubs* [online]. Amsterdam: 3D Hubs, 2018 [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-vs-cnc-machining>
- [9] BUREN, Alec. D Systems completes GE aircraft bracket challenge with metal 3D printing solution. In: 3Ders [online]. Katwijk (The Netherlands): 3Ders, 2016 [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20160505-3d-systems-completes-ge-aircraft-bracket-challenge-with-metal-3d-printing-solution.html>
- [10] MILLS, Keith. Topology Optimization and DMP Combine to Meet GE Aircraft Engine Bracket Challenge. Metrology News [online]. Castle Eaton (Wiltshire UK): Keith Mills, 2016 [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <http://metrology.news/topology-optimization-dmp-meet-aircraft-challenge>



- [11] *Integrative production technology*. 2016954708. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-331-9474-519.
- [12] FitStation [online]. *Palo Alto (California): Hewlett-Packard, 2017 [cit. 2018-07-08]*. Dostupné z: <https://www.fitstation.com/>
- [13] LEUTENECKER-TWELSIEK, Bastian. *Grundlagen LMF*. Ditzingen, 2017.
- [14] BHAVAR, Valmik, Prakash KATTIRE, Vinaykumar PATIL, Shreyans KHOT, Kiran GUJAR a Rajkumar SINGH. *A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing* [online]. Bharat Forge Ltd., Pune, India, 2014 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Valmik_Bhavar2/publication/285982651_A_review_on_powder_bed_fusion_technology_of_metal_additive_manufacturing/links/570f25de08aed4bec6fdf38d/A-review-on-powder-bed-fusion-technology-of-metal-additive-manufacturing.pdf. Kalyani Centre for Technology and Innovation (KCTI).
- [15] SIMCHI, A a H POHL. Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2003, 359(1-2), 119-128 [cit. 2018-07-31]. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00341-1. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509303003411>
- [16] Direct Metal Laser Sintering. CustomPartNet [online]. Olney (Maryland): CustomPartNet, 2008 [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>
- [17] GRATTON, Alexander. Comparison of Mechanical, Metallurgical Properties of 17-4PH Stainless Steel between Direct Metal Laser Sintering (DMLS) and Traditional Manufacturing Methods [online]. 1025 N Broadway Milwaukee, WI 53202, 2012 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/ffa3/fb7e1ff404d10ff7577bf5905510c0316603.pdf>. Proceedings of The National Conference On Undergraduate Research (NCUR). Mechanical Engineering Department Milwaukee School of Engineering.
- [18] Design Rules for DMLS. Mnichov, 2013. Dostupné také z: <http://www.3dimpuls.com/en/dokumenta>
- [19] KERL, Franz-Josef. Design Overview LS. Mnichov, 2011. Dostupné také z: <http://www.3dimpuls.com/en/dokumenta>
- [20] SHELLABEAR, Mike a Olli NYRHILÄ. Materials For Direct Metal Laser-Sintering. Mnichov, 2013. Dostupné také z: <http://www.3dimpuls.com/en/dokumenta>
- [21] SYSTÉMY PRO LASEROVÉ SPÉKÁNÍ KOVŮ: Souhrnný katalog. Lysá nad Labem, 2017.
- [22] Převodník ocelí Böhler. 2016. Dostupné také z: <http://www.bohler.sk/media/Böhler%20katalóg%202016.pdf>
- [23] Hochfester martensitaushärtbarer stahl: Maraging high strength steel. Kapfenberg (Austria), 2009.
- [24] Material data sheet (provisional data). München, 2007.



[25] Materiálový list nástrojových ocelí Böhler. b.r.