

Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of of Machine Design

Optimalizace procesních parametrů pro výrobu strukturovaných dílů technologií Selective Laser Melting

[Projekt dizertační práce]

[PhD Thesis Project]

Autor práce: **Ing. Radek Vrána**
Author

OBSAH

OBSAH	3
1 NÁZEV PRÁCE	4
2 KLÍČOVÁ SLOVA	5
3 ÚVOD	6
4 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	8
4.1 Mechanické vlastnosti SLM vzorků	9
4.1.1 Mechanical properties of AlSi10Mg produced by Selective Laser Melting [11], (Kempen, 2012)	9
4.1.2 Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior [12], (Brandl, 2012)	10
4.1.3 The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Selectively Laser Melted Stainless Steel Microlattice Structures [13], (Tsopanos, 2010)	11
4.2 Procesní parametry a materiálové vlastnosti	12
4.2.1 Rozměrová nepřesnost a vliv orientace při výrobě tenkých prutů	12
4.2.2 Procesní parametry a materiálové vlastnosti	14
4.2.3 Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting [19], (Qiu, Ch.; 2015)	16
4.2.4 The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder [20] (Zhang, B. 2013)	17
4.3 Predikce mechanických vlastností	19
4.3.1 Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique [21], (Smith, 2013)	19
4.3.2 An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures [22] (Ushijima, 2011)	21
4.3.3 Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures [23], (Grümrück, 2013)	22
5 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků na základě kritické rešerše	24
6 Podstata a cíle disertační práce	26
7 Vědecká otázka a pracovní hypotéza	27
7.1 Vědecká otázka	27
7.2 Pracovní hypotéza	27
8 Způsob řešení a použité vědecké metody	28
9 Časový rozvrh a etapy řešení	29
10 Odůvodnění nutnosti a potřebnosti řešení dané problematiky v daném čase	30
11 Popis navrhovaných koncepčních a metodických postupů	31
12 Spolupráce s jinými institucemi	33
13 Předpokládané náklady spojené s řešením	34
13.1 Předpokládané náklady na řešení práce	34
14 Charakteristika předpokládaného výsledku řešení disertační práce	35
15 BIBLIOGRAFIE	36

1 NÁZEV PRÁCE

Optimalizace procesních parametrů pro výrobu strukturovaných dílů
technologí Selective Laser Melting

Optimization of process parameters for lattice structures parts made by Selective Laser
Melting technology

2 KLÍČOVÁ SLOVA

Odlehčené konstrukce, mřížková struktura, AlSi10Mg, mechanické vlastnosti, procesní parametry, aditivní technologie

Leight-weight construction, Lattice Structure, AlSi10Mg, Mechanical Properties, Process parametrs, Additive Technology

3 ÚVOD

Aditivní technologie se v posledních letech stala rozšířenou a populární výrobní technologií, která dokáže velmi rychle vytvořit požadovanou součást z nejrůznějších materiálů. Aditivní technologie se také začínají zapojovat do výrobního procesu nejen ve fázi prototypu, ale i do výroby finálních funkčních součástí tzv. Additive manufacturing. Speciální oblastí aditivních technologií jsou Selective laser melting – SLM a Direct Metal Laser Sintering - DMLS, které umožňují tvorbu plně funkčních dílů komplexních tvarů vyrobených z kovu. Díky tomu je možné zapojit do návrhu mnohdy vhodnější obecné tvary, které díky své rozmanitosti mají lepší mechanické vlastnosti než pouhý plný materiál.

Inspiraci pro využití vhodných prostorových struktur můžeme nalézt především v přírodě. Například lidská kost není kompletně vyplněna kostní tkání, ale je tvořena několika částmi. Jednou z nich je i tzv. kost houbovitá (*spongiosa*), která je architektonicky usprádaná do kostních trámčů (viz obr 3.1). Tato prostorová struktura zajišťuje vysokou pevnost a výborné mechanické vlastnosti. [1]



Obr. 3.1 Řez kostí [2]

Využití těchto technologií ukázali konstruktéři z firmy EDAG Group. Tato firma v roce 2014 na Ženevském autosalonu představila rám automobilu, který byl vyrobený jako jeden kus za využití aditivních technologií (viz obr. 3.2). Tvůrci se při návrhu nechali inspirovat krunýřem a kostrou želvy. Jednotlivé prvky jsou sendvičové materiály vyplněné porézní strukturou, která nahrazuje vyplnění kostí. Celý rám je potom velmi lehký a zároveň tuhý [3].

V nedávné minulosti byla výroba odlehčených konstrukcí omezena zejména výrobní technologií. Konvenční procesy jako jsou frézování, soustružení nebo odlévání ukázaly velké množství omezení, a to zejména v tvarové rozmanitosti návrhu

lehkých struktur. Další možností mohou být kovové pěny. U těchto materiálů ovšem není možné zaručit přesnou vnitřní strukturu.

Tato práce bude zaměřena na přesnou výrobu odlehčených (light – weight) konstrukcí technologií SLM a predikci jejich mechanických vlastností.



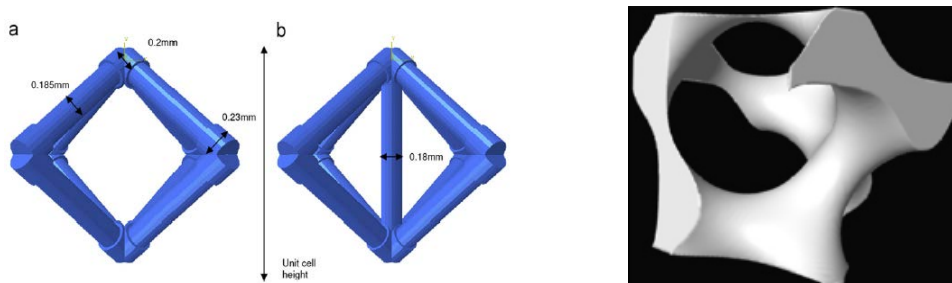
Obr. 3.2 Edag Genesis [3]

4 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Technologie Selective Laser Melting (SLM) je výrobní technologie, která se nově začíná uplatňovat v oblasti Rapid Prototyping (RP) a Rapid Manufacturing (RM). Hlavní výhodou technologie SLM je velmi rychlé získání reálného a funkčního kovového dílu [4]. Nástup této technologie byl značně závislý na vývoji výkonných laserů. Až na začátku 21. století dochází k vývoji laserových systémů, které umožňují úplné a kontrolované roztavení kovových prášků. [5]. Technologie SLM je možné použít ve všech fázích vývoje produktu od prototypu, který má vlastnosti konvenčně vyráběných kovových dílů, až po malosériovou výrobu, a to zejména v odvětvích jako letecký průmysl, lékařství a kosmonautika. [6,7].

Tato technologie využívá při stavbě dílů tzv. powder bed systém, kde je vyráběný díl obklopen nevyužitým kovovým práškem. To umožňuje vyrábět i tvarově velmi složité a komplexní díly, které jsou jinými technologiemi jen těžko vyrobitelné. Velmi dobré výsledky dosahují tzv. light-weight (odlehčené) příhradové konstrukce, které jsou tvořeny pravidelně se opakující základní buňkou. Tyto buňky jsou zpravidla prutové konstrukce různých tvarů [8-10] (viz obr. 1.1). Můžou mít také složitější prostorový tvar, např. gyroid. Těmito strukturami se zabývali **Yan et al. [10]**, kteří testovali vyrobitelnost gyroidních struktur (viz obr. 1.1) v závislosti na velikosti základní buňky. Tento speciální tvar byl zvolen kvůli samonosnosti celé struktury již v průběhu stavby. Proto není nutné použití podpůrných struktur při stavbě výrazně větších základních buněk, než je tomu u prutových konstrukcí. Tím dochází k výrazně nižší spotřebě materiálu.

Aby bylo možné, tyto light-weight (odlehčené) konstrukce začít využívat v průmyslu, je nutné umět predikovat výsledné vlastnosti vyrobených těles, a to zejména mechanické [11,12,13], materiálové [17,18,19,20] a tvarové. [15,16]. To je velmi obtížné, protože SLM proces je definován velkým množstvím parametrů, jako jsou například výkon laseru, rychlost skenování, vzdálenost jednotlivých vrstev, strategií skenování povrchu (šrafování, atd.), pracovní atmosféra, vlastnosti dodávaného materiálu. Všechny tyto parametry mají vliv na fyzikální jevy, které probíhají při stavbě, a v konečném důsledku na výslednou kvalitu vyrobených prutů a jejich rozměrovou přesnost a mechanickou odolnost.



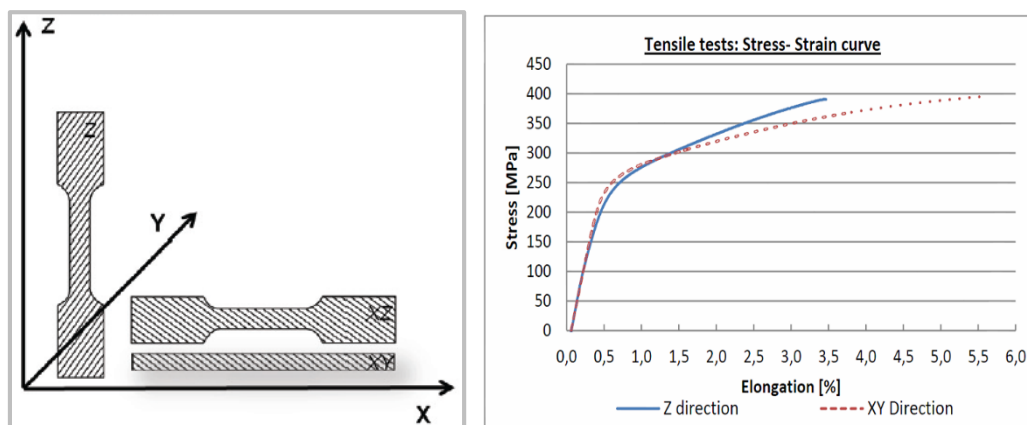
Obr. 4.1 Prutové základní buňky (vlevo); Gyroidní buňky (vpravo)

4.1 Mechanické vlastnosti SLM vzorků

4.1.1 Mechanical properties of AlSi10Mg produced by Selective Laser Melting [11], (Kempen, 2012)

V této práci jsou zkoumány mechanické vlastnosti, jako mez pevnosti, prodloužení, mez kluzu, houževnatost a tvrdost, vzorků vyrobených technologií SLM z materiálu AlSi10Mg. Mechanické vlastnosti takto vyrobených součástí jsou porovnány s tabulkovými hodnotami litého materiálu AlSi10Mg.

Kempen et al. vyrobili několik testovacích vzorků, které se vzájemně lišily orientací při výrobě (viz obr. 4.2). Tyto vzorky byly postupně zatěžovány a testovány pro získání strukturálních a mechanických vlastností jednotlivých konfigurací.

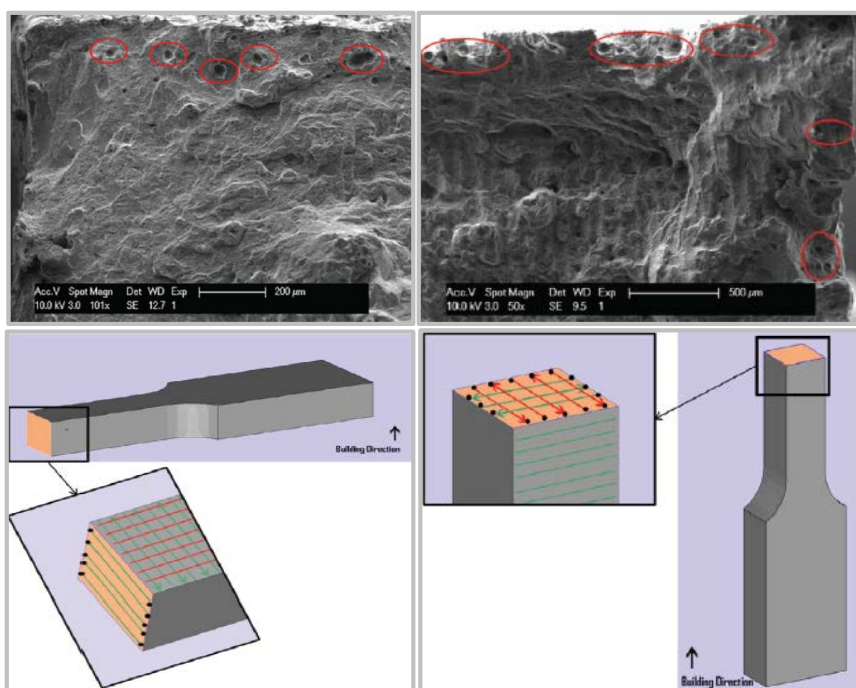


Obr. 4.2 Výrobní konfigurace těles; Rozdíly v mechanických vlastnostech různých orientací

Závěr

Součásti vyrobené technologií SLM mají mechanické vlastnosti (tvrdost, mez pevnosti, prodloužení, nárazovou práci) stejné nebo vyšší než tabulkové hodnoty litého materiálu. Vysvětlení spočívá ve velmi jemném mikrostrukturuře a rozložení Si fáze.

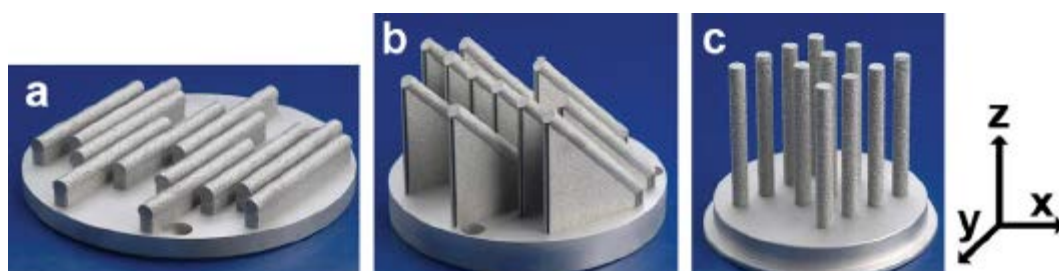
SLM vzorky vykazují anizotropní prodloužení do porušení. Při různých konfiguracích vzorků při stavbě jsou i jiné prodloužení. Tento jev velmi ovlivňuje tvorba pórů v blízkosti povrchu, které fungují jako iniciátory trhlin. Díly stavěné v ose Z („na výšku“) mají výskyt těchto pórů výrazně vyšší než součásti stavěné v ose XY (viz obr. 4.3). S tím souvisí prodloužení, které mají vzorky v ose Z výrazně nižší než vzorky v ose XY.



Obr. 4.3 Vliv orientace skenování laseru na povrchovou pórovitost

4.1.2 Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior [12], (Brandl, 2012)

Brandl et al. [15] zkoumal mechanické vlastnosti testovacích těles z materiálu AlSi10Mg. Tyto tělesa byla podrobena tahové zkoušce. U vzorků byla měněna orientace při stavbě (viz obr. 4.4), teplota uvnitř stavební komory a tepelná úprava vzorků po výrobě. Výsledky byly dány do korelace se vstupními parametry výroby. Bylo prokázáno, že největší vliv na mechanické vlastnosti má tepelná úprava po vyrobení součástí a nejmenší vliv má postavení vzorků při výrobě.

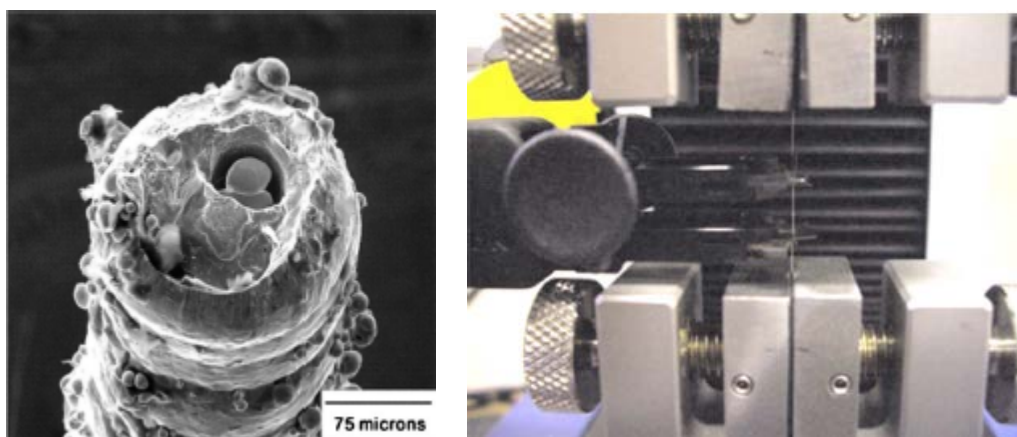


Obr. 4.4 Orientace testovaných vzorků [15]

Závěr: Brandl et al. došli k odlišným poznatkům o postavení vyrobených vzorků než Kempen et al. Rozdíl ve výsledcích je dán tím, že Brandl et al použili technologii SLM pouze k výrobě polotovaru. Z vyrobených válečků byla posléze vyrobena standardní tělíska pro mechanické zkoušky. Nejvíce ovlivněná povrchová vrstva byla tedy odstraněna.

4.1.3 The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Selectively Laser Merged Stainless Steel Microlattice Structures [13], (Tsopanos, 2010)

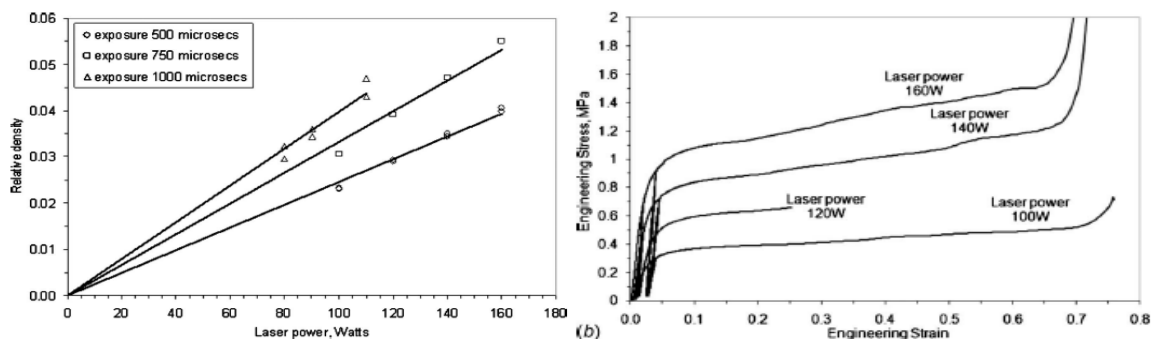
Za použití technologie SLM bylo vyrobeno několik bloků periodicky se opakujících základních buněk z materiálu 316L. Pro získání odpovídající kvality vyráběných bloků byla zkoumána různá nastavení procesních parametrů jako výkon laseru a doba expozice. Jednoosé tlakové zkoušky prokázaly vliv těchto parametrů na získané mechanické vlastnosti kovových struktur. Dále byl zjištěn lineární vztah mezi plošným napětím a modulem E, vzhledem k relativní hustotě struktur.



Obr. 4.5 Snímek pórovitosti prutu pomocí CT (vlevo), způsob tahové zkoušky prutů (vpravo)

Autor uvádí, že motivací pro tento článek bylo porovnání odlehčeného buněčného materiálu se současnými materiály používanými v letectví a kosmonautice. Pokud mají být tyto materiály použité v těchto odvětvích, musí být prokázáno, že lze předvídat mechanické vlastnosti těchto materiálů. Výrobní parametry je nutné přesně definovat stejně jako kontrolní postupy získaných vlastností.

Pro získání mechanických vlastností autoři vyrobili několik jednotlivých prutů, které následně podrobily tahové zkoušce (viz obr. 4.5).



Obr. 4.6 Vlastnosti materiálu v závislosti na procesních parametrech – hustota (vlevo) a napětí (dole)

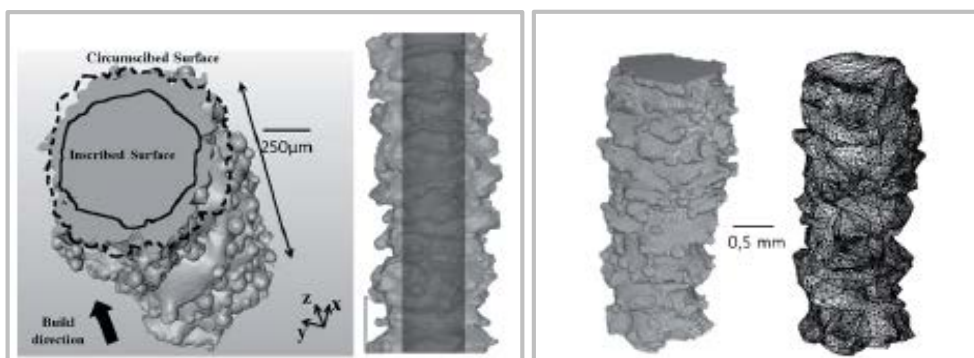
Závěr

Bylo prokázáno, že SLM technologie je vhodná pro výrobu bloků periodicky se opakujících prutových buněk. Bloky tvořené základní buňkou o velikosti 2,5mm byly popsány mechanickými vlastnostmi jako mez kluzu a pevnosti v tlaku, tuhost. U těchto vlastností byla zkoumána korelace s relativní hustotou a výrobními parametry SLM zařízení (viz obr. 4.6). Při použití malého výkonu laseru do 80W, se v prutech tvořilo velké množství pórů (viz obr. 4.5). To mělo za následek pokles pevnosti materiálu o 50% vzhledem k tabulkovým hodnotám oceli 316L. Optimální nastavení pro získání tabulkových mechanických hodnot vzorků vyrobených na zařízení SLM bylo stanoveno na 500 μ s a výkon 140W.

4.2 Procesní parametry a materiálové vlastnosti

4.2.1 Rozměrová nepřesnost a vliv orientace při výrobě tenkých prutů

4.2.1.1 Impact of EBM Fabrication Strategies on Geometry and Mechanical Properties of Titanium Cellular Structures [15], (Suard, 2014)



Obr. 4.7 Efektivní objem materiálu (vlevo), zdigitalizovaná povrch prutu (vpravo)

Autoři článku zkoumají zjištěné rozdíly mezi CAD daty a reálně vyrobenými SLM vzorky malých prutových konstrukcí. Tyto konstrukce byly po vyrobení analyzovány na CT. Na základě této analýzy je definován tzv. „efektivní objem materiálu“, který je porovnáván s parametry výroby a tuhostí vzorku. Je provedena MKP analýza prutu s reálnými nerovnostmi povrchu.

Tato práce navrhuje postup predikce tuhosti malých prutových konstrukcí. Vzhledem k procesu tavení kovového prášku při výrobě dílů, dochází k odchylkám v geometrii a předpokládané tuhosti prutů. Tyto odchylky byly zjišťovány pomocí CT. Na základě této analýzy je možné předvídat tuhost prutů v závislosti na jejich orientaci, parametrech výroby a nominálních rozměrech prutů.

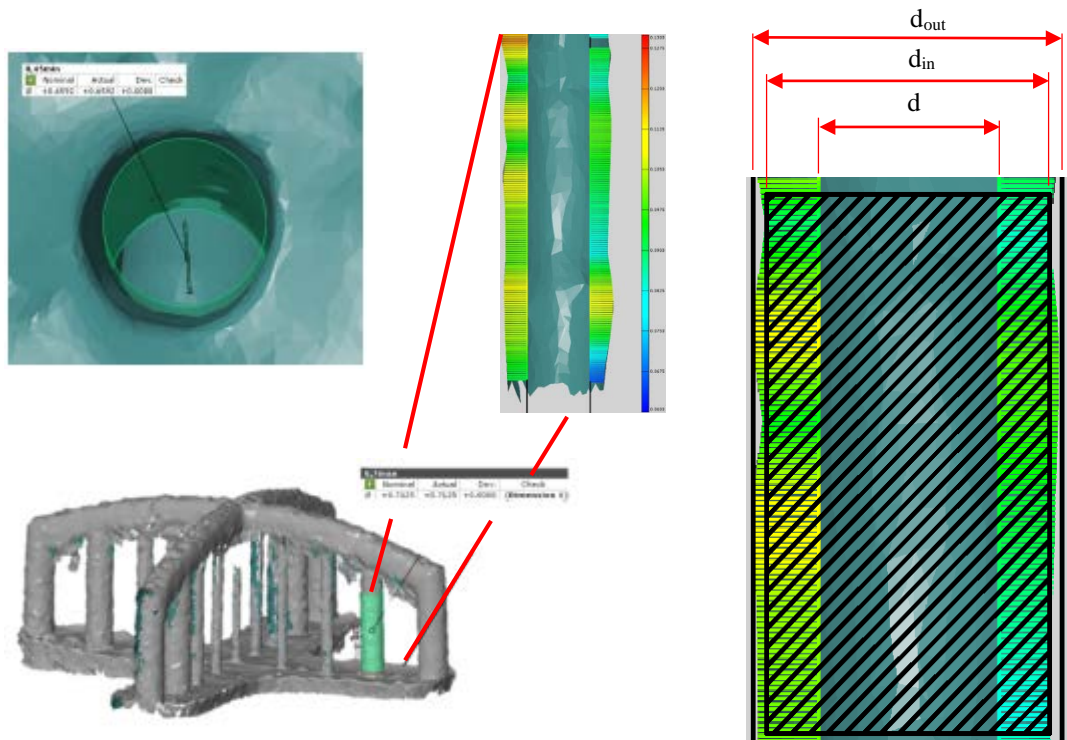
Je definován tzv. „efektivní objem“ (viz obr. 4.7), který lépe odpovídá výsledné tuhosti vyrobeného prutu. Pro zpřesnění tohoto parametru byl zdigitalizován povrch (viz obr. 4.7), který byl podroben MKP analýze. Autoři ukazují MKP analýzu jako další možnost pro získání definovaného „efektivního objemu“. Prezentované závěry zdůrazňují rozdíl mezi skutečnou a očekávanou tuhostí, s kterou je nutné počítat při predikci tuhosti prutových struktur.

4.2.1.2 . Dimensional accuracy of single beams of AlSi10Mg alloy and 316L stainless steel manufactured by SLM [16], (Koutný, Vrána; 2014)

Autoři článku stejně jako Suard et al. [15] popisují skutečnost, že při výrobě prutů velmi malých rozměrů mají povrchové nerovnosti a materiálové vady velký význam. Kempen et al. [11] popisují situaci, kdy na objemovém tělese vznikne na povrchu pórovitá vrstva, která má odlišné mechanické vlastnosti (horší) než zbytek tělesa. Teoreticky lze dostatečně tenký prut považovat pouze za povrchovou vrstvu v celém jeho objemu. Jeho mechanické vlastnosti jsou potom rozdílné od mechanických vlastností objemového tělesa.

Dalším zásadním parametrem je nepřesnost výroby při takto malých rozměrech. To má souvislost s parametry výroby a přestupem tepla do okolního prášku. Tím dochází k natavování okolních částic a jejich nalepení na povrch prutu. Vyrobený prut má potom jiné rozměry, než byly rozměry požadované.

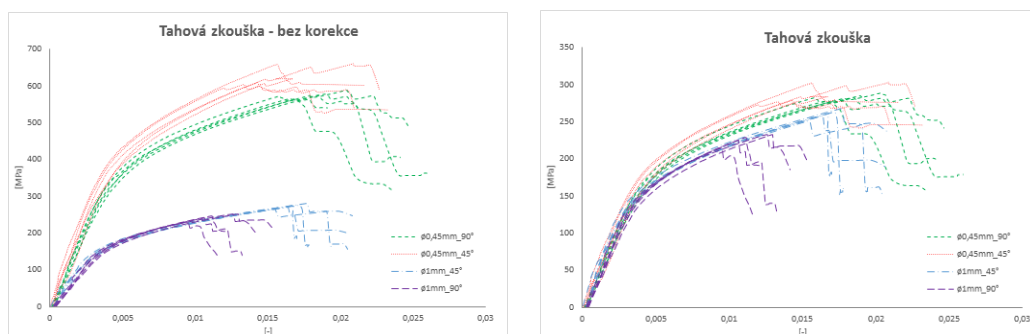
Autoři zkoumali vliv orientace prutů při výrobě na jejich rozměrovou přesnost. Byla vyrobena sada testovacích těles s různým úhlem natočení vůči základní desce (viz obr. 4.8), která byla po vyrobení analyzována pro zjištění reálných rozměrů vyrobených prutů. Při rozměrové analýze byl k určení „efektivního průměru“ použit největší vepsaný válec, který leze do prutu vložit. Tím byla odstraněna nalepená povrchová vrstva, která dále nevstupuje do výpočtu.



Obr. 4.8 Vyhodnocení rozměrové přesnosti jednotlivých prutů

Dále byla vyrobena tělesa pro tahovou zkoušku s průměrem prutu 1mm a 0,45 mm. Obě tělesa byla také vyrobena v konfiguraci 90° a 45° vůči základní desce. Tělesa byla navržena tak, že průřez těles je i při různém průměru prutu stejný. Díky tomu lze v ideálním případě očekávat stejné mechanické vlastnosti.

Po přepočítání tahové zkoušky s „efektivním průměrem“ byly zjištěny hodnoty napětí pro obě tělesa stejné (viz obr. 4.9).



Obr. 4.9 Výsledky tlakové zkoušky s nominálním průřezem (vlevo) s efektivním průměrem (vpravo)

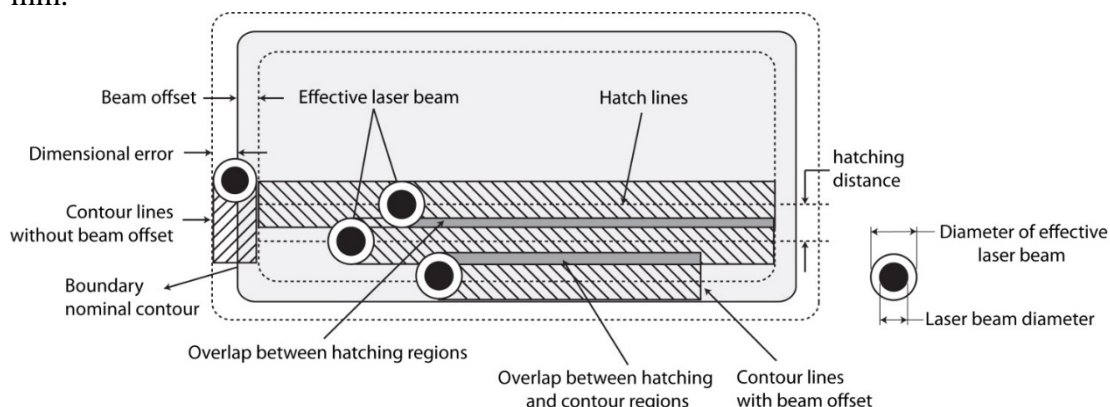
Závěr:

- Při výrobě prutů o příliš malých rozměrech můžou být významné materiálové vady v celém objemu
- Při výrobě prutů o malých rozměrech mají běžné zanedbatelné odchylky (v řádu desetin milimetru) významný vliv na očekávané mechanické vlastnosti.
- Pro správnou predikci prutových konstrukcí (lattice structures) je velmi důležité znát očekávané reálné rozměry prutů.

4.2.2 Procesní parametry a materiálové vlastnosti

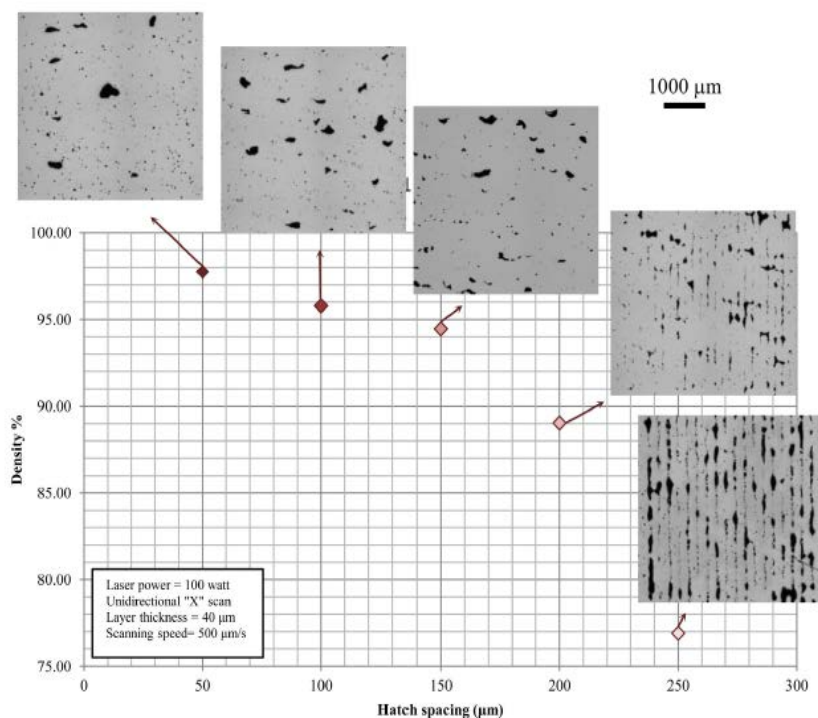
4.2.2.1 Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. Additive [17], (Aboulkhair, 2014)

Aboulkhair et al [17] ve svém článku zkoumají možnosti snížení pórovitosti při výrobě vzorků z materiálu AlSi10Mg. Autoři posuzovali nezávisle na sobě několik procesních parametrů a hledali nejlepší dosažený výsledek. Vyrobené vzorky měly rozměry 5x5x5 mm.



Obr. 4.8 Vysvětlení pojmu Hatch distance [18]

V první části zkoumali vliv šrafovacího rozestupu laseru (Hatch distance). Jedná se o parametr, který udává, jaká bude vzdálenost trajektorií laseru při tavení kovového prášku. Tento parametr musí být nastaven tak, aby se dvě sousední vrstvy dostatečně překryly a tím došlo k jejich spojení [18]. Z grafu (viz obr. 4.9) je patrné, že nejlepší výsledky hustoty materiálu (nad 95%) dosahovali hodnoty hatch distance **50 a 100 μm** .



Obr. 4.9 Hustota materiálu v závislosti na Hatch distance

Dalším pozorovaným výrobním parametrem byla rychlost skenování laseru (scanning speed). Zde autoři použili již zjištěné hodnoty hatch distance. Další hodnoty parametrů byly nastaveny následovně: výkon $P = 100\text{W}$, tloušťka vrstvy $t = 40\ \mu\text{m}$, scanning speed $SS = 250 - 1000\ \text{mm/s}$. Výsledek je vidět v tabulce 4.10. Materiál dosahoval nejvyšší hustoty pro skenovací rychlost $SS = 500\ \text{mm/s}$.

Hatch spacing (μm)	Scanning speed (mm/s)			
	250	500	750	1000
50	95.6 ± 1.8	97.7 ± 0.2	96.8 ± 1.6	96.9 ± 1.8
100	96.3 ± 0.6	95.8 ± 1.0	97.4 ± 1.4	96.3 ± 2.7

Obr. 4.10 Výsledky hustoty materiálu pro různé skenovací rychlosti

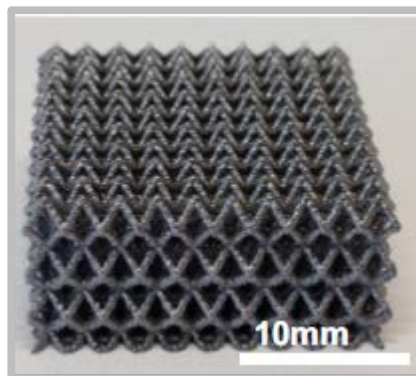
Posledním pozorovaný parametrem výroby byl vliv skenovací strategie laseru. Na základě výsledků byla jako nejlepší strategie skenování určeno Pre-sinter. Kdy jsou jednotlivé vrstvy 2x skenovány).

Závěr: Autor provedl ucelenou analýzu základních procesních parametrů pro výrobu materiálu AlSi10Mg s co nejnižší porozitou. Výsledkem zkoumání jsou konkrétní hodnoty procesních parametrů pro výrobu materiálu s pórovitostí 99,82 %. Tato analýza je důležitá především pro výrobu homogenního materiálu s očekávanými

mechanickými vlastnostmi materiálu. Postup zjištění vhodného nastavení parametrů lze použít i pro další typy kovových prášků.

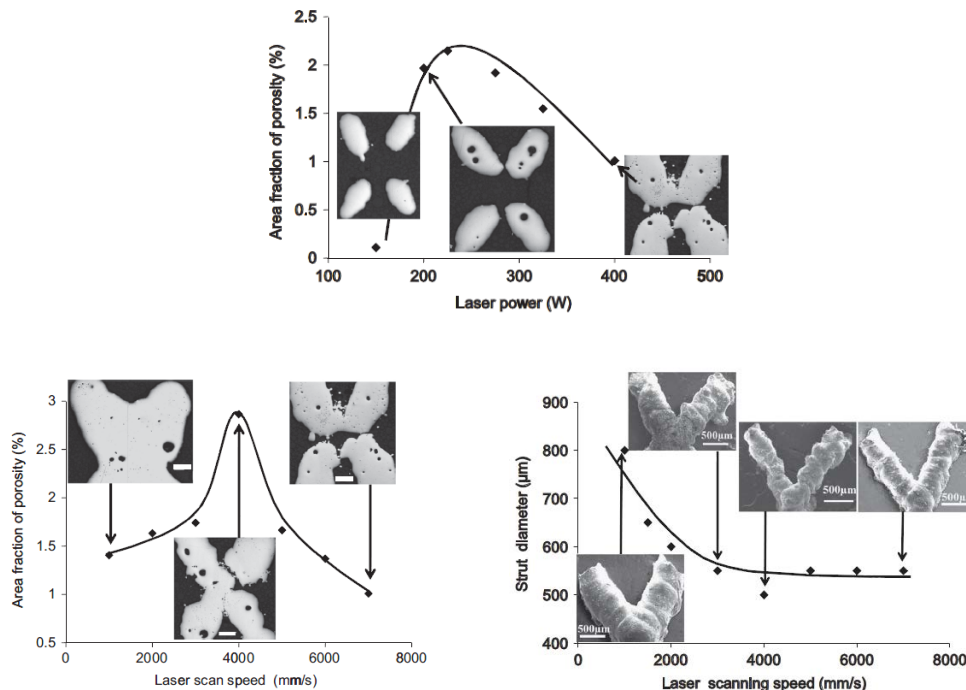
4.2.3 Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting [19], (Qiu, Ch.; 2015)

Qui et al. se zabývali rozměrovou přesností a výslednou pórovitostí vyrobené struktury v závislosti na procesních parametrech výkonu laseru a rychlosti laseru. Parametry byly testovány na vzorku struktury o rozměrech 20x20x11 mm³ (viz obr. 4.11).



Obr. 4.11 Vzorek struktury [19]

Autoři pozorovali proces tavení vysokorychlostní kamerou a zjistili, že při vysokých výkonech laseru vzniká větší šířka tavné lázně než při nízkých rychlostech. Při kombinaci vysokého výkonu a malé rychlosti skenování dochází k „bouřlivému“ chování taveniny (např. prskání, pulzování velikosti tavné lázně). Toto chování má za



Obr. 4.14.2 Výsledky výzkumu parametrů

následek výrobu prutů s větším průměrem prutu než je požadovaný, nepravidelný průřez prutu a otevřené póry na povrchu prutu. To přímo zvyšuje drsnost povrchu.

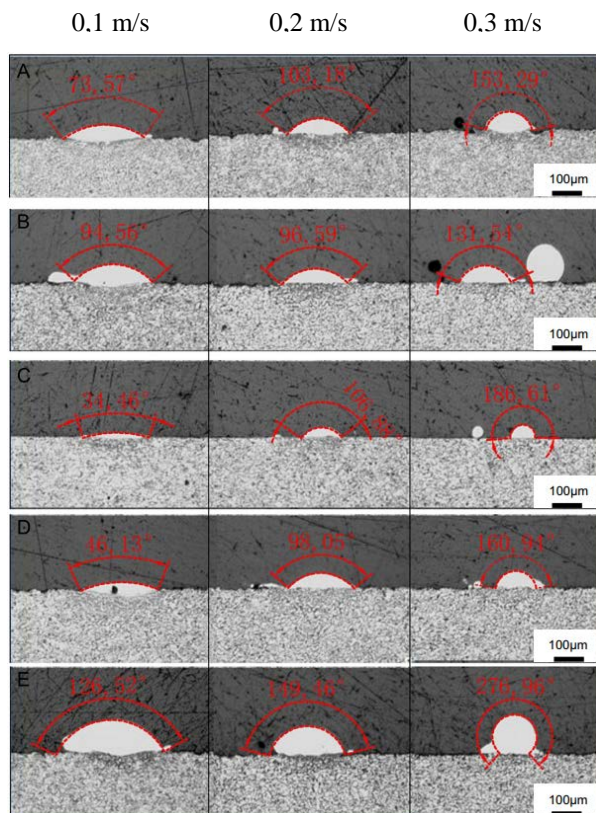
Stabilní chování taveniny pozorovali při výkonu laseru $P = 150\text{W}$ a rychlosti laseru $SS = 7000\text{ mm/s}$. Při těchto parametrech měli podpory téměř nulovou pórovitost a dobrou rozměrovou přesnost (viz obr. 4.12).

Závěr: Průměr prutu se zvětšuje od nominálních hodnot s výkonem laseru a skenovací rychlostí. Při vysokých výkonech laseru vzniká širší lázeň taveniny (meld pool) než je průměr prutu, která se nechová stabilně. Díky tomu dochází k narůstání rozměrů a prut získává nepravidelný tvar.

4.2.4 The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder [20] (Zhang, B. 2013)

Autoři v této práci zkoumají především vliv procesních parametrů (skenovací rychlost, výkon laseru, povrch a teplota základní desky, tloušťku nanášené vrstvy) na zlepšení mechanických vlastností a rozměrových odchylek dílů z materiálu SS 316L. Dále byla provedena analýza vlivu procesního plynu (Ar, N, He) a předehřevu základní desky na hustotu vyrobených vzorků a jejich rozměrovou přesnost

Autoři v první části článku testují procesní parametry metodou, kdy vyrábějí jednotlivé „návary“ (single track) s různým nastavením výkonu laseru, povrchem základní desky (otrysaný povrch, lesklý povrch), tloušťky vrstvy nanášeného prášku a rychlostí



Obr. 4.14.3 Tvar návarů s různým nastavením procesních parametrů

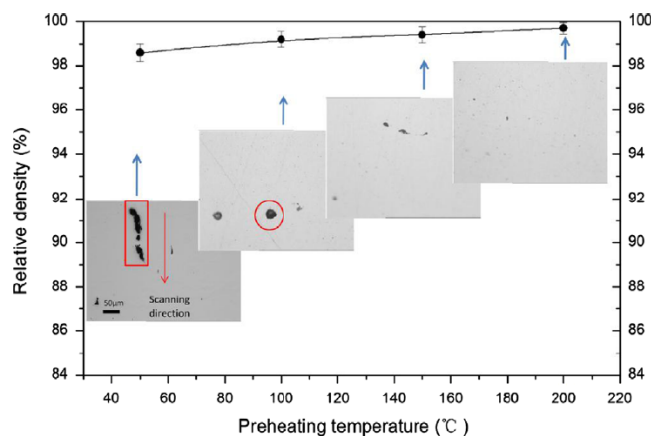
skenování laseru (viz tab. 1, obr. 4.13). Výsledky se změnou těchto čtyř parametrů a jejich dopad na tvar návarů je vidět na obrázku.

Analýza návarů ukazuje, že nízká skenovací rychlost a vysoký výkon laseru může vést na různý tvar návaru. Tvar a velikost návaru je důležitý parametr. Pokud se sousední návary nepřekrývají, vznikají materiálové vady (např. póry) a jsou degradovány mechanické vlastnosti. Optimální nastavení pro materiál SS 316L byl určen $P = 100 \text{ W}$, skenovací rychlost $v = 0,3 \text{ m/s}$ a výška nanášené vrstvy $w = 50 \text{ }\mu\text{m}$.

Tab. 1 Tabulka nastavených procesních parametrů

Series	Laser beam Power (W)	Substrate surface	Thickness of powder layer (μm)
A	100	Grit blasted	50
B	80	Grit blasted	50
C	100	Polished	50
D	100	Grit blasted	75
E	100	Grit blasted	100

Autoři v článku testovali mechanické vlastnosti zkušebních těles z materiálu SS 316L u kterých byla měněna poloha vzorku při výrobě a teplota předehřevu základní desky (viz obr. 4.15). Změna teploty předehřevu byla zavedena pro ověření, zda při nanášení vrstev ve větší vzdálenosti od základní desky, nedochází vlivem špatného prohřátí stavěného dílu (vyhřívána je základní deska) k materiálovým vadám (viz obr. 4.14). Získané mechanické vlastnosti materiálu jsou zobrazeny v tabulce 2 a jsou porovnány se standardním litým materiálem.



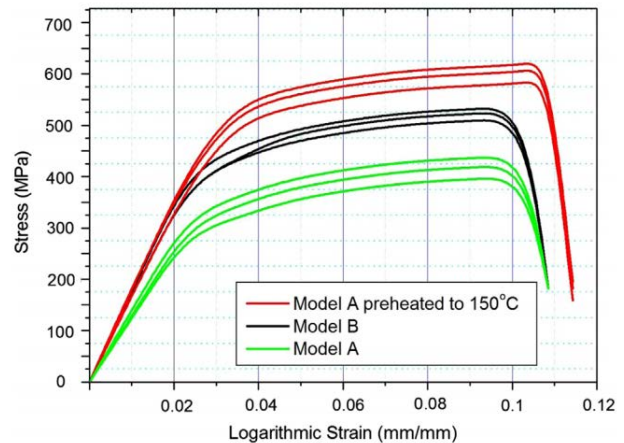
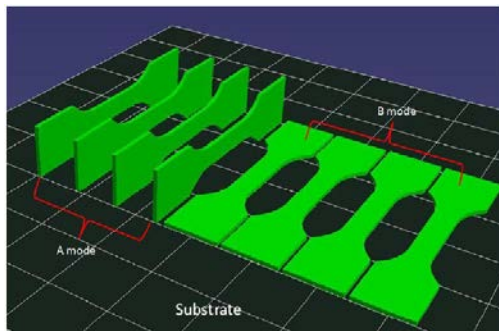
Obr. 4.14.4 Vliv předehřevu na porozitu materiálu

Tab. 2 Mechanické vlastnosti zkušebních vzorků

	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
Model A under room temperature	501.1 ± 8.3	151.5 ± 13.1
Model B under room temperature	547.6 ± 4.9	193.1 ± 4.1
Model A with 150 °C preheating	594.9 ± 35.2	194.8 ± 14.5
Casting SS 316L [24]	500–550	200

Z výsledků tlakové zkoušky je patrné, že vyhřívání základní desky má významný vliv na vznik materiálových vad a tím pádem na mechanické vlastnosti vyráběných vzorků. To autoři článku potvrzují testy hustoty vzorků při různé teplotě vyhřívání (viz obr. 4.15).

Předehřev ovlivňuje také rozměrovou přesnost vzorku. Jako vhodné nastavení předehřevu pro výrobu SS 316L uvádějí hodnotu $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 4.15 Orientace zkušebních těles při výrobě (vlevo); Výsledky tahové zkoušky (vpravo)

4.3 Predikce mechanických vlastností

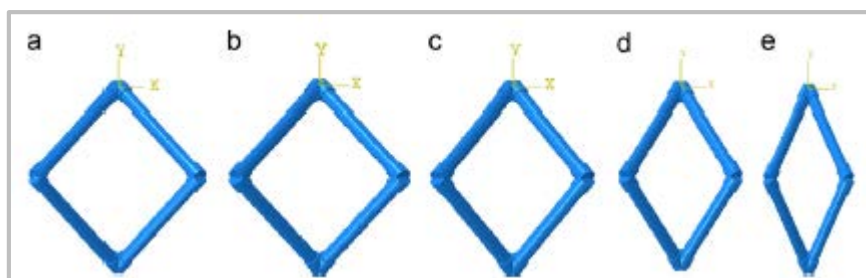
4.3.1 Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique [21], (Smith, 2013)

Autoři v článku zdůrazňují potenciál lehkých prutových konstrukcí vyrobených pomocí technologie SLM. V tomto článku autoři predikovali chování jednoduchých

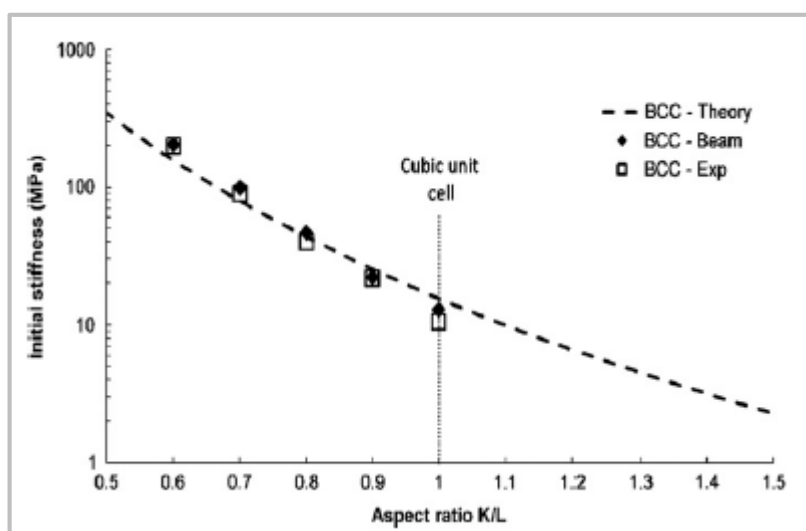
	Experiment	FE – Beam element model	FE – 3D brick element model
0% crush			
10% crush			
25% crush			
50% crush			
75% crush			

Obr. 4.15 MKP predikce chování základní buňky při zatížení

BCC a BCC-Z odlehčených struktur pomocí MKP výpočtu. Oba tyto základní typy struktur byly modelovány v MKP softwaru pomocí beam a 3D solid elementů, které byly zatíženy jednoosým tlakovým zatížením (viz obr. 4.16).



Obr. 4.17 Varianty základních BCC buněk s různým poměrem stran



Obr. 4.18 Tuhost základní BCC buňky v závislosti na poměru stran základní buňky

Závěr

Autoři článku ukázali, že reakce obou BCC a BCC-Z konstrukcí na tlakové zatížení mohou být přesně popsány pomocí MKP analýzy. Byla predikována tuhost, mez kluzu a deformace jednotlivých prutů konstrukce. Tyto hodnoty byly porovnány s experimentálně získanými výsledky. Byly popsány klíčové problémy při výpočtu prutových konstrukcí.

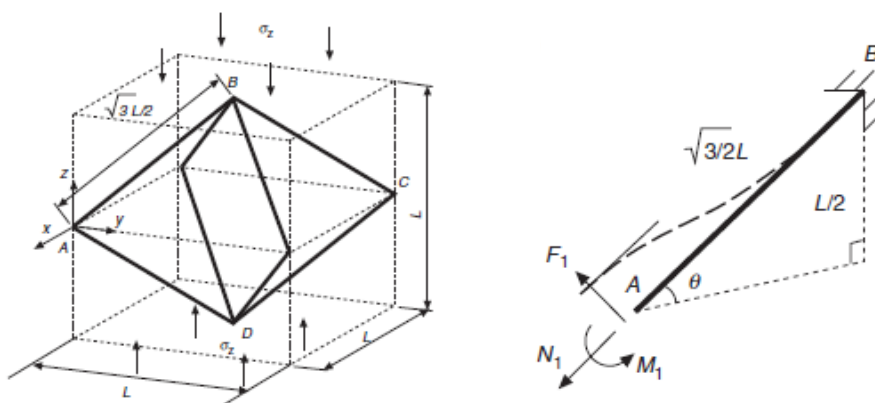
- Predikce chování velkých struktur pomocí MKP modelu není možné, protože počet elementů se stává extrémním. Bylo prokázáno, že hlavní mechanické vlastnosti je možné určit z malého počtu základních buněk.
- Vlastnosti jako efektivní hodnota průměru prutu a mechanické vlastnosti materiálu jsou jen těžko měřitelné. Možnou cestu je Reverse Engineering.

Základní buňka BCC byla v průběhu změněna na buňku BCC-Z s cílem zvýšit materiálové vlastnosti jako tuhost, mez kluzu a absorbovaná energie. Tyto vlastnosti

byly výrazně zlepšeny snížením poměru stran základní buňky – buňky vyšší a užší (viz obr. 4.17).

4.3.2 An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures [22] (Ushijima, 2011)

Ushijima et al. provádějí teoretickou analýzu mechanismu porušení prutů periodické struktury při tlakovém zatížení. Cílem je predikovat počáteční tuhost, modul pružnosti a meze pevnosti BCC prutových konstrukcí. Tato analýza je založena na deformačních mechanismech, které mohou být aplikovány i na jiné tvary základní buňky mikro – prutových konstrukcí. Analytické předpoklady jsou porovnávány s MKP výpočty pomocí 1D beam a 3D solid elementů.



Obr. 4.16 Model základní buňky (vlevo); zatížení prutu buňky (vpravo)[12]

Závěr

Ushijima et al. uvažují zatížení prutů základní BCC buňky pouze ohybem. Pruty jsou pro zjednodušení na jedné straně vetknuty (viz obr. 4.19). Na základě tohoto předpokladu jsou odvozeny rovnice mechanických vlastností. Získané vztahy jsou ověřeny pomocí MKP analýzy. Elementární poznatek je, že se zvyšujícím se poměrem d/L se zlepšuje odolnost proti mechanickému zatěžování. Tento způsob výpočtu je ovšem pro složitější aplikace struktury nepoužitelný nebo extrémně náročný.

Relativní hustota materiálu:

$$\rho^* / \rho_s = \sqrt{3}\pi \left(\frac{d}{L}\right)^2$$

,kde d je poloměr prutu a L je velikost základní buňky.

Modul pružnosti základní BCC struktury:

, kde E je modul pružnosti běžného materiálu.

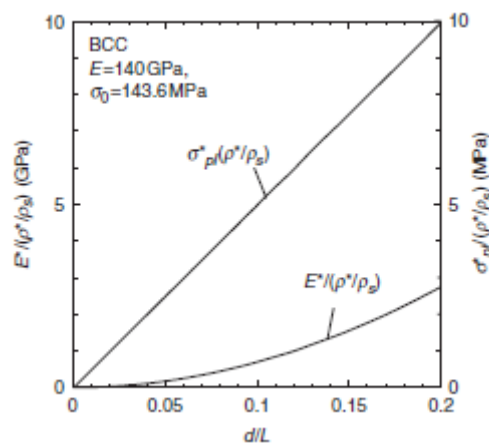
Napětí při zborcení základní struktury:

$$\sigma_{pl, BCC}^* = \sigma_z|_{|M_B|=M_p} = \frac{4\sqrt{2}\sigma_0}{3} \left(\frac{d}{L}\right)^3 = \frac{\rho^*}{\rho_s} \cdot \frac{4\sqrt{6}\sigma_0}{9} \cdot \frac{d}{L}$$

, kde σ_0 je mez kluzu materiálu.

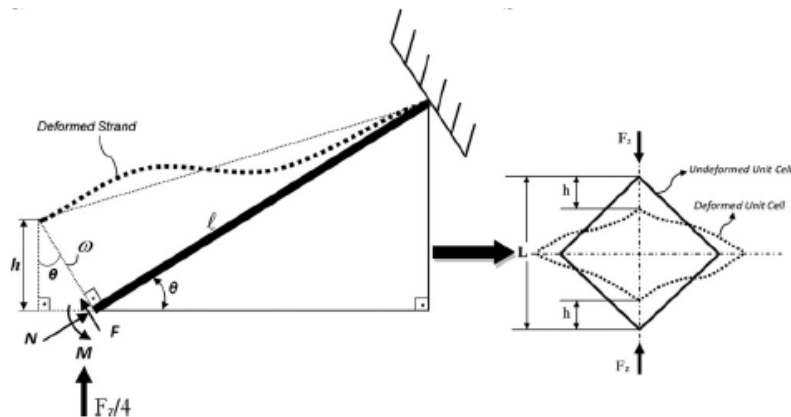
Modul pružnosti celé základní buňky:

$$E_{BCC}^* = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = \sqrt{3}\pi E \cdot \frac{(d/L)^2}{1 + 2(L/d)^2} = \frac{\rho^*}{\rho_s} \cdot \frac{E}{1 + 2(L/d)^2}$$



Obr. 4.20 Mechanické vlastnosti v závislosti na velikosti základní buňky

4.3.3 Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures [23], (Grümrück, 2013)



Obr. 4.7 Upravený předpoklad zatížení a deformace prutu

Tento článek je především zpřesnění předchozího článku [7]. Autoři zde zdokonalují původní analytický model o některé předpoklady. Současný analytický model uvažuje, že deformace a ohybový moment se vyskytují v blízkosti vazby ne přímo ve vazbě, jak bylo předpokládáno v minulém článku (viz obr. 4.21). Dále autoři

uvažují vliv smyku a přistupují k výpočtu deformace prutu metodou Timošenkova nosníku. Získané vztahy jsou porovnány s původním článkem a metodou MKP (viz obr. 4.22).

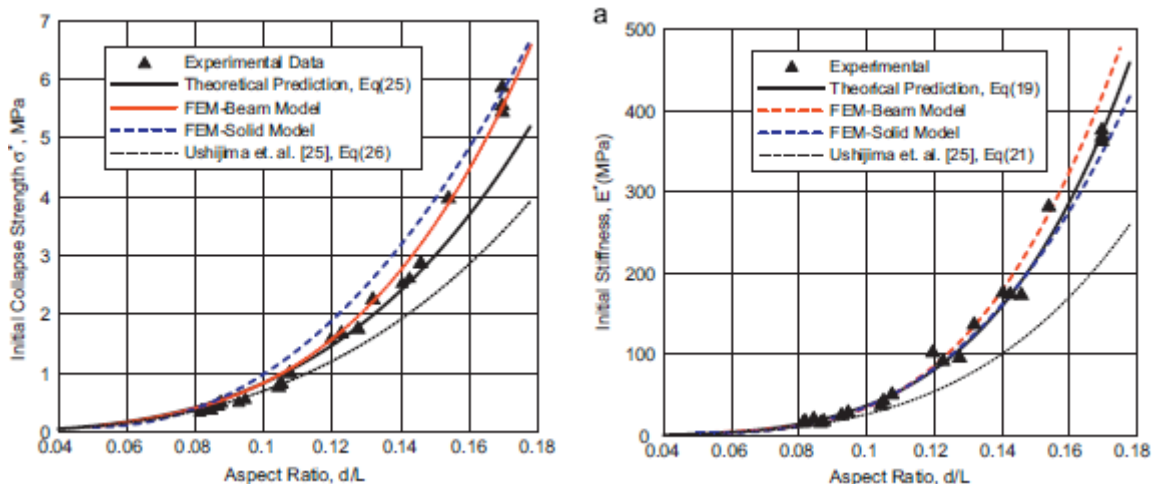
$$\rho^*/\rho_s = \sqrt{3}\pi \left(\frac{d}{L}\right)^2$$

$$\rho^*/\rho_s = \pi \left(\frac{d}{L}\right)^2 \left[\sqrt{3} - 2 \left(\frac{d}{L}\right) \tan\theta \left(1 - \frac{\tan^2\theta}{12}\right) \right]$$

Závěr

Tento článek představuje vývoj teoretické, experimentální a numerické analýzy MLS vyrobených z nerezové oceli 316L. Byla vyvinuta lepší metoda pro výpočet mikro prutů, než je uvedena v článku [6].

Byla provedena systematická tlaková zkouška sady zkušebních bloků pro velikost základních buněk 2.5, 1.6, 1.379, a 1.25. Tímto způsobem byl definován vliv velikosti základní buňky na její kolaps.



Obr. 4.8 Uvažovaný model základní buňky (vlevo); uvažované zatížení jednoho prutu základní buňky (vpravo)

5 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ NA ZÁKLADĚ KRITICKÉ REŠERŠE

Technologie Selective Laser Melting (SLM) v současné době zažívá velký vzestup. Její schopnost vyrábět velmi komplexní tvary z kovového materiálu otevírá dveře návrhu speciálních součástí pro speciální aplikace především v letectví a kosmonautice.

V těchto oblastech je ovšem kladen velký důraz na stabilitu a opakovatelnost celého procesu. Pokud mají být tyto součástky použité v těchto typech odvětví, musí být prokázáno, že lze přesně předvídat jejich mechanické vlastnosti, a že celý proces výroby dílu je stabilní, předvídatelný a s očekávaným výsledkem [13]. Proto se v posledních několika letech začíná velké množství autorů zabývat problematikou procesních parametru technologie SLM a jejich vlivu na kvalitu vyráběného materiálu a mechanické vlastnosti.

Kempen et al. [11] ve své práci zkoumá význam orientace vzorků při výrobě technologií SLM na mechanické vlastnosti vzorku. Autoři článku zjistili, že v závislosti na orientaci vznikají na povrchu vzorku póry, které degradují mechanické vlastnosti. Autoři používají tvar tahového vzorku na polymerní materiály. Brandl et al. [12] ve své práci také zkoumá význam orientace vzorku při výrobě. Na rozdíl od článku [11] autoři technologií SLM vyrábějí pouze polotovary (válečky), které jsou následně obráběny na tvar standardního tahového tělesa. Brandl et al. anizotropii u vzorků nepozorovali. To odpovídá tvrzení Kempena et. al, že mechanické vlastnosti jsou ovlivňovány povrchovou vrstvou vzorku. Tsopanos et al. [13] ve své práci zkoumá mechanickou odolnost strukturované materiálu. Pro získání reálných mechanických vlastností provádí nejprve tahovou zkoušku tenkých elementárních prutů (tenké drátky). Zjišťuje, že při takto malém objemu materiálu jsou mechanické hodnoty tenkých prutu oceli 316L na 50% tabulkových hodnot materiálu. To odpovídá opět Kempenovi a jeho tvrzení o pórovité povrchové vrstvě. Při rozměrech prutů řádově v desetínách milimetru může být prut pórovitý v celém objemu materiálu (tzn. prut je tvořen pouze povrchovou vrstvou). Je tedy patrné, že při výpočtech tenkých prutových konstrukcí nelze uvažovat mechanické vlastnosti objemných těles. Pro materiál AlSi10Mg zatím takové hodnoty neexistují.

Autoři článků [15,16] ve svých pracích upozorňují na velké nepřesnosti při výrobě tenkých prutů. Prut je standardně vyroben s velmi hrubým povrchem a jeho průřez se velmi výrazně mění (viz obr. 4.7). Aby bylo možné predikovat mechanické vlastnosti strukturovaných dílů pomocí MKP analýzy, je určen náhradní tzv. efektivní průměr prutu. Tento průměr potom vstupuje do MKP výpočtu jako průměr prutu konstrukce. Reálný průměr je často i výrazně větší. To je zapříčiněno přestupem tepla do okolního práškového materiálu a následné natavování okolních částic, které se nalepují na povrch prutu. Koutný et al [16] dále provádějí analýzu rozměrové přesnosti prutů s různou výrobní orientací prutů. Autoři ukazují, že při nízkých výrobních úhlech může být kolísání průměru prutu velmi významné a prut se již nedá považovat za válcový objekt.

Dále se autoři zabývají nastavením procesních parametrů tak, aby vyráběli rozměrově přesné díly s hustotou blížíící se 100%, které mají známé mechanické vlastnosti stejné v celém objemu materiálu. Autoři zkoumají vliv hlavních procesních parametrů, jako jsou např. výkonu laseru, scanning speed, laser focus, hatch distance, výhřevu komory. Většina autorů[17, 18, 20] zkoumá tyto vlastnosti na objemových vzorcích typu kostka. Jak je vidět z předchozích publikací, při výrobě vzorku s velmi malým objemem materiálu je situace odlišná. V tomto případě i velmi dobré nastavení procesních parametrů pro plno-objemový vzorek neumožňuje výrobu tenkých prutů bez materiálových a rozměrových poruch. To potvrzuje Qiu et al. [19], který zkoumá procesní parametry pro strukturovaný materiál. Výsledky se významně liší od předchozích autorů.

V dalších článcích se autoři zabývají predikcí mechanických vlastností pomocí MKP analýzy [21] a analytických metod [22, 23]. Analytické výpočty jsou potom porovnány s MKP výpočtem a experimentem. Autoři se omezují na výpočet pouze jedné základní buňky.

Z provedené rešerše je patrné, že při výrobě vzorku s malým objemem materiálu (typ prut) je zapotřebí jiné nastavení procesních parametrů, než je tomu při výrobě plno-objemových vzorků. Ve své disertační práci provedu výzkum procesních parametrů a jejich konkrétní vliv na materiálové a rozměrové vady malo-objemových objektů.

6 PODSTATA A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Globálním cílem disertační práce je výzkum vlivu hlavních procesních parametrů technologie SLM (zařízení SLM 280HL) na výrobu strukturovaných dílů bez materiálových a rozměrových vad. Dalším cílem práce bude využití získaných poznatků pro predikci konkrétního dílu tvořeného prutovou konstrukcí.

Dílčí úkoly nutné pro splnění globálního cíle:

- Testování procesních parametrů pro malý objem materiálu (výrobu prutů)
- Provedení rozměrové analýzy prutů z materiálu AlSi10Mg a v závislosti na orientaci (úhlu) prutů
- Objasnění obecného mechanismu nabalování prášku; MKP simulace procesu výroby prutu
- Aplikace korekčních parametrů a mechanismu tavení na strukturované vzorky; ověření mechanických vlastností
- Implementace získaných poznatků do MKP analýzy strukturovaných vzorků pro statické zatěžování
- Výběr vhodné aplikace a dílu; MKP výpočet dílu
- Mechanické testování speciálního strukturovaného dílu; porovnání s predikcí
- Sepsání disertační práce

7 VĚDECKÁ OTÁZKA A PRACOVNÍ HYPOTÉZA

7.1 Vědecká otázka

Je možné určit vliv hlavních procesních parametrů na výrobu strukturovaných dílů s téměř 100% hustotou materiálu a požadovanými rozměry?

Je možné predikovat přesné mechanické vlastnosti strukturovaných dílů, které mají požadované rozměry a materiálové vlastnosti?

7.2 Pracovní hypotéza

Předpokládá se, že hlavní vliv na nepřesné výpočty strukturovaného materiálu má špatný předpoklad vlastností materiálu (mechanické vlastnosti, tvar, objem,...). Pokud budeme vyrábět materiál s požadovanými vlastnostmi, budeme schopni přesně predikovat mechanické vlastnosti. Zjištění vlivu základních procesních parametrů technologie SLM pro slitinu AlSi10Mg je možné při vyrobení matice vzorků s různým nastavením těchto parametrů. V každé sérii bude vždy měněn pouze jeden parametr. Tím bude zjištěn jeho konkrétní vliv.

8 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY

V první fázi řešení bude provedena rešerše z oblasti nastavení procesních parametrů technologie SLM, materiálových a mechanických vlastností a způsobu mechanického testování prutových vzorků. Cílem této fáze je získání teoretického přehledu o způsobech vývoje nových procesních parametrů pro obecný materiál. Dále bude třeba hlouběji prostudovat možnosti nastavení procesních parametrů pro materiál AlSi10Mg.

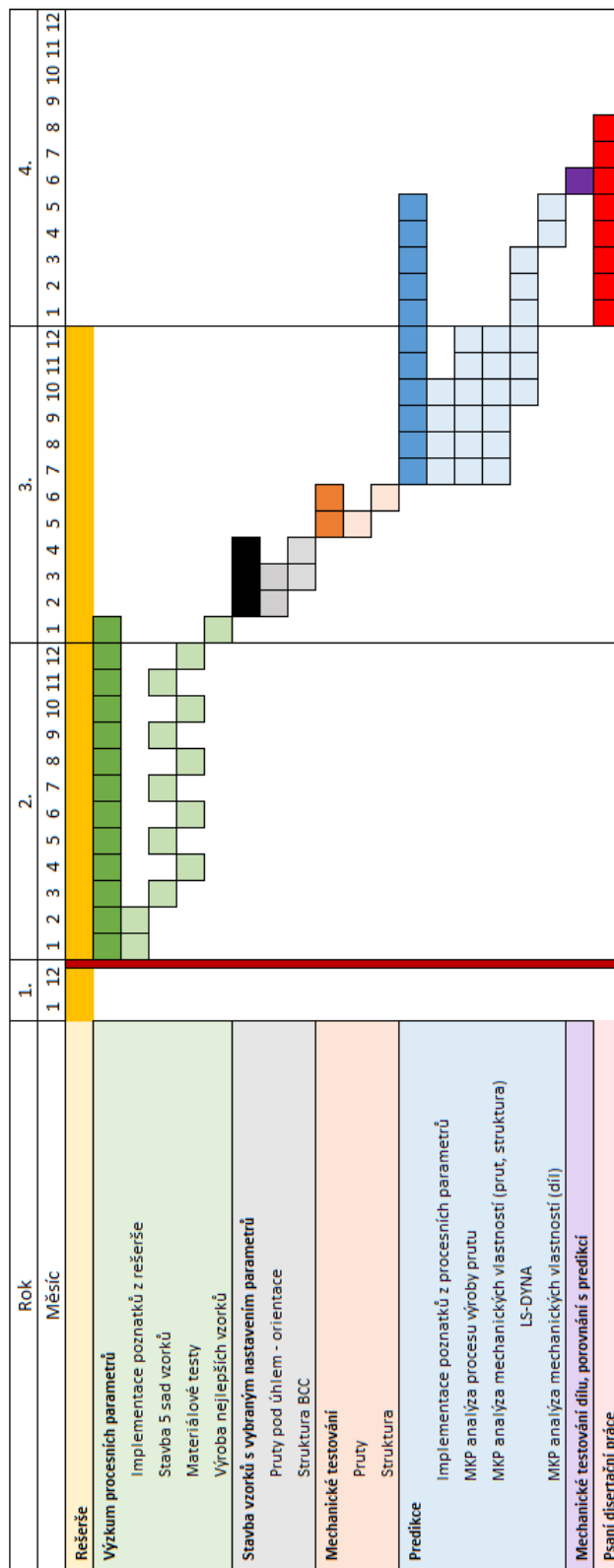
Hlavní část práce bude zaměřena na vývoj nových procesních parametrů pro materiál AlSi10Mg. Hledání těchto parametrů bude spočívat ve výrobě množství vzorků s různými základními parametry, na kterých budou prováděny materiálové analýzy a mechanické testování.

Experiment bude založen na empirických metodách zkoumání, při nichž se do probíhajících procesů cílevědomě vnáší změny, v souladu s cíli výzkumu, jeho úkoly a hypotézou. Cílem je vliv jednotlivých procesních parametrů. Obecný princip je vždy stejný: měnit jednu veličinu a pozorovat důsledky této změny na chování druhé.

Při vyvozování obecných závěrů na základě poznatků o jednotlivostech je použit proces indukce. Článkem myšlenkového řetězce je i dedukce, která umožňuje testovat hypotézy vyslovené v úvodu práce a hypotézy nově formulované na základě indukce. Tento postup odpovídá Kolbovu experimentálnímu cyklu.

9 ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ

Předpokládaná celková doba řešení disertační práce je 4 roky (září 2014 až srpen 2017) a je rozdělena do několika etap:

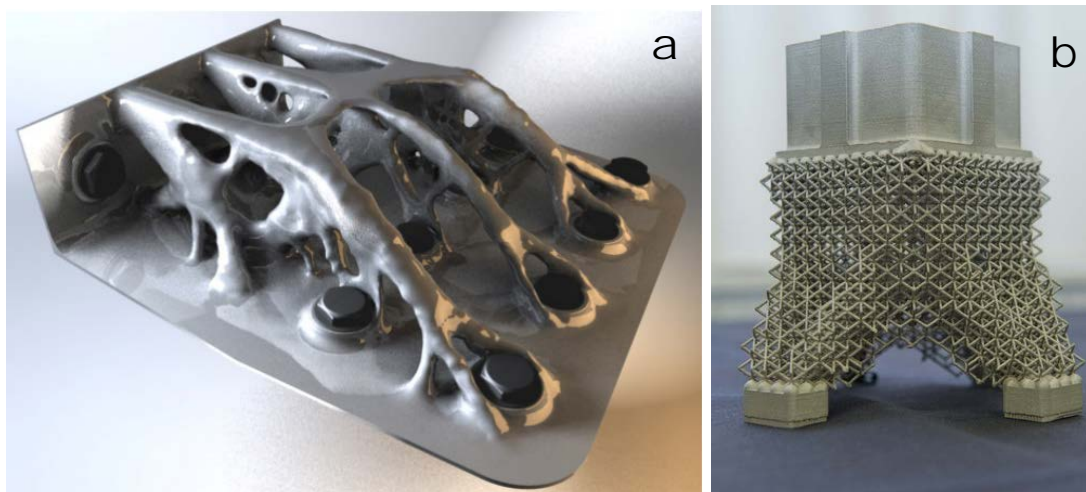


10 ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ DANÉ PROBLEMATIKY V DANÉM ČASE

Technologie Selective Laser Melting je nový typ aditivní výroby, který má v současné době obrovský potenciál ve všech aplikacích, kde je důležitým kritériem co nejnižší hmotnost při dodržení konkrétních mechanických vlastností. Takové aplikace jsou především v letectví a kosmonautika. Díky této technologii jsme schopni součást navrhovat s využitím s veškerého potenciálu materiálu pouze s minimálními technologickými omezeními. Spolu s touto technologií nacházejí uplatnění i pokročilé výpočtové systémy založené na MKP, které dokáží součást optimalizovat pro dané okrajové podmínky. Příkladem takového přístupu je topologická optimalizace, která při výpočtu odebírá elementy na kterých je malé nebo žádné napětí. Příklad takto navržené součásti je vidět na obrázku 8.1a.

Dalším možným přístupem jak navrhovat super lehké součásti je využití prutových konstrukcí, které vyplní objem materiálu speciální prutovou konstrukcí. Tím je docíleno často ještě efektivnějšího využití materiálu a tedy dalšímu snížení hmotnosti součásti. Příkladem takového dílu (viz obr. 8.1b) je držák magnetometru vyrobený na VUT v Brně pro ESA (Evropská vesmírná agentura).

Tento přístup má zatím několik úskalí. Výroba tenkých přesných prutů, ze kterých je konstrukce tvořena, je velmi komplikovaný proces, který není zatím přesně popsán. Z hlediska technologie SLM jde totiž o velmi rozdílný případ než je tomu u výroby objemného dílu. Dalším otázkou jsou přesné mechanické vlastnosti tak malých prutů, které budou mít asi vždy nějaké mechanické vady a MKP výpočet takto komplexních tvarů.



Obr. 7.1 Příklady super-lehkých dílů a) topologicky optimalizovaný díl; b) díl vyplněný strukturovaným materiálem

11 POPIS NAVRHOVANÝCH KONCEPČNÍCH A METODICKÝCH POSTUPŮ

ETAPA 1 : Rešerše

Cílem rešeršní činnosti je získání širšího pohledu v zájmové oblasti, hlubší zpracování současného stavu poznání konkrétního tématu a odhalení příležitostí pro výzkum. Nejdůležitějšími zdroji jsou odborné články, disertační práce a knihy. Širší studium je zaměřeno obecně na technologii Selective Laser Melting bez ohledu na použitý materiál. V širší rešerši jsou také vědecké články z oblastí predikce mechanických vlastností strukturovaných materiálů. Hlubší rešerše se zajímá konkrétně o zpracování materiálu AlSi10Mg, procesní parametry pro výrobu tohoto materiálu, vyhodnocení a práce s rozměrovou nepřesností. Dále je získán přehled o způsobu mechanického testování vzorků vyrobeného technologií SLM.

Součástí první etapy bude také navázání na poznatky z diplomové práce.

ETAPA 2: Výzkum procesních parametrů

Značná část práce se bude zabývat výzkumem procesních parametrů (zejména výkonu laseru, scanning speed, laser focus, hatch distance, výhřevu komory) materiálu AlSi10Mg pro výrobu strukturovaných dílů. Prvním krokem bude implementace zjištěných poznatků z rešeršní části a aplikace na zařízení SLM 280HL. Výsledky se často liší v závislosti, na jakém výrobním zařízení jsou vzorky vyráběny. Poznatky z této fáze budou publikovány ve vědeckém časopisu nebo na konferenci.

ETAPA 3: Výroba a testování vzorků, výzkum korekčních parametrů, MKP simulace přestupu tepla

Na základě rešerše bude navržena metodika testování strukturovaného materiálu. V úvodní části této fáze půjde o výrobu prutů s různou orientací a zjištění jejich „efektivního průměru“ a korekčního parametru pro přesnou výrobu. Bude zde také zařazena MKP simulace odvodu tepla z oblasti tavení materiálu při výrobě. Další fází bude mechanické testování jednotlivých prutů a statistické vyhodnocení mechanických vlastností prutů. Dále bude následovat výroba a mechanické testování přesného strukturovaného materiálu s již zjištěnými poznatky. Poznatky z této fáze budou publikovány ve vědeckém časopisu nebo na konferenci.

ETAPA 4: MKP analýza

První část této etapy bude zahrnovat tvorbu skriptu do výpočetního softwaru Ansys, který bude obsahovat získané informace z předchozích etap. Cílem bude přesný výpočet mechanického namáhání (jednotlivého prutu, struktury a vybraného dílu) pro statické zatěžování. V druhé části etapy budou predikovány impaktové vlastnosti strukturovaného materiálu při rychlých dějích. K tomu bude využit modul LS-DYNA. Poznatky z této fáze budou publikovány ve vědeckém časopisu nebo na konferenci.

ETAPA 5: **Mechanické testování**

Závěrečná etapa bude obsahovat ověření predikovaných vlastností především vybraného speciálního dílu, který bude tvořen strukturovaným materiálem. Predikované a reálně naměřené vlastnosti budou vzájemně porovnány. Poznatky budou sepsány ve formě disertační práce přílohového typu.

12 SPOLUPRÁCE S JINÝMI INSTITUCEMI

V průběhu řešení se předpokládá spolupráce s dalšími institucemi.

Protože téma disertační práce je z části složitý výpočtový problém, autor by chtěl využít možnosti konzultací s ústavem mechaniky těles naší fakulty a firmou LKE Engineering, s.r.o., konkrétně s Ing. Martinem Komárkem, Ph.D.

Kromě tuzemské spolupráce se předpokládá spolupráce s některou ze zahraničních univerzit, která se danou problematikou zabývá. Konkrétní univerzita zatím nebyla vybrána. Na této univerzitě se předpokládá i zahraniční stáž.

13 PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY SPOJENÉ S ŘEŠENÍM

13.1 Předpokládané náklady na řešení práce

• Výroba na zřízení SLM 280HL (materiálové náklady)	50 000 Kč
• Mechanické testování	20 000 Kč
• Konferenční poplatky a cestovné	90 000 Kč
• Stáž na zahraniční univerzitě	150 000 Kč
• Osobní náklady	350 000 Kč
<hr/>	
• Celkem	660 000 Kč

14 CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Při řešení diplomové práce se očekává průběžné publikování dosažených výsledků v některých z impaktovaných časopisů, recenzovaných časopisů nebo konferencích uvedených v databázi Scopus nebo WoS.

Možné impaktované časopisy pro publikování výsledků:

- Rapid Prototyping Journal Impact factor – **IF = 2,031**
- Journal of Laser Applications Impact factor – **IF = 1,798**
- Journal Of Sandwich Structures & Materials – **IF = 0,836**
- Modelling And Simulation In Materials Science And Engineering – **IF = 1,492**
- Journal Of Materials Processing Technology – **IF = 2,041**
- Materials & Design – **IF = 3,171**
- Journal Of Composite Materials – **IF = 1,257**

Dosud prezentované výsledky:

KOUTNÝ, D.; VRÁNA, R.; PALOUŠEK, D. **Dimensional accuracy of single beams of AlSi10Mg alloy and 316L stainless steel manufactured by SLM.** In *5th International Conference on Additive Technologies iCAT2014*. Ljubljana: Interesansa, 2014. s. 142-147. ISBN: 978-961-281-579- 0.

ICMD 2015

Vrána, R.; Koukal, O.; Koutný, D.; Krejčí, P.; Paloušek, D. **Device for Testing Impact Resistance of Lattice Structures Panels Produced by the Selective Laser Melting.** In *56th International Conference of Machine Design Departments ICMD 2015*

PŘIJATO

Euro PM2015 Congress & Exhibition (článek v databázi Scopus; recenzovaný článek)

Vrána, R.; Paloušek, D.; Koutný, D.; Koukal, O.; Zikmund, T.; Krejčí, P. **Impact resistance of lattice structure made by Selective Laser Melting technology**

PŘIJATO

15 BIBLIOGRAFIE

ÚVOD

- [1] ŠMARDA, Jan. *Biologie pro psychology a pedagogy*. Vyd. 2. Praha: Portál, 2007, 420 s. ISBN 978-80-7367-343-7.
- [2] Apologetics Press. [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.apologeticspress.org/APubPage.aspx?pub=1&issue=581&article=625>
- [3] ONE COMPONENT – ONE MODULE – ONE BODY – ONE VISION. EDAG [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.edag.de/en/pr/press/news-item/article/41/one-component-one-module-one-body-one-vision-1.html>
- [4] SANTOS, Edson Costa, Masanari SHIOMI, Kozo OSAKADA a Tahar LAOUI. Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006, vol. 46, 12-13, s. 1459-1468.
- [5] ADER, C., M. BROSEMER, C. FREYER, H. FRICKE a D. HENNIGS. RESEARCH ON LAYER MANUFACTURING TECHNIQUES AT FRAUNHOFER. Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT, Aachen, Germany. 2004. Dostupné z: <http://edge.rit.edu/content/P10551/public/SFF/SFF%202004%20Proceedings/SFF%20Papers%202004/04-Ader.pdf>
- [6] WEHMÖLLER, M., P. H. WARNKE, C. ZILIAN, H. EUFINGER, K. HOLLERBACH, S. PERFECT, H. MARTZ a E. ASHBY. Implant design and production — a new approach by selective laser melting. *International Congress Series*. 2005, vol. 1281, s. 690-695.
- [7] BAEL, S. Van, Y.C. CHAI, S. TRUSCELLO, M. MOESEN, G. KERCKHOFS, H. Van OOSTERWYCK, J.-P. KRUTH a J. SCHROOTEN. The effect of pore geometry on the in vitro biological behavior of human periosteum-derived cells seeded on selective laser-melted Ti6Al4V bone scaffolds. *Acta Biomaterialia*. 2012, vol. 8, issue 7, s. 2824-2834
- [8] WALLACH, J.C. a L.J. GIBSON. Mechanical behavior of a three-dimensional truss material. *International Journal of Solids and Structures*. 2001, vol. 38, 40-41, s. 7181-7196.
- [9] ZHOU, J, P. SHROTRIYA a W.O. SOBOYEJO. On the deformation of aluminum lattice block structures: from struts to structures. *Mechanics of Materials*. 2004, vol. 36, issue 8, s. 723-737.

-
- [10] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN a David RAYMONT. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012, roč. 62, s. 32-38. ISSN 08906955.

MECHANICKÉ VLASTNOSTI SLM VZORKŮ

- [11] KEMPEN, K., L. THIJS, J. VAN HUMBEECK a J.-P. KRUTH. Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. *Physics Procedia*. 2012, vol. 39, s. 439-446.
- [12] BRANDL, Erhard, Ulrike HECKENBERGER, Vitus HOLZINGER a Damien BUCHBINDER. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials*. 2012, vol. 34, s. 159-169.
- [13] TSOPANOS, S., R. A. W. MINES, S. MCKOWN, Y. SHEN, W. J. CANTWELL, W. BROOKS a C. J. SUTCLIFFE. The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Selectively Laser Melted Stainless Steel Microlattice Structures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2010, vol. 132, issue 4, s. 041011-.

- [14] IMPAKTOVÉ TESTY

MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI SLM VZORKŮ, PROCESNÍ PARAMETRY

- [15] SUARD, Mathieu, Pierre LHUISSIER, Rémy DENDIEVEL a Frédéric VIGNAT. Impact of EBM Fabrication Strategies on Geometry and Mechanical Properties of Titanium Cellular Structures. *Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference*. 2014.
- [16] KOUTNÝ, D.; VRÁNA, R.; PALOUŠEK, D. Dimensional accuracy of single beams of AlSi10Mg alloy and 316L stainless steel manufactured by SLM. In 5th International Conference on Additive Technologies iCAT2014. Ljubljana: Interesansa, 2014. s. 142-147. ISBN: 978-961-281-579- 0.
- [17] ABOULKHAIR, Nesma T., Nicola M. EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2014, 1-4, s. 77-86 [cit. 2015-03-09].
- [18] MANFREDI, Diego, Flaviana CALIGNANO, Manickavasagam KRISHNAN, Riccardo CANALI, Elisa PAOLA, Sara BIAMINO, Daniele UGUES, Matteo PAVESE a Paolo FINO. Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs). *Light Metal Alloys Applications*. InTech, 2014.

-
- [19] QIU, Chunlei, Sheng YUE, Nicholas J.E. ADKINS, Mark WARD, Hany HASSANIN, Peter D. LEE, Philip J. WITHERS a Moataz M. ATTALLAH. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2015, vol. 628, s. 188-197 [cit. 2015-03-24].
- [20] ZHANG, Baicheng, Lucas DEMBINSKI a Christian CODDET. The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder. *Materials Science and Engineering: A*. 2013, vol. 584, s. 21-31.

PREDIKCE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

- [21] SMITH, M., Z. GUAN a W.J. CANTWELL. Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013, vol. 67, č. 3, s. 28-41.
- [22] USHIJIMA, K., W. CANTWELL, R. MINES, S. TSOPANOS a M. SMITH. An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2011, vol. 13, issue 3, s. 303-329.
- [23] GÜMRÜK, R. a R.A.W. MINES. Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013, vol. 68, s. 125-139.

ODŮVODNĚNÍ POTŘEBY DISERTAČNÍ PRÁCE

- [24] D. Brackett, I. Ashcroft, R. Hague. **TOPOLOGY OPTIMIZATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING**. Loughborough University. 2011. Dostupné z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2011/2011-27-Brackett.pdf>
- [25] **ONE-PIECE 3D-PRINTED SATELLITE BRACKET**. Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/11/One-piece_3D-printed_satellite_bracket