

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**Fogl  
Bedřich**

**2020**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Fogl** Jméno: **Bedřich** Osobní číslo: **466553**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Analýza mechanických vlastností odlehčených 3D tisknutých dílů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Analysis of mechanical properties of lattice structure 3D printed parts**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je navrhnout tvar a metody zkoušení mechanických vlastností odlehčených 3D tisknutých struktur.

Jednotlivé body:

- 1) Úvod a seznámení s problematikou kovového 3D tisku
- 2) Návrh metod zkoušení mechanických vlastností 3D tisknutých struktur
- 3) Návrh tvaru odlehčených 3D tisknutých vzorků pro zkoušení mechanických vlastností
- 4) Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Seznam použité literatury:

ČSN EN ISO 6892-1

ČSN EN ISO 148-1

ASM Handbook 14B

Základy 3D tisku- <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>

Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Vít Novák, ústav strojírenské technologie FS**

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

**Ing. František Tatiček, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**



Ing. Vít Novák  
podpis vedoucí(ho) práce



doc. Ing. Ladislav Kolařík, 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.

23.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## Anotace

Vysoká škola:	ČVUT v Praze Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Téma diplomové práce:	<b>Analýza mechanických vlastností odlehčených 3D tisknutých dílů</b>
Akademický rok:	2019/ 2020
Autor:	Bedřich Fogl
Vedoucí práce	Ing. Vít Novák
Konzultant	Ing. František Tatíček, Ph.D.
Klíčová slova:	Aditivní výroba, kovový 3D tisk, Odlehčené struktury, Powder Bed Fusion, DMLS, mechanické zkoušky
Abstrakt:	<p>Bakalářská práce se zabývá využitím mřížkových struktur v aditivní výrobě za účelem odlehčení vyráběných dílů s minimálním poklesem pevnostních vlastností.</p> <p>V úvodní teoretické části jsou uvedeny jednotlivé technologie aditivní výroby, zejména pak technologie Powder Bed Fusion. Materiály, které tato metoda využívá a způsoby jejich výroby. Dále jsou v teoretické části rozebrány výše zmíněné mřížkové struktury a jejich rozdělení z hlediska geometrie.</p> <p>V experimentální části jsou zkoušeny mechanické vlastnosti (tah, tlak, ohyb) navrhnutých a vyrobených zkušebních vzorků mřížkových struktur z korozivzdorné oceli AISI 316L.</p> <p>Cílem práce je porovnat mechanické vlastnosti těchto mřížkových struktur s různými parametry základních buněk.</p>

## Annotation

University:	Czech Technical University in Prague Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Manufacturing Technology
Head of the department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Theme of work:	<b>Analysis of mechanical properties of lattice structure 3D printed parts</b>
Academic year	2019/ 2020
Autor:	Bedřich Fogl
Supervisor:	Ing. Vít Novák
Consultant:	Ing. František Tatíček, Ph.D.
Keywords:	Additive manufacturing, metal 3d printing, Lattice structure, Powder Bed Fusion, DMLS, Mechanical testing
Abstract:	<p>The bachelor's thesis deals with the use of lattice structures in additive manufacturing in order to lighten the manufactured parts with a minimal decrease in strength properties. The introductory theoretical part presents individual technologies of additive manufacturing, especially Powder Bed Fusion technology. Materials used by this method and methods of production. Furthermore, the theoretical part discusses about lattice structures and their distribution in terms of geometry.</p> <p>In the experimental part, the mechanical properties (tension, pressure, bending) of designed and manufactured test specimens of lattice structures made of stainless steel AISI 316L are tested.</p> <p>The aim of this work is to compare the mechanical properties of these lattice structures with different parameters of basic cells.</p>

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

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

V Praze dne 30. 7. 2020

.....

Bedřich Fogl

## **Poděkování**

Úvodem bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Vítu Novákovi za vedení mé bakalářské práce a za jeho podnětné rady a připomínky, které mi po celou dobu práce sděloval.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Františkovi Tatíčkoví, Ph.D. za věcné rady a za pomoc při realizaci experimentu a panu Ing. Petru Zikmundovi Ph.D. z firmy Metal 3D s.r.o. za vytisknutí a přípravu vzorků a konzultaci při jejich výrobě.

# Obsah

1	Úvod .....	- 12 -
2	Kovový 3D tisk.....	- 13 -
2.1	Postup vzniku výrobku na 3D tiskárně .....	- 13 -
3	Metody aditivní výroby .....	- 14 -
3.1	Powder Based Fusion (PBF) .....	- 15 -
3.1.1	Popis částí tiskárny využívající metodu Powder Bed Fusion .....	- 15 -
3.1.2	Popis procesu tiskárny využívající metodu Powder Bed Fusion .....	- 16 -
3.1.3	Laser Beam Melting (LBM) .....	- 17 -
3.1.4	Electron Beam Melting (EBM).....	- 18 -
3.2	Directed Energy Deposition .....	- 19 -
3.2.1	Laser Metal Deposition (LMD) .....	- 19 -
4	Materiály.....	- 20 -
4.1	Kovové materiály .....	- 20 -
4.2	Výroba kovových prášků .....	- 21 -
5	Strategie a parametry tisku .....	- 22 -
5.1	Hlavní parametry a strategie tisku.....	- 22 -
5.1.1	Strategie skenování .....	- 22 -
5.1.2	Výška vrstvy a velikost zrn.....	- 23 -
5.1.3	Výkon laseru .....	- 23 -
5.1.4	Vzdálenost bodů .....	- 24 -
6	Technologičnost konstrukce .....	- 25 -
6.1	Samonosné úhly .....	- 25 -
6.2	Díry .....	- 25 -
6.3	Orientace dílu .....	- 26 -
6.4	Výška dílu .....	- 26 -
7	Lattice structure (Odlehčené struktury).....	- 27 -

7.1	Tvary odlehčených struktur.....	- 28 -
7.2	Rozdělení odlehčených struktur.....	- 28 -
7.2.1	2,5D struktury.....	- 28 -
7.2.2	3D struktury.....	- 29 -
8	Zkoušky mechanických vlastností kovů.....	- 31 -
8.1	Zkouška tahem.....	- 31 -
8.2	Zkouška tlakem.....	- 31 -
8.3	Zkouška ohybem.....	- 32 -
9	Experimentální část.....	- 33 -
9.1	Kovový prášek z korozivzdorné oceli AISI 316L.....	- 33 -
9.2	Zkušební vzorky.....	- 34 -
9.2.1	Příprava zkušebních vzorků.....	- 34 -
9.2.2	Velikost zkušebních vzorků.....	- 34 -
1)	Vzorky pro zkoušku tlakem.....	- 34 -
2)	Vzorky pro zkoušku tahem.....	- 35 -
3)	Vzorky pro zkoušku tříbodovým ohybem.....	- 35 -
9.3	Renishaw AM250.....	- 36 -
9.4	nTop.....	- 37 -
10	Zkoušky mechanických vlastností.....	- 38 -
10.1	LabTest Model 5.100SP1.....	- 38 -
10.2	Zkouška tlakem.....	- 39 -
10.2.1	Příprava zkoušky.....	- 39 -
10.2.2	Vyhodnocení zkoušky.....	- 39 -
10.3	Zkouška tahem.....	- 42 -
10.3.1	Příprava zkoušky.....	- 42 -
10.3.2	Vyhodnocení zkoušky.....	- 42 -
10.4	Zkouška tříbodovým ohybem.....	- 45 -



---

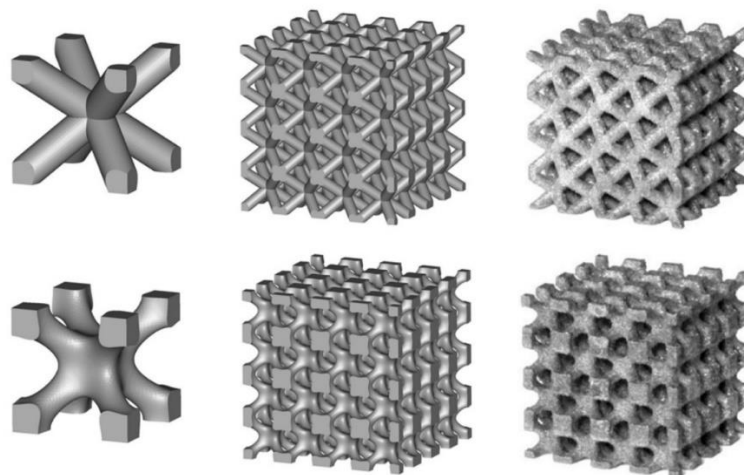
10.4.1	Příprava zkoušky.....	- 45 -
10.4.2	Vyhodnocení zkoušky.....	- 45 -
10.5	Srovnání naměřených výsledků .....	- 48 -
11	Závěr .....	- 49 -
	Seznam použité literatury .....	- 50 -
	Seznam obrázků.....	- 55 -
	Seznam tabulek .....	- 57 -
	Seznam příloh .....	- 58 -

# 1 Úvod

V řádu posledních desítek let dochází k zájmu a rozvoji výroby pomocí aditivních technologií. Hlavní výhodou těchto technologií je úspora materiálu a možnost vytvoření složitých geometrií, které by konvenčními metodami jako je například obrábění bylo složité až nemožné. Přesným příkladem složitých geometrií jsou právě mřížkové struktury. Tyto struktury tvoří opakující se základní buňky (Obr.1.).

Jedním z hlavních využití mřížkových struktur je odlehčení jader dílů. Se správně zvolenými parametry struktury lze dosáhnout minimálního poklesu potřebných mechanických vlastností pro danou aplikaci. Díky tomu jsme schopni spotřebovat menší množství materiálu, snížit dobu tisku a tím samozřejmě snížit náklady na výrobu. Mřížkové struktury ale mohou být použity i pro zlepšení tepelných vlastností. Díky těmto vlastnostem nachází mřížkové struktury uplatnění v leteckém průmyslu, kosmonautice a medicíně.

Práce se zaměřuje na porovnání mechanických vlastností navrhnutých 3D tisknutých struktur. Zatím neexistují žádné normy, které by určovaly podmínky mechanických zkoušek mřížkových struktur. Z tohoto důvodu byli mechanické vlastnosti zkoumány zkouškou tlakem, tahem a ohybem. Cílem práce je porovnat mechanické vlastnosti různých mřížkových struktur s ohledem na jejich geometrii a množství spotřebovaného materiálu.



Obr. 1. Periodicky se opakující základní buňky [33]

## 2 Kovový 3D tisk

Kovový 3D tisk, je aditivní technologie založená na spékání kovových materiálů v podobě prášku nebo drátu z dat 3D modelu pomocí laserového nebo elektronového paprsku. Proces aditivní technologie spočívá v přidávání materiálu vrstvy po vrstvě na rozdíl od klasických metod obrábění, kde ke vzniku chtěné geometrie dochází úběrem materiálu. Výhodou 3D tisku je menší spotřeba materiálu způsobená přesným vrstvením tvaru z CAD dat a možností znovu využít nezpracovaný materiál.

Díky působení zdroje energie dokážeme vytvořit velmi složité profily, které nedokážeme vytvořit použitím tradičních technologií. Nevýhodou je naopak limitovaná velikost tištěných dílů způsobená omezeným pracovním prostředím, ve kterém probíhá proces tisku a přesnost, které jde dosáhnout technologií tisku. Povrch tisknutých dílů dosahuje vyšší drsnosti než povrchy dílů vyrobených jinými metodami. Přesnost tištěných dílů se řádově pohybuje v jednotkách milimetrů. Vyšší přesnosti dosáhneme následným zpracováním dílu (postprocessingem). Kvalita součástí vyrobených touto aditivní technologií závisí na kalibraci použitého stroje a nastavených parametrech procesu. Ideální konfigurace dosáhneme správným nastavením tisku, volbou ochranné atmosféry, volbou materiálu a následným postprocessingem. Optimální konfigurací dokážeme ovlivnit přesnost součásti, strukturu povrchu, soudržnost vrstev, mechanické vlastnosti a množství použitého materiálu. [1]; [2]

### 2.1 Postup vzniku výrobku na 3D tiskárně

Pro všechny metody je nezbytné vymodelování 3D modelu ještě před tiskem. Nejjednodušší je vytvoření modelu v CAD softwaru, další variantou je například použití 3D skeneru. Po vytvoření se musí provést převod dat modelu do formátu .OBJ nebo .STL díky čemuž ho software pro ovládání tiskárny přečte. Dalším krokem je vytvoření samotných instrukcí pro tiskárnu z formátu .STL tzv. G-Code (vnitřní struktura součásti, rychlost tisku, podpory,...). Tiskárna následně po přečtení těchto informací vytiskne daný objekt. Po vytisknutí objektu může následovat ještě postprocessing (odlomení podpurných konstrukcí, obrábění,..) [3]



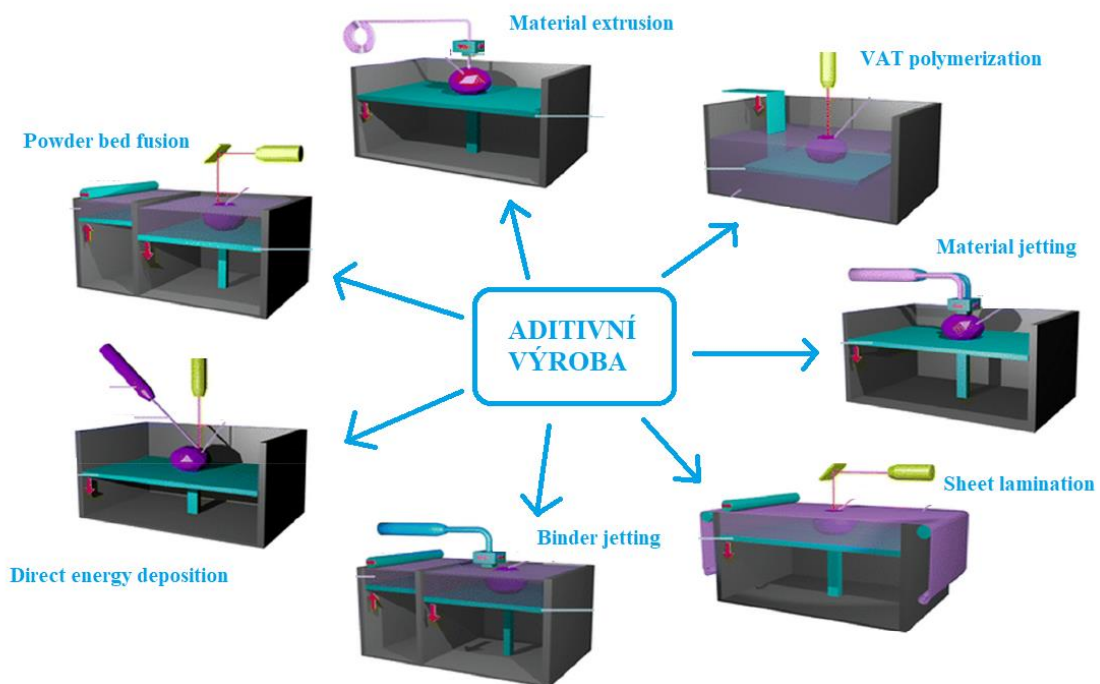
Obr. 2. postup vzniku výrobku na 3D tiskárně

### 3 Metody aditivní výroby

Aditivní technologie můžeme rozdělit do 7 skupin podle způsobu výroby jednotlivých vrstev v závislosti na použitém materiálu a technologii stroje.

Aditivní technologie:

- Powder bed fusion
- Direct energy deposition
- Binder jetting
- Material jetting
- Material Extrusion
- Sheet Lamination
- VAT photo polymerization



Obr. 3. metody aditivní výroby [4]

Nejpoužívanější metody aditivních technologií kovu jsou Powder Bed Fusion (PBF) a Directed Energy Deposition (DED). Obě tyto technologie lze dále klasifikovat podle typu použitého zdroje energie (ve formě laserového či elektronového paprsku) a vstupního materiálu. [4]

Technologie kovového tisku se rozděluje do několika kategorií. Konfigurace systému se liší zdrojem tepla, které může být realizováno laserem, hořákem nebo elektronovým svazkem. Dále se rozlišuje, zda je materiál podáván v podobě prášku, nebo drátu.

### 3.1 Powder Based Fusion (PBF)

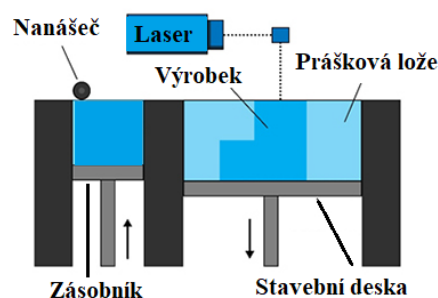
Výroba aditiv má sedm různých technologií založených na aplikaci a použitém materiálu. Mezi všemi různými technologiemi je fúze s práškovým ložem (PBF) jednou z nejpoužívanějších technologií v aditivní výrobě.

Technologie fúze s práškovým ložem využívá jako zdroj tepla vysoce výkonný laser nebo elektronový svazek. Tyto zdroje tepla nataví a spojí materiál. Tento spojený materiál vytvoří konturu v dané hladině. Po spečení dané vrstvy se odstraní přebytečný materiál, pracovní deska klesne v ose z o výšku jedné vrstvy a dojde k nahrnutí nové vrstvy materiálu. Celý proces se takto opakuje, až do té doby, dokud není výrobek zcela hotový. Technologie využívající PBF jsou například Direct metal laser sintering (DMLS), selective laser melting (SLM) a electron beam melting (EBM). Tyto technologie se od sebe v určitých parametrech liší, ale v základu jsou všechny stejné.

Výhodami technologií PBF jsou široká škála materiálů, úspora materiálu ve formě nevyužitého prášku, který se po přesetí může použít znovu, možnost vyrábět více různých součástí najednou. Na druhou stranu nevýhodami je nemožnost vyrábět skryté dutiny a nutnost použití podpůrné konstrukce. [4]; [5]; [6]

#### 3.1.1 Popis částí tiskárny využívající metodu Powder Bed Fusion

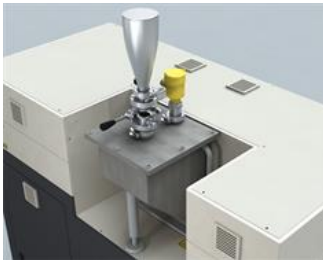
Na obrázku (obr. 3.) jsou ukázány jednotlivé části tiskárny využívající technologii Powder Bed Fusion. Patří sem laser, jehož paprsek je orientován pomocí skenovací hlavy na určená místa. Nanášec, který rovnoměrně rozvinuje kovový prášek po stavební desce. Písty stavební a zásobovací komory, které se v závislosti na tom, v jaké fázi se proces nachází, pohybují nahoru nebo dolů a zařízení pro řízenou cirkulaci ochranné atmosféry ve stavební komoře. [5]



Obr. 4. Popis tiskárny PBF [34]

### 3.1.2 Popis procesu tiskárny využívající metodu Powder Bed Fusion

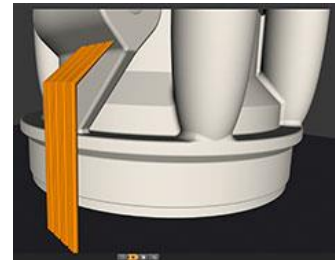
Jako první se musí zásobník tiskárny naplnit kovovým práškem, který je podle potřeby doplňován i v průběhu procesu. Po naplnění zásobníku se do pracovní komory vloží a zajistí tisková platforma na které se budou dané výrobky stavět. Po těchto přípravách se z externího počítače nahraje soubor s připravenými daty do řídicího systému tiskárny. Když je daný soubor nahrán dochází k odčerpání vzduchu z pracovní komory a současně naplnění komory inertním plynem. Následně se na tiskovou platformu nanese první vrstva kovového prášku a dojde k laserovému spékání. Když je daná vrstva dokončena tisková platforma se posune níže a nanese se další vrstva. Takto se celý proces neustále opakuje až do té doby, než je vytisknutá celá součást. [7]



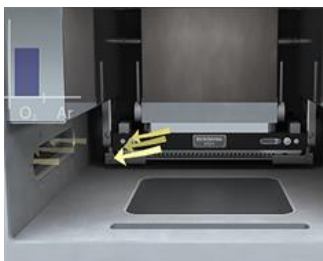
Obr. 5. Naplnění práškem [7]



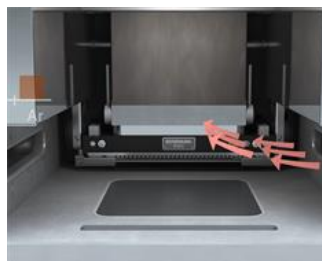
Obr. 6. Vložení tiskové platformy [7]



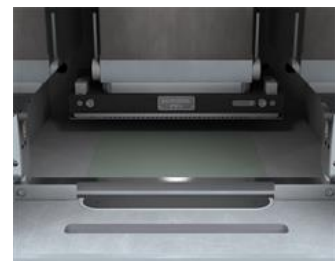
Obr. 7. Příprava stavby dílu [7]



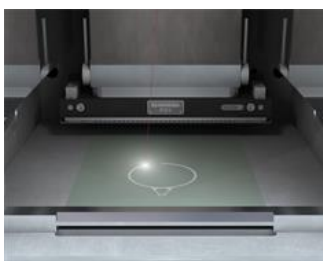
Obr. 8. Odčerpání vzduchu [7]



Obr. 9. Inertní plyn [7]



Obr. 10. Nanesení vrstvy prášku [7]



Obr. 11. Laserové spékání [7]



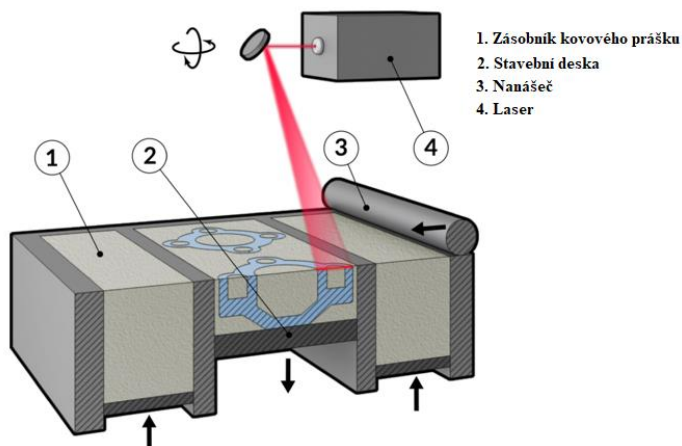
Obr. 12. Nanášení dalších vrstev [7]

### 3.1.3 Laser Beam Melting (LBM)

Laser Beam Melting je synonymem pro metody SLM, DMLS a EBM jen s nepatrnými rozdíly a spadá do kategorie využívající tavení prášku (Powder bed fusion).

Při tomto procesu je kovový prášek rozprostřen v tenkých vrstvách o tloušťce 20 μm – 100 μm ve stavební komoře na pracovní plochu o rozměrech od 50 mm x 50 mm do 800 mm x 400 mm. Prášek je doplněn ze zásobárny umístěné u pracovní plochy. Pro rozprostření kovového prášku po pracovní ploše je použito rameno s břitem. Pomocí galvanometrického skeneru je laserový paprsek o síle mezi 20 W - 1 kW nasměrován na vrstvu kovového prášku. Kovový prášek je vystaven laserovému paprsku v rovině XY a při překročení teploty tání materiálu se prášek roztaví. Dodaná energie do vrstvy prášku nezpůsobuje pouze tavení materiálu, ale také ovlivňuje oblasti v blízkém okolí tavné lázně díky tepelné vodivosti. V průběhu tuhnutí taveniny se spéká předchozí, ztuhlá vrstva s novou roztavenou vrstvou. Po podrobení práškového lože laserovému paprsku se pracovní deska sníží v ose z o výšku vrstvy a po pracovní komoře se rozprostře nová vrstva materiálu a celý proces nanesení a roztavení nové vrstvy prášku se opakuje. Po dokončení tisku může být nespečený prášek znovu zaveden do procesu.

Vyráběná součást je připevněna na stavební desce. Proces LBM se uskutečňuje v uzavřené komoře, ve které je uchovávána inertní atmosféra tak, aby byl obsah zbytkového kyslíku nižší než 0,1 %. Do pracovní komory je dopravován dusík nebo argon, aby se zabránilo nechtěným interakcím kovového prášku s jeho prostředím a aby se tavenina ochránila. [8]; [9] Příklad toho jak vypadá zařízení používající metodu LBM je ukázán na obrázku 12.

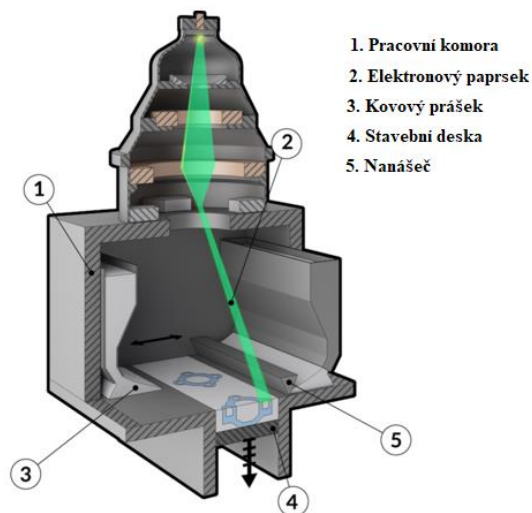


Obr. 13. Laser beam melting [35]

### 3.1.4 Electron Beam Melting (EBM)

Tavení elektronovým paprskem uplatňuje stejně jako LBM tavení kovového prášku. Prášek je dopravován ze zásobárny a rozprostřen přes pracovní plochu o velikosti 200 mm x 200 mm. Tloušťka vrstvy je typicky 50 $\mu$ m – 200  $\mu$ m. EBM používá pro roztavení kovového prášku jako zdroj tepla elektronový paprsek na rozdíl od metody LBM, která využívá jako zdroj laserový paprsek. Elektronový paprsek je vytvořen elektronovým dělem, urychlen a zaostřen elektromagnetickými čočkami a namířen magnetickou snímací cívkou do vyžadovaného místa na základní desce (práškové lože se prvně přehřeje rozostřeným paprskem).

K zaručení kompletního roztavení kovového prášku, je proud paprsku 5 $\mu$ A - 10 $\mu$ A, a rychlost skenování 100 mm/s. Stejně jako u procesu LBM se stavební deska sníží a je nanášena další vrstva kovového prášku. Proces skenování nejvyšší vrstvy, rozprostření prášku a snížení pracovní plochy se reprodukuje, dokud není součást dokončena. Pracovní atmosféra při procesu EBM je v podstatě vakuum s tlakem méně než 0,01 Pa. Přidáváním helia do pracovního prostoru v průběhu procesu tavení se zamezí elektrickému nabíjení částic kovového prášku a navýší se vedení tepla i chlazení taveniny. [8]; [9]; [10]



Obr. 14. Electron beam melting [36]



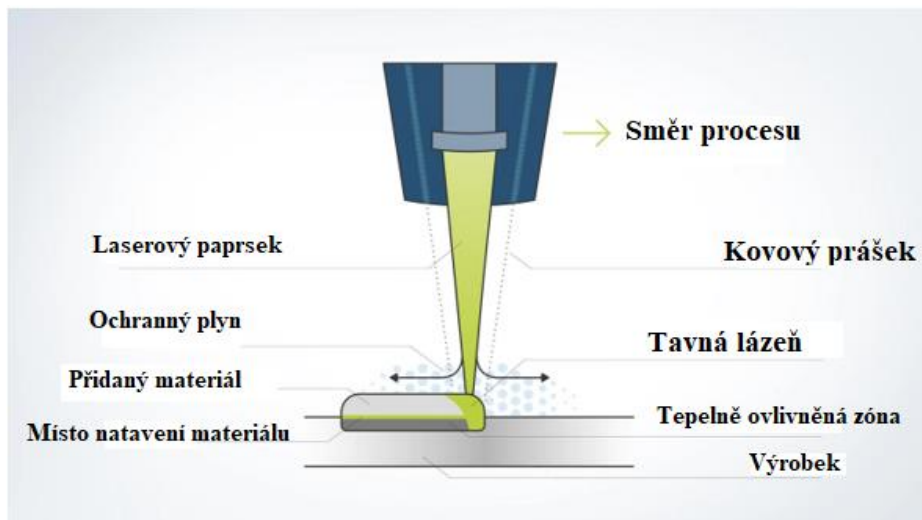
## 3.2 Directed Energy Deposition

Directed Energy Deposition se od metody Powder bed Fusion liší tím, že se materiál nanáší přímo do taveniny. Materiál je v podobě kovového prášku nebo drátu a jako zdroj energie může být využit laserový nebo elektronový paprsek. Technologie využívající DED jsou například: Laser metal deposition (LMD) a Electron beam additive manufacturing (EBAM). [11]; [12]; [13]

### 3.2.1 Laser Metal Deposition (LMD)

Metodou Laser Metal Deposition je díl vyroben tavením povrchu a současným tryskáním kovového prášku, který je dopravován několika proudovými tryskami přímo do tavné lázně. Působením argonu nebo helia je zajištěna ochrana tavné lázně proti oxidaci. Oproti metodám používající práškové lože, LMD poskytuje velkou rychlost stavění a dovoluje stavbu větších součástí.

Je několik LMD systémů. Nejčastěji je tisknutý díl nehybný a nanášecí hlava se po nanesení každé vrstvy přesune. V jiných systémech se díl přesune pod statickou nanášecí hlavou. Běžně se používá na opravy hřídelí nebo turbínových lopatek. [11]; [13]



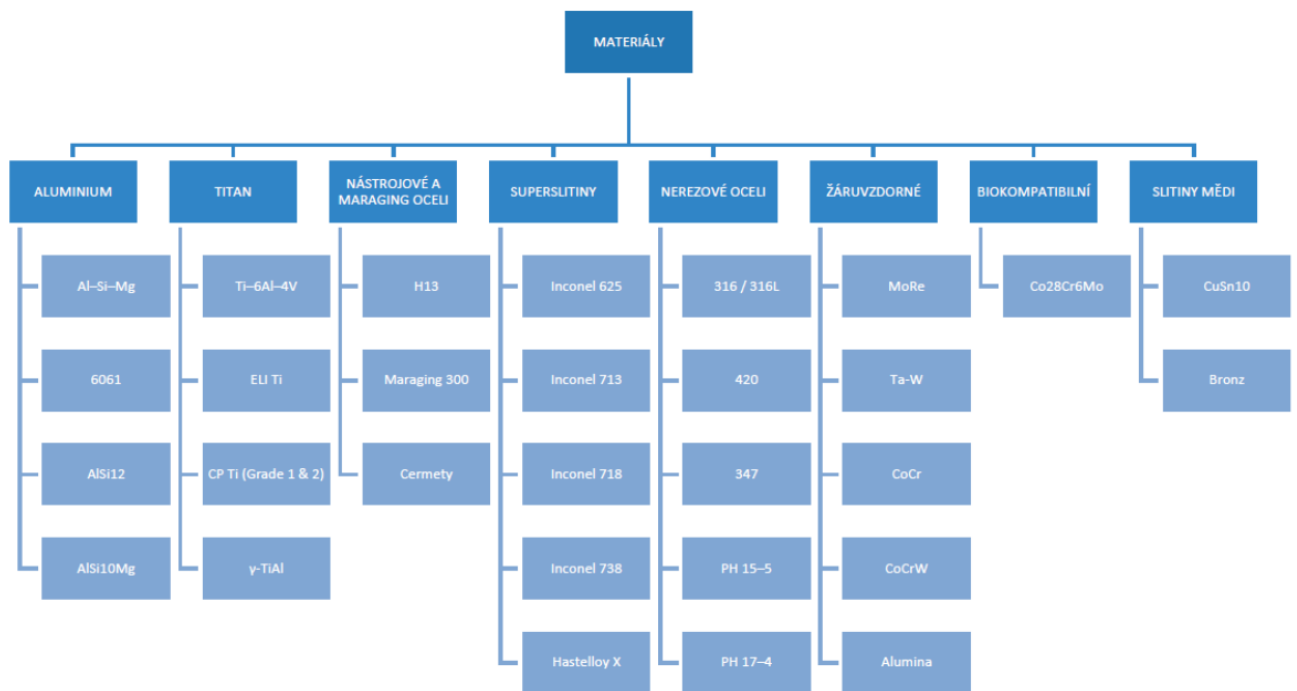
Obr. 15. Laser metal deposition [37]

## 4 Materiály

Při výrobě aditivní metodou můžeme použít velké množství materiálů. Ve strojírenském průmyslu mají největší zastoupení kovy, a to buď ve formě slitin nebo čistých kovů. Výrobky z plastů jsou nejvíce používány jako prototypy. Dalšími materiály, které aditivní výroba používá jsou kompozity, vosky, keramika, papír, sklo a dřevo. [14]

### 4.1 Kovové materiály

Ve výrobě se nejvíce používají slitiny kovů, jako jsou hliníkové, titanové, niklové slitiny, nástrojové oceli, korozivzdorné oceli. Materiál je doručován ve formě prášku, kde rozměry zrn jsou v řádu desítek a stovek mikrometrů. Kovový prášek je vyráběn buď atomizací taveniny plynem, vodou nebo odstředivou silou. [17] Na obrázku 18 je vidět přehled materiálů, které využívá metoda DMLS.



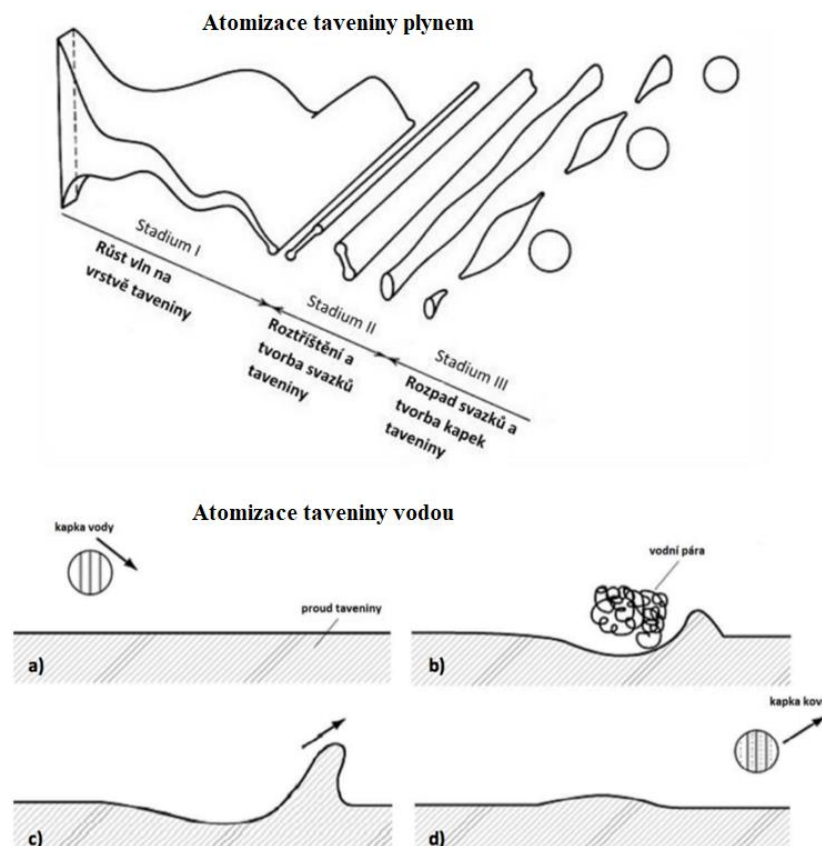
Obr. 16. Přehled materiálů tisknuté metodou DMLS [38]

## 4.2 Výroba kovových prášků

Nejrozšířenější způsob výroby kovového prášku je atomizace (rozstříkávání taveniny), řadící se do fyzikálně-mechanických metod výroby. Principem je vliv proudu tlakového plynu, tekutiny nebo odstředivých sil na taveninu. Rozdělením taveniny vzniknou kapky, které tuhnou následkem ochlazení v rozstříkacím médiu. Velikost, tvar nebo struktura takto vzniklých elementů jde ovlivnit kombinací různých faktorů. Faktory mohou být viskozita a povrchové napětí, obecné podmínky atomizace, teplota taveniny a podmínky ochlazování. Všeobecně platí, že čím větší je mechanická energie působící na taveninu a teplota taveniny, tím více vznikne jemnějšího prášku. Tvar vzniklých elementů jde ovlivnit přísadami jako je fosfor nebo bór. Tyto přísady, ale ve větším množství mění viskozitu taveniny. [14]

Způsoby výroby kovových prášků:

- Atomizace taveniny plynem
- Atomizace taveniny vodou
- Atomizace taveniny odstředivou silou



Obr. 17. Atomizace taveniny plynem a vodou [14]

## 5 Strategie a parametry tisku

Správně zvolené parametry a strategie tisku minimalizují zbytková napětí a tím eliminují různé deformace dílu, jako jsou například: nežádoucí spojení prvků, které jsou příliš blízko u sebe, zvlnění dílu a odtržení od podpor, deformaci stavební desky. K nejdůležitějším parametrům patří strategie skenování, výška vrstvy a velikost zrn, výkon laseru a vzdálenost bodů. [22]; [23]

### 5.1 Hlavní parametry a strategie tisku

#### 5.1.1 Strategie skenování

Laser se běžně při skenování posunuje podle určité šablony (skenovacího vzoru) po přímkových trajektoriích směrem tam a zpět. Strategie s kratšími skenovacími vektory generuje menší zbytková napětí, takže vybráním jiné šablony dokážeme ovlivnit délku skenovacích vektorů a díky tomu minimalizovat míru zbytkového napětí. S výběrem ideální šablony souvisí odstup jednotlivých trajektorií. Díky špatně zvolenému odstupu může vzniknout pravidelně se opakující porozita, z důvodu nedokonalého spojení sousedních linek. [22]

a) Strategie typu „Meander“

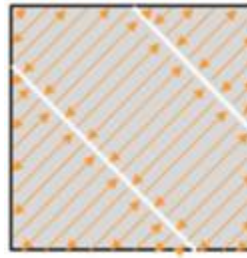
U strategie typu „Meander“ se po každé hotové vrstvě skenovací vzor natočí o úhel  $67^\circ$ . Je to efektivní strategie. Vhodná pro výrobu malých dílů.



Obr. 18. Strategie typu „Meander“ [24]

b) Strategie typu „Stripes“

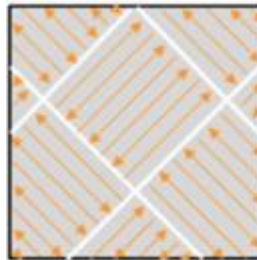
Strategie typu „Stripes“ díky rozdělení vrstvy na pruhy umožňuje dosáhnout konstantních časů mezi jednotlivými pruhy a konzistentní teploty v celém rozsahu. Po dokončení vrstvy se skenovací vzor také otočí o úhel  $67^\circ$ . Ideální pro velké díly.



Obr. 19. Strategie typu „Stripes“ [24]

c) Skenovací strategie „Chessboard“

Strategie „Chessboard“ funguje na podobném principu jako „Stripes“. Jenom vrstva není rozdělena na pruhy, ale na čtvercová pole. Čas skenování této strategie je bohužel výrazně vyšší, proto se běžně tato metoda nepoužívá. [22]; [24]



Obr. 20. Strategie typu „Chessboard“ [24]

### 5.1.2 Výška vrstvy a velikost zrn

Výška vrstvy se většinou pohybuje v rozmezí 20 $\mu\text{m}$  až 100 $\mu\text{m}$ . Tento parametr má vliv na mechanickou pevnost, drsnost povrchu a čas tiskového procesu.

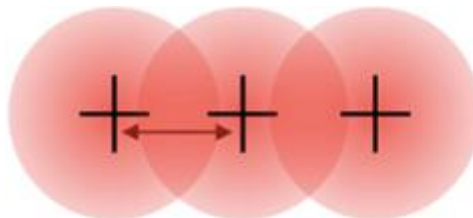
Prášky s malou velikostí zrna mají sklon se hromadit a to způsobuje zhoršení sypkosti prášku. Čímž je způsobeno špatné nanášení prášku. Naopak prášky s příliš velkými velikostmi zrn mají za následek špatné rozlišení. [22]

### 5.1.3 Výkon laseru

Laser působí v každém bodě o určité energii, která zapříčiňuje tavení kovového prášku. Obvykle se používají lasery s maximálním příkonem od 200 W do 400 W. Energie laserového impulzu musí být dostatečně velká, aby došlo k proniknutí paprsku do spodní vrstvy a tím ke spojení vrstev. Parametr výkonu laseru úzce souvisí s rychlostí skenování. [22]

#### 5.1.4 Vzdálenost bodů

Trajektorie laserového paprsku není kontinuální, ale je tvořena jednotlivými laserovými impulzy, které mezi sebou mají určitou vzdálenost. Mezera mezi těmito body má vliv na soudržnost a porozitu vrstev. Minimální porozity je dosaženo při použití mezery o  $2/3$  průměru natavené oblasti, která vznikne jedním laserovým impulsem. [24]

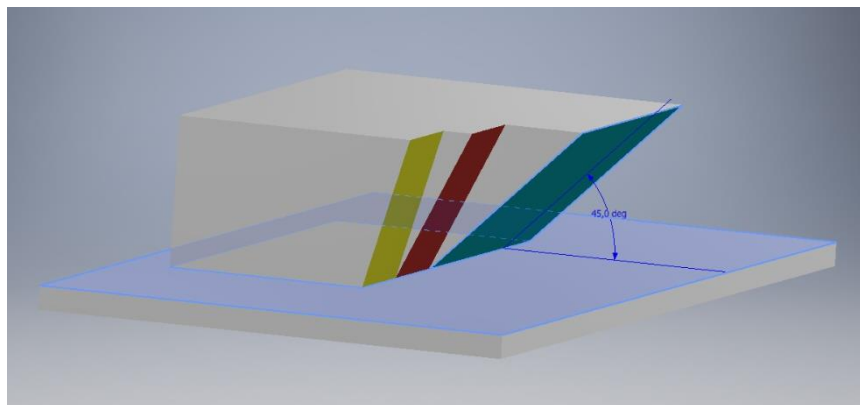


Obr. 21. Vzdálenost bodů [24]

## 6 Technologičnost konstrukce

### 6.1 Samonosné úhly

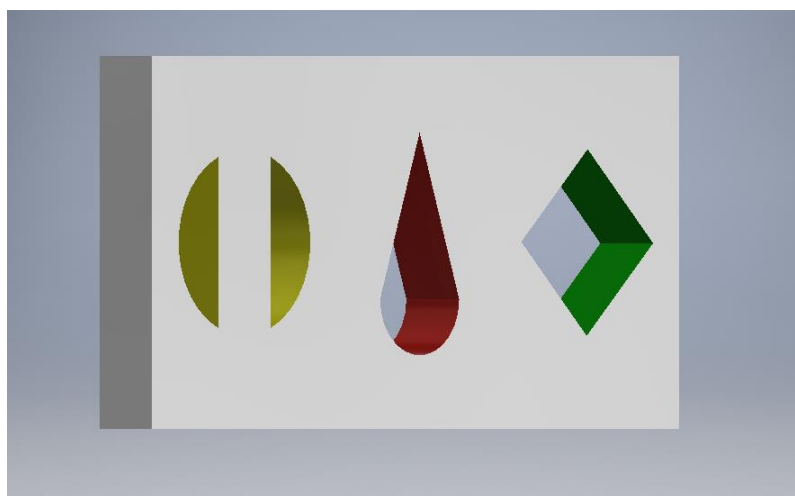
Samonosným úhlem se rozumí úhel mezi konstrukční deskou a prvkem. Obecným pravidlem je navrhovat samonosný úhel  $45^\circ$  a více. S klesajícím úhlem (bez použití podpor) se snižuje šance na požadovaný tvar prvku. [24]; [25]



Obr. 22. Samonosné úhly

### 6.2 Díry

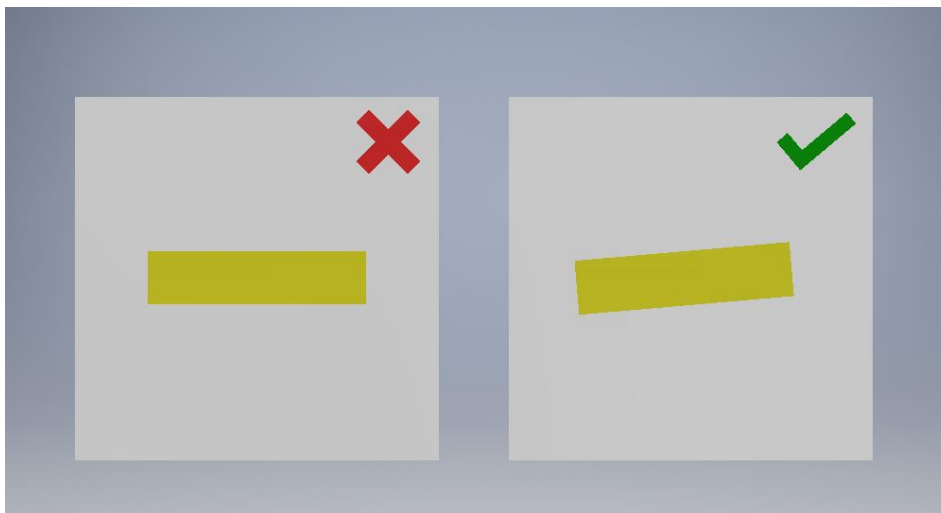
Vytvoření díry jde bez problémů do průměru 6 mm. Tato hodnota závisí na dalších parametrech, kterými jsou použitý materiál a výška vrstvy. Jestliže má otvor větší průměr je nutnost podepřít horní část díry. Další možností je (pokud díra nemá jinou funkčnost než odlehčení a nemusí mít předepsaný tvar) změna tvaru díry na tvar diamantu nebo kapky a tím se vyhnout podpěrám otvoru, díky samonosným úhlům. [24]; [26]



Obr. 23. Díry

### 6.3 Orientace dílu

Orientace rovného plochého povrchu dílu vůči nanašeči by neměla být rovnoběžná. Aby nedošlo k poškození součásti a nesprávnému nanesení vrstev. Nanašeč by se měl nejdříve dotknout bodu, nikoliv plochy. Proto by ploché povrchy měly být natočeny minimálně o  $5^\circ$ . Vhodnou geometrií je kruhový profil nebo U-profil. [24]



Obr. 24. Orientace dílu

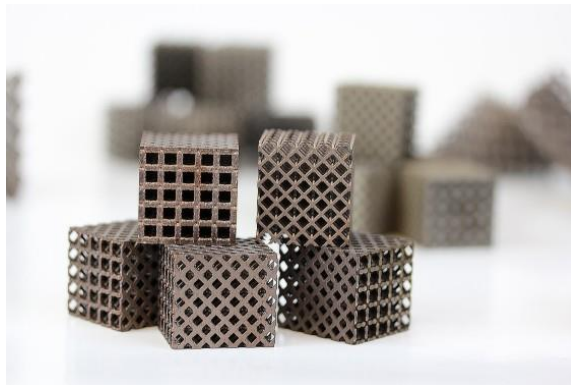
### 6.4 Výška dílu

Poměr výšky tělesa k délce podstavy by neměl být větší než 8:1. U větších poměrů by mohlo dojít k postupnému vychýlení dílu vzhledem ke stavební desce z důvodu působení síly nanašeče. Tomuto problému se můžeme vyhnout umístěním podpor nebo spojením součástí mostem. [24]; [26]



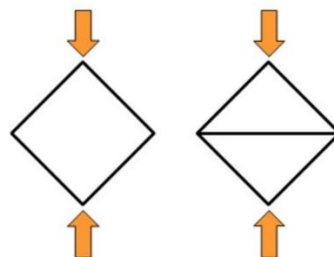
## 7 Lattice structure (Odlehčené struktury)

Pevnost tisknutého dílu je dána dvěma aspekty a to výrobním materiálem a konstrukcí samotného dílu. Díky konstrukční svobodě, kterou 3D tisk nabízí, jsme schopni vytvořit přesné strukturní vzory, které přináší spoustu výhod. Snižují hmotnost dílu a tudíž i objem spotřebovaného materiálu což vede k nižším nákladům. Podstatou je nahrazení plné výplně dílu odlehčenou strukturou. Se správně zvolenou strukturou jsme schopni dosáhnout při spotřebování menšího množství materiálu minimálního poklesu pevnostních vlastností. Další výhodou odlehčených struktur je jejich vlastnost odvádění tepla. Díky pravidelné struktuře a dutým průřezům lze teplo odvádět rychleji a rovnoměrněji. [27]



Obr. 25. Lattice structure [39]

Tvar, velikost a hustota struktury jsou klíčovými parametry, jak daná součást bude zvládat namáhání. Optimalizací těchto parametrů můžeme vytvořit strukturu s dominancí v ohybu nebo strukturu s dominancí v tahu. Čím objemnější elementy struktury, tím těžší díl. [27]; [28]



Obr. 26. Struktura mřížky [28]

Na obrázku (Obr. 26.) jsou ukázány dva různé tvary mřížek. Struktura mřížky napravo je odolnější vůči mechanickému namáhání díky středové nosné konstrukci.

## 7.1 Tvary odlehčených struktur

Existuje mnoho tvarů odlehčených struktur, jako jsou například mřížky, trojúhelníky, voštiny, Voroného vzory, hexagonální mřížky, nebo zcela náhodné a organické tvary. [28]

## 7.2 Rozdělení odlehčených struktur

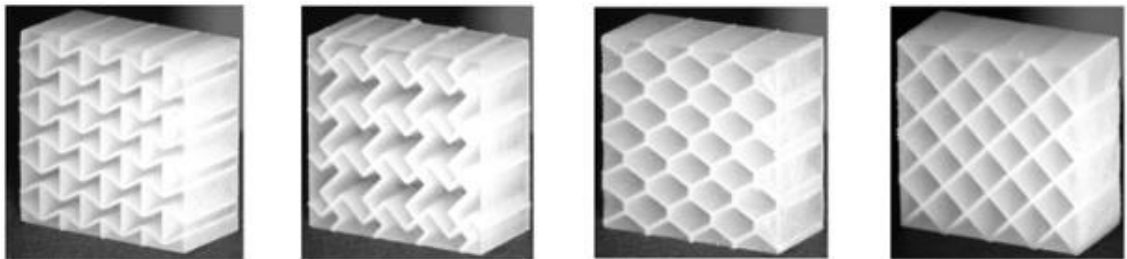
Toto rozdělení je založeno na geometrii základní buňky a pravidelnosti jejího uspořádání.

### 7.2.1 2,5D struktury

Geometrie 2,5D struktur je dána uspořádáním rovinných obrazců, které jsou následně vyzvednuty do prostoru. Uspořádání obrazců v rovině může být buď pravidelné nebo nepravidelné. [27]; [29]

#### 1 Pravidelné

Vznikají pravidelně se opakujícím rozdělením roviny jedním či více obrazci. Asi nejznámějšími pravidelnými uspořádáními je vyplnění roviny šestiúhelníky, trojúhelníky a čtyřúhelníky. [27]; [29]



Obr. 27. Pravidelné 2,5D mřížky [18]

#### 2 Náhodné

Náhodné uspořádání vzniká použitím nějaké základní funkce, která zahrnuje prvek nahodilosti. Nejznámějším náhodným dělením jsou tzv. Voroného vzory. [27]; [29]



Obr. 28. Náhodná 2,5D mřížka [19]

## 7.2.2 3D struktury

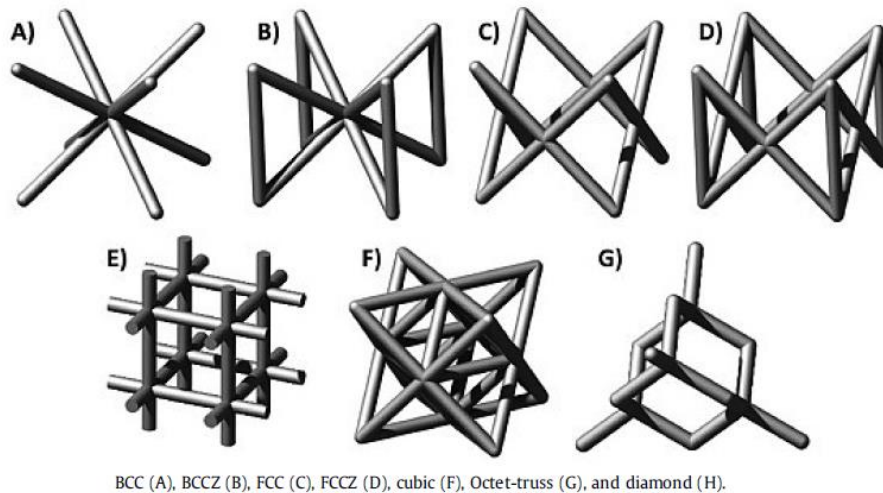
Stejně jako u 2,5D struktur lze tyto struktury rozdělit na pravidelné a náhodné. [27]

### 1 Pravidelné

Za pravidelné 3D struktury předpokládáme takové, které jsou vytvořeny periodickým opakováním základní buňky. Podle typu základní buňky se dají rozdělit do tří hlavních podskupin. [27]

#### a) Příhradové struktury

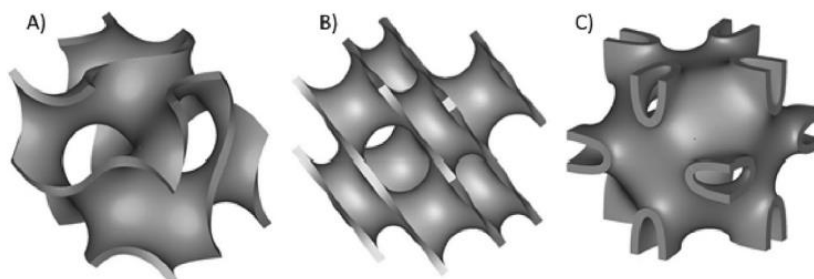
Příhradové struktury jsou složeny ze vzájemně propojených prutů, obvykle kruhového průřezu a svým vzhledem připomínají příhradové konstrukce používané ve stavitelství. [27]; [29]



Obr. 29. Příhradové struktury [27]

#### b) Trojnásobně periodické minimální plochy

Základními elementy těchto struktur jsou minimální plochy, které lze periodicky opakovat ve všech třech hlavních směrech tak, aby na sebe navazovaly. Termín minimální plocha pochází z diferenciální geometrie a je to plocha, která je přiřazena prostorové uzavřené křivce tak, aby křivku obsahovala a měla minimální plochu. [27]; [29]

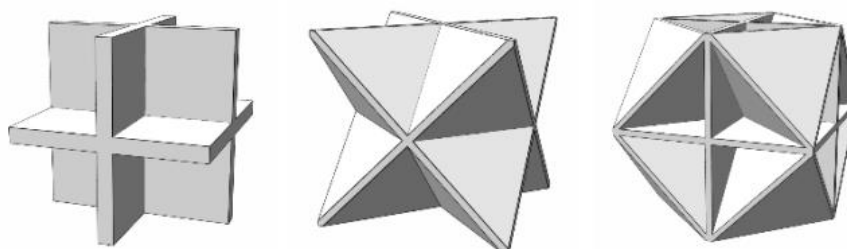


Schoen gyroid (A), Schwarz diamond (B) and Neovius (C).

Obr. 30. Trojnásobně periodické minimální plochy [27]

### c) Deskové struktury

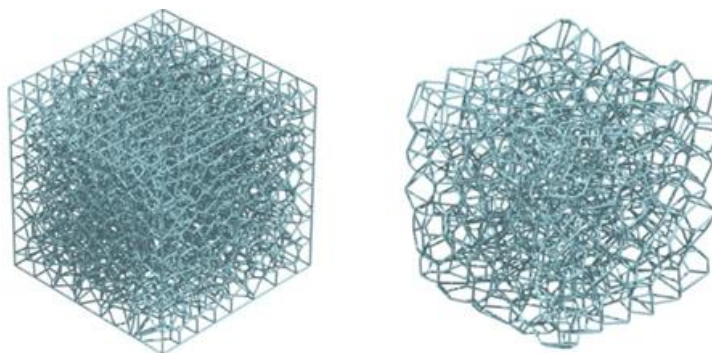
Deskové struktury jsou složeny z desek nikoliv prutů. To má ale určité problémy při výrobě některými aditivními technologiemi z důvodu uzavření nespěčeného prášku uvnitř struktury. Tento problém jde vyřešit otvorem v jednotlivých deskách. Tuhost deskových struktur může být až třikrát vyšší než u nejpevnějších příhradových struktur. [27]



Obr. 31. Deskové struktury [20]

## 2 Náhodné

Materiály s náhodným uspořádáním a velikostí buněk můžeme označit za pěny. Ty dále dělíme na otevřené nebo uzavřené. [27]; [29]



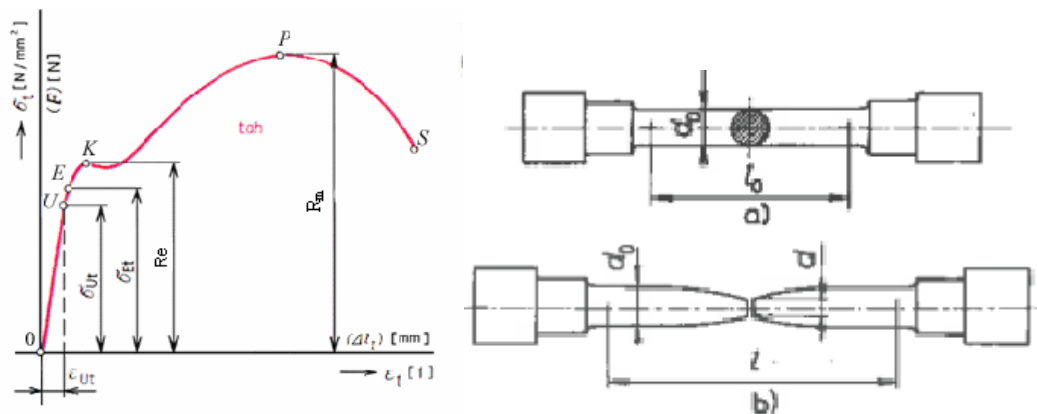
Obr. 32. Náhodné pěnové struktury [21]

## 8 Zkoušky mechanických vlastností kovů

Mechanickým zkoušením kovů se určují jejich mechanické vlastnosti, tím rozumíme vlastnosti, které umožňují mechanické namáhání, jak při zpracování, tak při použití výrobku. Metoda zkoušení je zvolena podle toho jak má být materiál při použití zatěžován.

### 8.1 Zkouška tahem

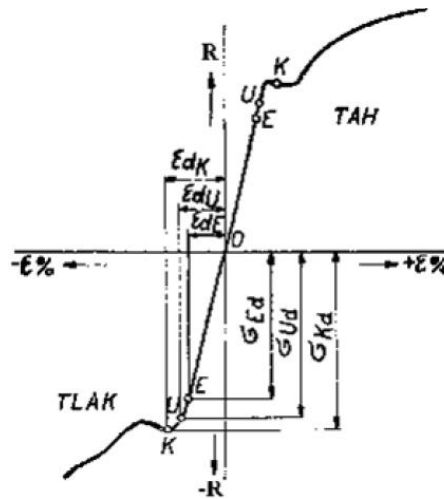
Zkouška tahem patří mezi nejrozšířenější zkoušky pro zjišťování mechanických vlastností, specifikace této zkoušky jsou definovány v normě ČSN EN ISO 6892-1. Díky této zkoušce získáme potřebné základní hodnoty pro výpočet konstrukčních prvků a volbu vhodného materiálu. Zkouška pevnosti v tahu probíhá na tyčích, které mají normalizovaný tvar a rozměry. U této zkoušky zjišťujeme mez pevnosti, mez kluzu, poměrné prodloužení, tažnost, kontrakci a další veličiny daného materiálu. [40]



Obr. 33. Smluvní diagram zkoušky tahem u měkké uhlíkové oceli a normalizované tyče [40]

### 8.2 Zkouška tlakem

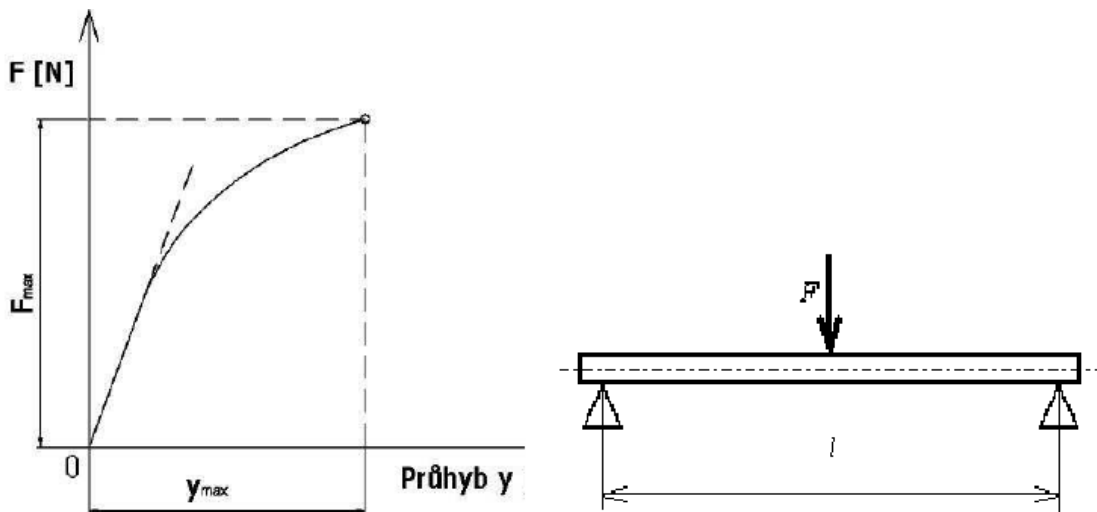
Zkouška tlakem se provádí hlavně u křehkých materiálů. Pro tvárný a houževnatý materiál má tato zkouška omezený význam. U ocelí není tato zkouška nutná, protože hodnoty úměrnosti a meze kluzu jsou v tahu a tlaku skoro stejné. Zkouškou tlakem zjišťujeme pevnost v tlaku, mez kluzu, mezní poměrné stlačení, mezní poměrné rozšíření. [40]



Obr. 34. Pracovní diagram mechanické zkoušky tlakem [40]

### 8.3 Zkouška ohybem

Tato zkouška se používá hlavně u křehkých materiálů, jako jsou např. litiny. Pro tvárné, houževnaté materiály nemá zkouška pevnosti v ohybu význam, protože k porušení zkoušeného tělesa nedojde. U zkoušky pevnosti v ohybu se zjišťuje pevnost v ohybu, největší průhyb v okamžiku porušení, který charakterizuje houževnatost daného materiálu. Zkušební tělesa mají většinou kruhový průřez s normovanými rozměry. Specifikace této zkoušky jsou definovány v normě ČSN EN ISO 7438. [40]



Obr. 35. Průběh mechanické zkoušky ohybem a schéma zatěžování při zkoušce ohybem [40]

## 9 Experimentální část

Experimentální část práce je zaměřena na porovnání mechanických vlastností zkušebních vzorků s mřížkovými strukturami. Pro porovnání vlastností zkušebních vzorků byly provedeny tři mechanické zkoušky. Zkouška tlakem, zkouška tahem a tříbodová zkouška ohybem. Vzhledem k tomu, že je tato technologie poměrně nová, tak neexistují žádné normy, které by určovaly podmínky, jak se mají tyto zkoušky mechanických vlastností provádět. Zkušební vzorky byly navrženy v softwaru nTop a vytisknuty na zařízení Renishaw AM250 z korozivzdorné oceli AISI 316L.

### 9.1 Kovový prášek z korozivzdorné oceli AISI 316L

Korozivzdorná ocel AISI 316L je kyselinovzdorná chrom-nikl-molybdenová ocel s nízkým obsahem uhlíku do 0,03, která má velmi zvýšenou odolnost proti všem typům koroze. Ocel AISI 316L má velmi dobré mechanické vlastnosti při zatěžování tlakem, tahem a ohybem. Tato ocel se často používá v chemickém průmyslu a medicíně.

Tab. 1 Chemické složení [viz. Příloha 1] [41]

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	ostatní
	[hm%]						
AISI 316L	≤ 0,03	≤ 2,00	≤ 1	16,0-18,0	10,0 - 14,0	2,0 - 3,0	S ≤ 0,03

Tab. 2 Mechanické vlastnosti [viz. Příloha 1] [41]

	$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A%	E [GPa]
AISI 316L	494 ± 14	624 ± 17	>43 ± 2	197 ± 4

## 9.2 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky s různými mřížkovými strukturami byli navrženy pro zkoušku tlakem, tahem a tříbodovým ohybem.

### 9.2.1 Příprava zkušebních vzorků

#### a) Definování mřížkové struktury

Zaprvé je potřeba určit mřížkovou strukturu, pro kterou chceme zkoušku provádět. Mřížková struktura je definována typem základní buňky, parametry elementů a rozměry buněk.

#### b) Tvorba 3D modelu zkušebního vzorku

Daná mřížková struktura je použita na šablonu zkušebního vzorku pro příslušnou zkoušku a je vytvořen 3D model zkušebního vzorku. Musí se zvolit velikost zkušebního vzorku tak, aby se mřížková struktura několikrát periodicky opakovala. Dle druhu zkoušení zkušebního vzorku je potřeba vyřešit, jestli má být vzorek opatřen stykovou plochou, o kterou bude vzorek opřen při dané zkoušce. Následně je vytvořený model exportován a připraven pro tisk.

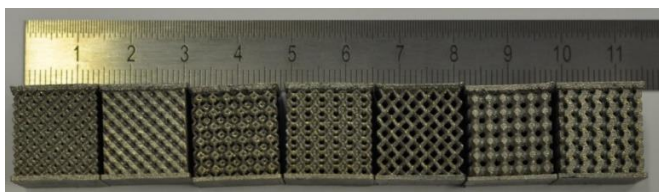
#### c) Tisk zkušebních vzorků

Zkušební vzorky jsou vytisknuty z korozi-vzdorné oceli AISI 316L technologií DMLS. Pro porovnávání zvolených struktur je nutné uvažovat vliv parametrů tisku a orientaci zkušebních tělísek při tisku. Tiskové parametry a orientace by měly být identické pro všechny srovnávané vzorky.

### 9.2.2 Velikost zkušebních vzorků

#### 1) Vzorky pro zkoušku tlakem

Pro zkušební vzorky pro tlakovou zkoušku o rozměrech 15 x 15 x 15 mm byli určeny rozměry buněk ve tvaru krychle s hranou 2,5 mm s průměrem prutů 0,4 mm. Stykové plochy, na které bude působit tlak jsou vyplněny celým materiálem o výšce 1 mm.



Obr. 36. Vzorky pro zkoušku tlakem



2) Vzorky pro zkoušku tahem

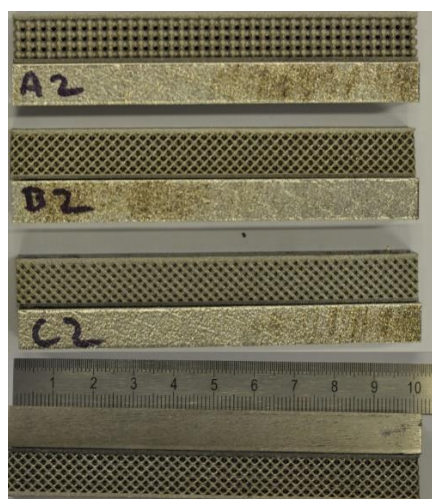
Zkušební vzorky pro zkoušku tahem měli rozměry 15 x 10 x 70 mm s rozměrem buněk ve tvaru krychle s hranou 2,5 mm s průměrem prutů 0,4 mm. Kde výška struktury byla 20 mm a výšky upínacích částí 25 mm. Mezi porovnávanou oblastí (mřížková struktura) a upínací částí může být přechodová vrstva, kde se průřez prutů/desk směřem k upínací částí plynule zvětšuje, aby se eliminovala koncentrace napětí v přechodové oblasti.



Obr. 37. Vzorky pro zkoušku tahem

3) Vzorky pro zkoušku tříbodovým ohybem

Zkušební vzorky pro zkoušku tříbodovým ohybem měli rozměry 10 x 10 x 100 mm s rozměrem buněk ve tvaru krychle s hranou 2,5mm s průměrem prutů 0,4 mm a dosedacími plochami o tloušťce 1 mm.



Obr. 38. Vzorky pro zkoušku ohybem

### 9.3 Renishaw AM250

Renishaw AM250 používá technologii laserového spékání prášků DMLS, disponuje tiskovým prostorem o rozměrech 250 mm v ose X, 250 mm v ose Y a 300–360 mm v ose Z. Lze volit mezi 200 W a 400 W vláknovým laserem, který pracuje v komoře s ochrannou atmosférou. Komora udržuje koncentraci kyslíku pod 50 ppm, což i přes nízkou spotřebu ochranného plynu umožňuje bezpečné použití reaktivních materiálů a zároveň je zajištěna lepší mechanická odolnost a integrita materiálu. Při tvorbě inertní atmosféry patentovanou metodou společnosti Renishaw se nejdříve vytvoří v pracovní komoře vakuum, do kterého je potom vpuštěn vysoce čistý argon. Tato metoda zaručuje vynikající čistotu prostředí v pracovní komoře stroje a také minimální spotřebu argonu pro naplnění komory i následný provoz. Vysoká čistota prostředí je základním požadavkem pro zpracování kovových prášků. Mezi nejlepší vlastnosti Renishaw AM250 je možnost rychle přepínat mezi rozmanitým spektrem materiálů, které společnost Renishaw nabízí. [30]

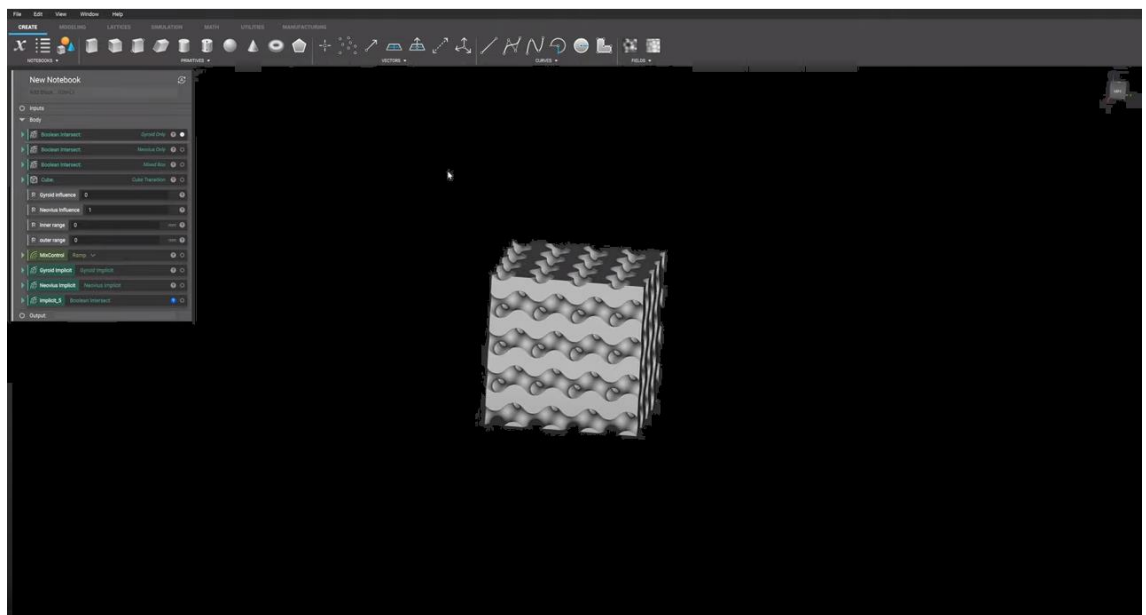


Obr. 39. Zařízení Renishaw AM250 [32]

## 9.4 nTop

Vstupní soubory pro tisk vzorků byli připraveny v prostředí softwaru nTop (Obr.35.), který umožňuje návrh, optimalizaci, simulaci a přípravu dílů pro tisk v jednom. Tato platforma se přímo zaměřuje na aditivní výrobu a použití mřížkových struktur. Od klasických konstrukčních CAD softwarů jako jsou např. Inventor, Catia, SolidWorks atd. se nTop odlišuje hlavně definováním objektů. Objekty v těchto klasických CAD softwarech jsou definovány svou vnější obálkou (plochy, hrany). To ale není vhodné pro modelování mřížkových struktur z hlediska velkého množství prvků a složitých geometrií. Na tyto aplikace se právě skvěle hodí software nTop, který k popisu objektu využívá matematických implicitních funkcí, které každému bodu v prostoru přiřadí hodnotu.

Tento systém podporuje platformy aditivní výroby Renishaw na kterém byli vytisknuty vzorky, čímž zabezpečuje těsnější integraci do řídicího softwaru stroje a nabízí rychlou a přesnou kontrolu souborů. [31]



Obr. 40. prostředí softwaru nTop [31]

## 10 Zkoušky mechanických vlastností

Cílem zkoušení je srovnání mřížkových struktur s různými strukturami a parametry z hlediska mechanických vlastností a chování při namáhání na tah, tlak a ohyb. Srovnání mřížkových struktur může být použito k volbě vhodné struktury pro daný typ namáhání.

### 10.1 LabTest Model 5.100SP1

Pro mechanické zkoušky v experimentální části bakalářské práce jsem zvolil zkušební stroj LabTest 5.100SP1. Zařízení disponuje siloměrnou hlavou pro určování velikosti zatěžující síly a dále také laserovým extenzometrem LE 05 pro měření deformace zkušebního vzorku.

Tab. 3. Parametry stroje LabTest 5.100SP1

Technická data	5.100SP1
Jmenovité zatížení [kN]	100
Max. zkušební rychlost [mm/min]	800
Přesnost řízení rychlosti [%]	±0,5
Rozlišení příčnicku [μm]	1
Tuhost rámu [mm/N]	1,6x 10 <sup>-6</sup>
Rozpětí sil [kN]	500-600
Přesnost měření síly [%]	±0,3 z hodnoty v rozsahu
Přesnost dráhy [μm]	1 - ČSN EN ř513
Přesnost měření napětí [%]	±0,5 průtahoměru

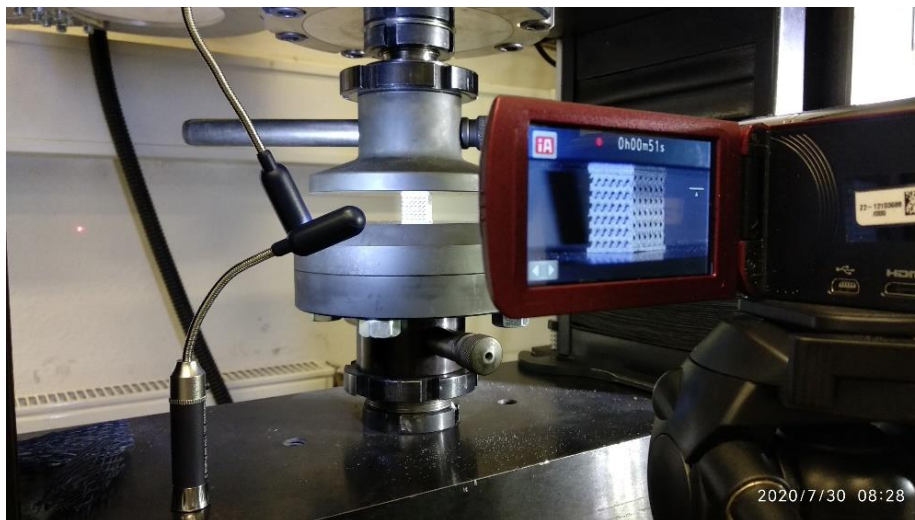


Obr. 41. LabTest 5.100SP1

## 10.2 Zkouška tlakem

### 10.2.1 Příprava zkoušky

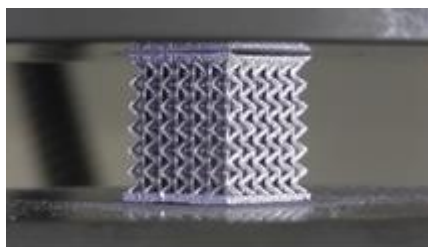
Pro zkoušku tlakem byly použity ploché tlačné desky pro zkoušku tlakem, do kterých byly vloženy vzorky. Rychlost pohybu nástroje byla zvolena na 2 mm/min. K ukončení zkoušky došlo při dosažení síly 80 kN. Při zkoušce byla registrována síla v závislosti na poloze příčnicku.



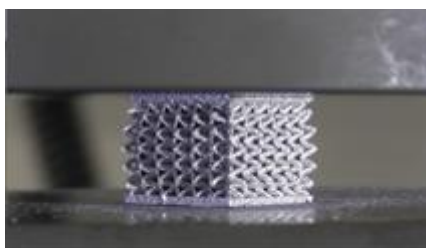
Obr. 42. Příprava zkoušky tlakem

### 10.2.2 Vyhodnocení zkoušky

Naměřené hodnoty ze zkoušky jsou vyneseny do tabulky č.4., obr. č.44. a na obrázku č.43. je názorná ukázka průběhu zkoušky na vzorku J1 (BCC).



Zatížení: 0 kN




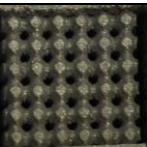
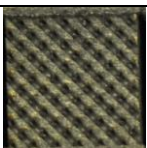

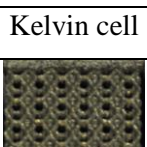
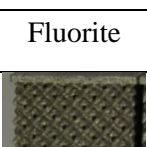
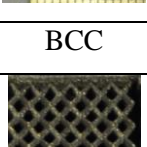
Zatížení: 35 kN

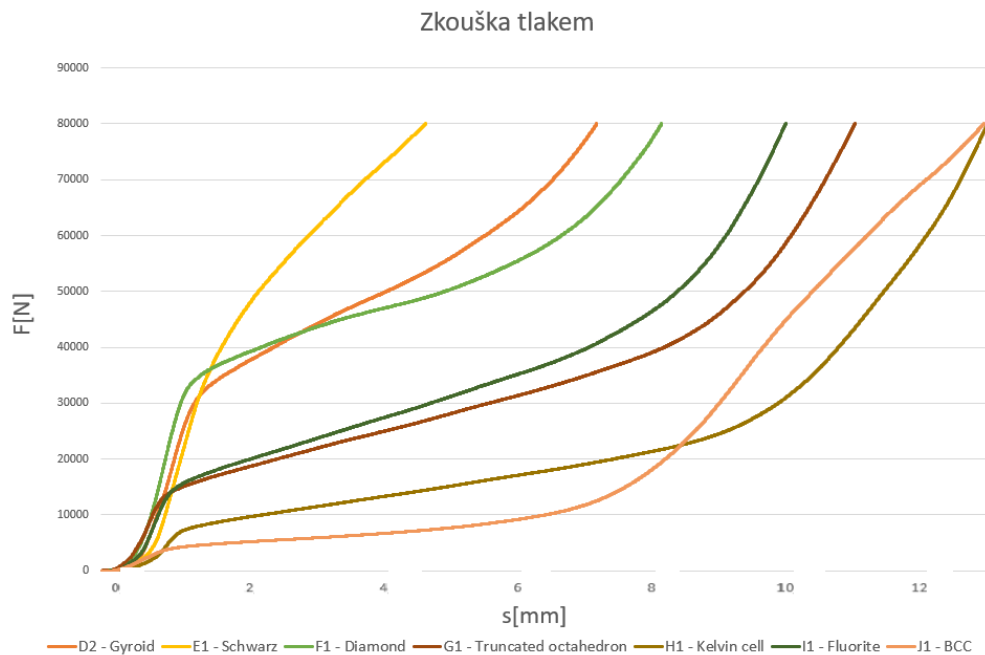


Zatížení: 75 kN

Obr. 43. Průběh zkoušky tlakem

Tab. 4. Naměřené hodnoty – zkouška tlakem

Označení vzorku	Typ struktury	Výška vzorku [mm]			Průřez [mm]		Dráha stlačení [mm]	Síla ukončení zkoušky [kN]	Hmotnost vzorku [g]
		bez destiček	před deformací	po deformaci	a	b			
D2	Gyroid	15	17	11,8	15,15	15,15	5,2	80	17,9
									
E1	Schwarz	15	17	14,5	15	15	2,5	80	17
									
F1	Diamond	15	17	10,75	15,1	15,1	6,25	80	18
									
G1	Truncated octahedron	15	16,95	8,05	15,5	15,5	8,9	80	11,9
									
H1	Kelvin cell	15	16,95	6,6	15,5	15,5	10,35	80	9,7
									
I1	Fluorite	15	17,1	9,3	15,4	15,4	7,8	80	13,3
									
J1	BCC	15	17,1	6,5	15,4	15,4	10,6	80	9
									



Obr. 44. Graf-zkouška tlakem

Hlavním ukazatelem pro porovnání pevnosti struktur při namáhání tlakem byla velikost dráhy stlačení jednotlivých vzorků (dráha, kterou vykonal příčnick při deformaci vzorku). Tento ukazatel nám řekne, jak je daná struktura odolná vůči namáhání tlakem. Nejlépe ze všech struktur tomuto typu zatížení odolávala Schwarzova struktura, u které došlo při maximálním zatížení 80 kN ke stlačení o 2,5 mm. Naopak nejhůře tomuto zatížení odolávala struktura BCC, která se stlačila o 10,6 mm, což je více než o polovinu své původní výšky (o 61,9%). Jak velký odpor kladly tyto struktury při zatížení můžeme poznat ze strmosti jednotlivých křivek v grafu. Kde je vidět, že křivka struktury BCC je oproti strmé křivce Schwarzovi struktury spíše plochá. Z grafu můžeme také vyčíst kdy struktury přešly z elastické do plastické deformace. Například u struktury BCC došlo k plastické deformaci přibližně při zatížení 5 kN a u Schwarzovi struktury přibližně okolo hodnoty zatížení 32 kN. Je vidět, že struktura BCC kladla ze všech struktur nejmenší odpor a pro namáhání tlakem se nehodí. Stejně tak se podle naměřených hodnot nehodí struktura Kelvin cell, která vykazovala podobné výsledky jako BCC. Schwarzova struktura kladla naopak odpor největší a proto je vhodná pro namáhání tlakem. Dalšími strukturami, které měly dobré výsledky při namáhání tlakem byly struktury typu Gyroid a Diamond.

## 10.3 Zkouška tahem

### 10.3.1 Příprava zkoušky

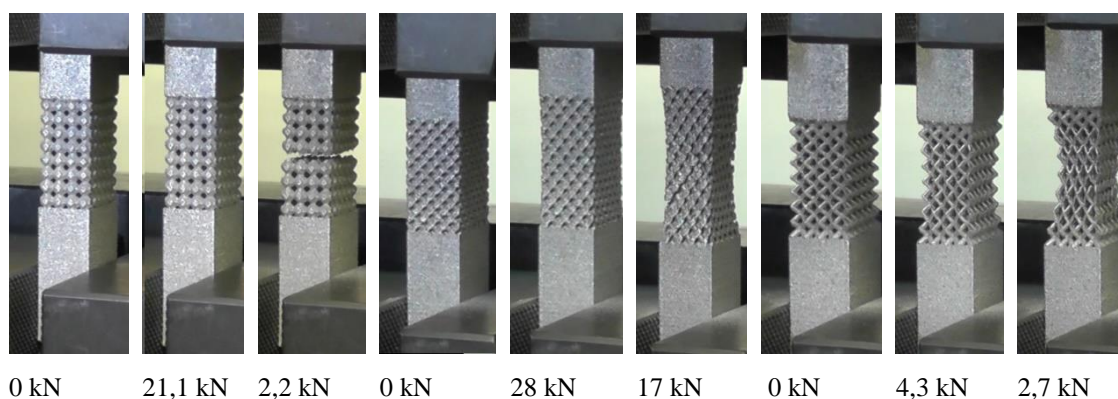
Zkušební vzorek byl upnutý do čelistí pro zkoušku tahem. Rychlost posuvu příčnicku byla zvolena na 2 mm/min. Zkouška byla ukončena při poklesu síly o 50%. Při zkoušce byla registrována síla v závislosti na poloze příčnicku.



Obr. 45. Příprava zkoušky tahem

### 10.3.2 Vyhodnocení zkoušky




Naměřené hodnoty ze zkoušky jsou vyneseny do tabulky č.5., obr. č.47. a na obrázku č.46. je názorná ukázka průběhu zkoušky na vzorcích A1, B2, C1.

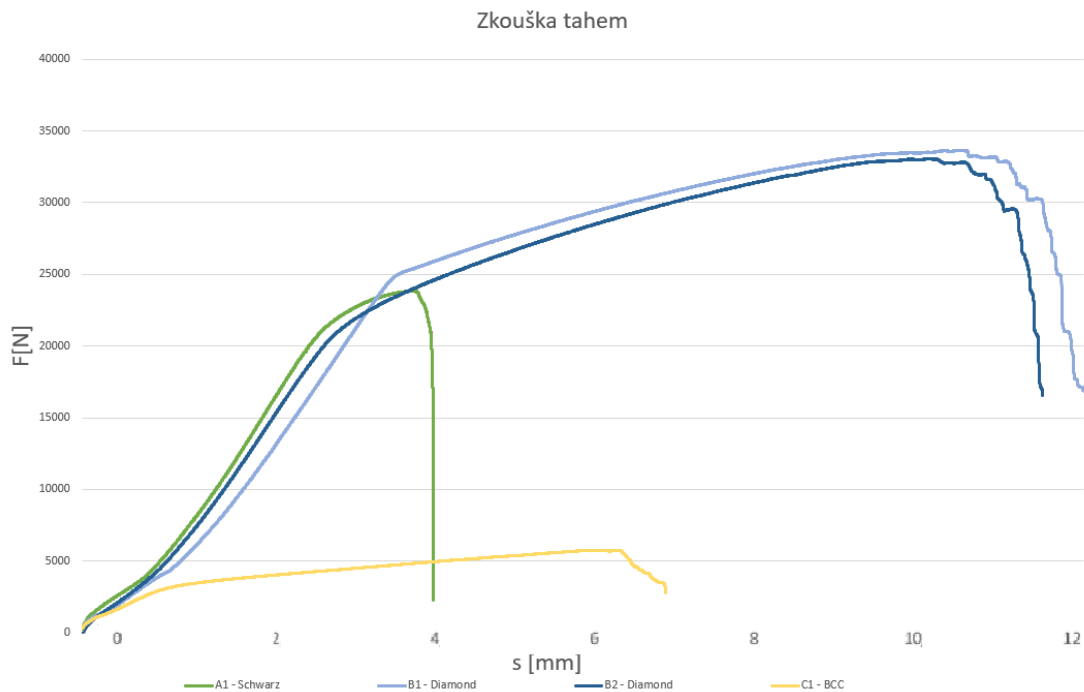


Obr. 46. Průběh zkoušky tahem



Tab. 5. Naměřené hodnoty - zkouška tahem

Označení vzorku	Typ struktury	Délka vzorku [mm]		Dráha příčnicku [mm]	Max. Síla [N]	Hmotnost vzorku [g]
		před deformací	po deformaci			
A1	Schwarz	70,1	71,3	3,84	23849,5	70,2
						
B1	Diamond	70,2	78,6	10,1	33662,6	71,1
						
B2	Diamond	70,2	77,7	9,9	33080,8	71,4
C1	BCC	70,4	75,8	5,9	5766,1	75,1
						



Obr. 47. Graf - zkouška tahem

Hlavními kritérii pro porovnání zkušebních vzorků pro zkoušku tahem byla maximální zatěžující síla a velikost dráhy příčnicku („protažení vzorku“). Největší maximální síla byla zaznamenána u struktury Diamond. Síla dosáhla hodnoty 33662,6 N, při této síle byla uražená dráha příčnickem 10,1 mm. Z grafu lze vidět, že Schwarzova struktura měla do dosažení své maximální síly 23849,5 N podobný trend jako struktura Diamond, ale při tomto maximálním zatížení a „protažení“ 3,84 mm došlo k přetrhnutí vzorku. Nejmenší maximální síly 5766,1 N dosáhla struktura BCC, při které příčnick urazil dráhu 5,9 mm. Díky strmosti jednotlivých křivek se dá říct, že nejmenší odpor při namáhání tahem kladla struktura BCC. Podle toho můžeme říct, že se tato struktura na namáhání tahem nehodí. Tahovému namáhání nejlépe odolávala struktura Diamond, jak z hlediska maximální dosažené síly, tak z hlediska uražené dráhy příčnicku.

## 10.4 Zkouška tříbodovým ohybem

### 10.4.1 Příprava zkoušky

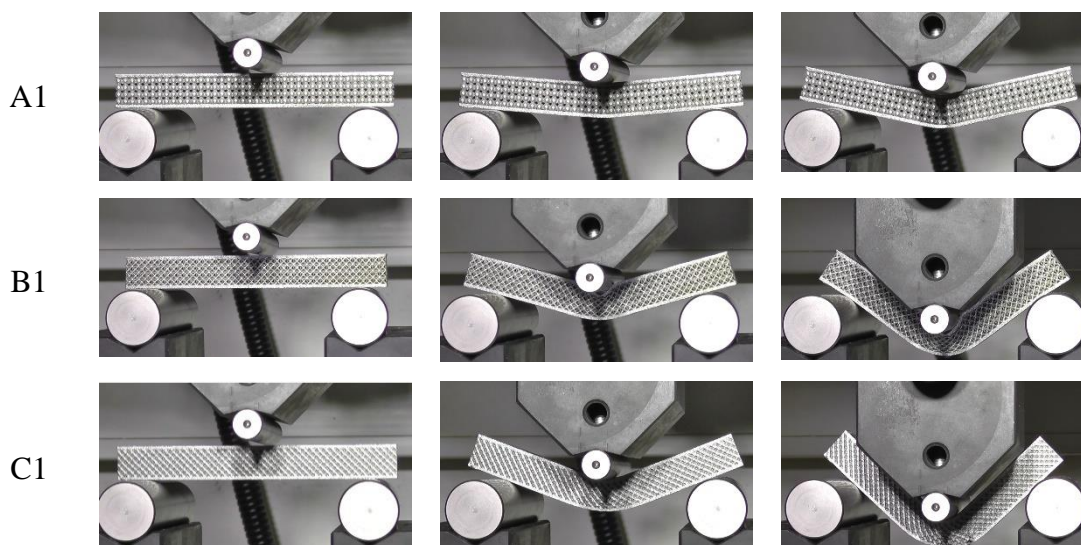
Zkušební vzorek byl vložen do přípravku pro tříbodový ohyb s průměrem ohýbacího trnu 10 mm, průměrem dolních podpor 20 mm a vzdáleností podpor 80 mm. Rychlost posuvu ohýbacího trnu byla stanovena na 5 mm/min. Zkouška probíhala do lomu nebo do posunutí trnu o vzdálenost 28 mm. Při zkoušce byla registrována síla v závislosti na poloze příčnicku.



Obr. 48. průběh zkoušky tříbodovým ohybem




### 10.4.2 Vyhodnocení zkoušky

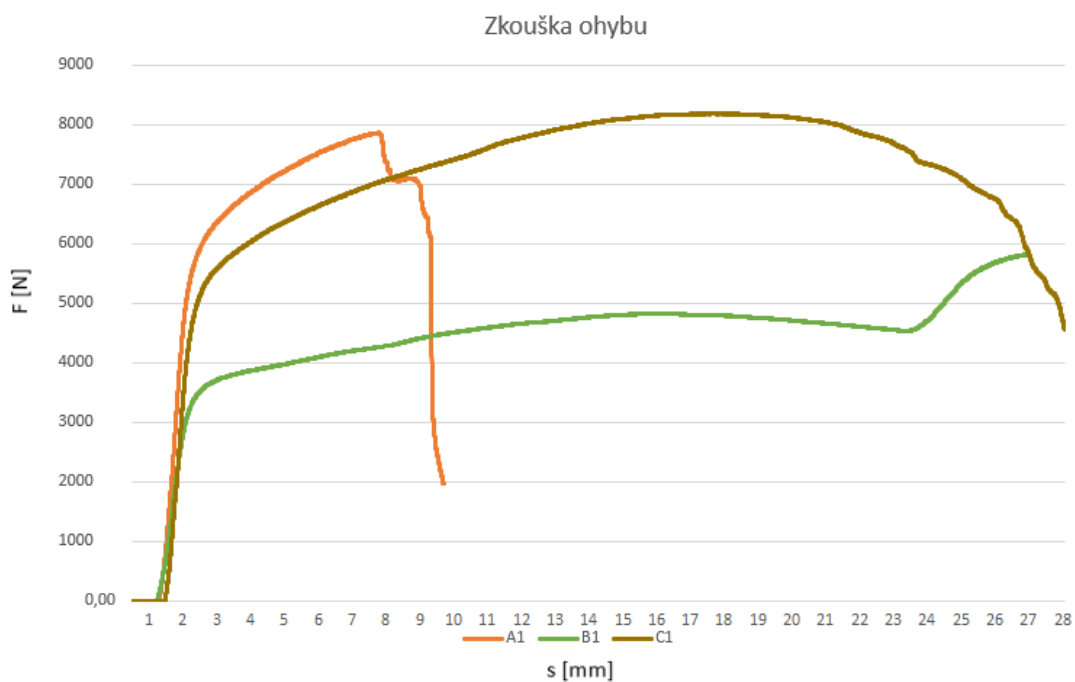
Naměřené hodnoty ze zkoušky jsou vyneseny do tabulky č.6., obr. č.50. a na obrázku č.49 je názorná ukázka průběhu zkoušky na vzorcích A1, B1, C1.



Obr. 49. Průběh zkoušky tříbodovým ohybem

Tab. 6. Naměřené hodnoty - zkouška tříbodovým ohybem

Označení vzorku	Typ struktury	Průřez [mm]		Délka vzorku [mm]	Průhyb (dráha příčnicku) [mm]	Max. Síla [N]	Hmotnost vzorku [g]
		a	b				
A1	Schwarz	10	10	100	7,41	7866,2	57,4
							
B1	FCC	10	10	100	15,71	4827,3	38,2
							
C1	Diamond	10	10	100	17,51	8190,1	59,9
							



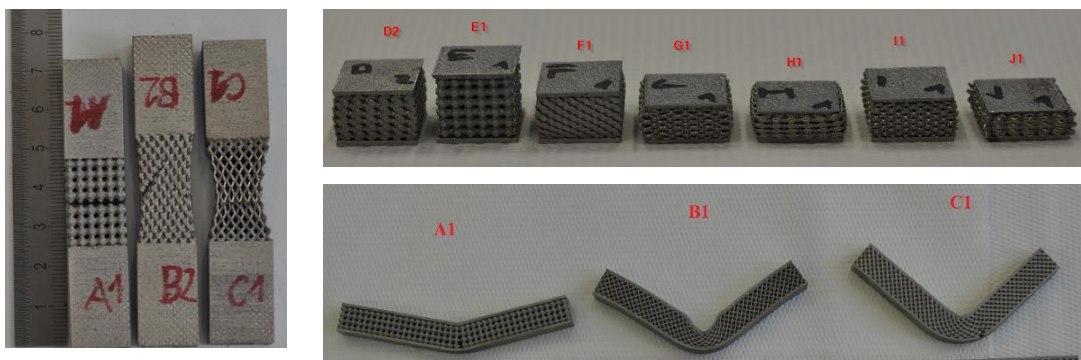
Obr. 50. Graf - zkouška tříbodovým ohybem

Hlavními parametry pro porovnání zkušebních vzorků pro zkoušku třibodovým ohybem byly maximální průhyb (dráha příčnicku) a maximální síla před vznikem trhliny. Největší dosažená maximální síla před vznikem trhliny byla zaznamenána u struktury Diamond. Síla dosáhla hodnoty 8190,1 N, při této síle byl maximální průhyb 17,51 mm. U Schwarzovi struktury byla zaznamenána podobně vysoká maximální síla 7866,2 N, ale s výrazně menším průhybem 7,41 mm. Když bychom z grafu porovnali křivky struktury Diamond a Schwarzovy struktury, tak Schwarzova struktura do hodnoty průhybu 7,41 mm, tedy do doby, než došlo ke vzniku trhliny, vykazovala větší odpor vůči ohybovému namáhání než struktura Diamond. U struktury FCC ke vzniku trhliny nedošlo. Namísto toho došlo ke zborcení struktury. Na vynesené křivce FCC struktury dochází od hodnoty průhybu 23,07 mm k nárůstu síly až na hodnotu 5822,1 N a zvýšení odporu materiálu vůči namáhání. To je způsobené opřením stykových destiček vzorku do ohýbacího přípravku. Maximální dosažená síla struktury FCC je 4827,3 N s průhybem 15,71 mm.

## 10.5 Srovnání naměřených výsledků

Podle naměřených výsledků můžeme vyhodnotit, na jaký typ zatížení se hodí jednotlivé struktury. Nejlépe odolávali namáhání struktury Diamond a Schwarzova struktura. Z grafů a tabulek jednotlivých zatížení můžeme říct, že Schwarzova struktura ze všech zkušebních struktur vykazuje největší odolnost vůči namáhání tlakem. Z vynesných křivek Schwarzovi struktury v grafech můžeme poznat, že tato struktura je velmi tuhá a není moc tvárná. Struktura Diamond měla velmi dobré pevnostní vlastnosti při všech třech provedených zkouškách. Při zkouškách tahem a třibodovým ohybem měla nejlepší výsledky. Z tohoto lze rozpoznat, že je ze všech struktur vůči namáhání na tlak, tah a ohyb nejkompexnější z hlediska pevnosti a tvárnosti. Nejhorší pevnostní vlastnosti byly zjištěny u struktury BCC, která se při zatížení tlakem o síle 80 kN celá zborčila a při zatížení tahem dosáhla maximální síly jenom 5766,1 N.

Z hlediska ceny tisku jsou nejlevnější variantou vzorky s co nejmenší hmotností. Například u vzorků na zkoušku tlakem jsou nejlevnější variantou právě vzorky se strukturou BCC a nejdražší variantou vzorky se strukturou Diamond, Gyroid a Schwarzovou strukturou. Pokud by daná aplikace materiálu nevyžadovala veliké pevnostní vlastnosti dala by se použít struktura BCC ke snížení hmotnosti dílu a snížení nákladů výroby.



Obr. 51. Zdeformované zkušební vzorky

## 11 Závěr

V práci jsem vysvětlil problematiku kovového 3D tisku popsáním nejběžnějších metod 3D tisku jako jsou powder bed fusion a direct energy deposition, používaných materiálů a jejich výrobu pomocí atomizace taveniny, hlavních parametrů a strategií tisku, základních technologických pravidel konstrukcí s bližším zaměřením na technologii Powder Bed Fusion, kterou byli tisknuty zkušební vzorky pro experimentální část. V teoretické části jsem se dále zabýval odlehčenými strukturami, kde jsem popsal co jsou odlehčené struktury, jaké mají výhody a jak se z hlediska geometrie buňky rozdělují.

Praktická část práce je zaměřena na zkoušení a porovnání navržených struktur. Jak už bylo výše zmíněno zkušební vzorky struktur byli navrženi v softwaru nTop a vytištěny na zařízení Renishaw AM250 z korozivzdorné oceli AISI 316L. Tyto zkušební vzorky byli následně zkoušeny na tlak, tah a ohyb. Vzhledem k tomu, že zatím neexistuje žádná norma na pevnostní zkoušení mřížkových struktur byli zkušební vzorky testovány zkouškou tlakem, tahem a tříbodovým ohybem. Podle naměřených dat a průběhů křivek vynesných v grafech se zdají být z hlediska pevnostních vlastností nejlepší struktury Diamond a Schwarzova struktura. Z hlediska ceny tisku potom nejlépe vycházejí struktury s nejmenší hmotností. S menším množstvím spotřebovaného materiálu klesá i doba tisku a díky tomu klesají i náklady na výrobu. Použití daných struktur potom záleží na konkrétní aplikaci.

V tomto tématu by se dalo pokračovat v dalších pracích. Na videosekvencích je zřejmé, jak k deformaci dochází pouze na povrchových elementech struktury, ale není jasné, jak se chová struktura uvnitř. Tato problematika by se dala pozorovat například počítačovou tomografií. Vzhledem k tomu, že pracoviště disponuje systémem ARAMIS, bylo by možné zkusit pozorování zkušebního tělesa touto DIC metodou. Dále by bylo možné testovat vzorky z materiálů s jinou jakostí (například z nástrojové oceli), různými tiskovými parametry a analyzovat vliv tiskových parametrů na vlastnosti zkušební vzorku.

## Seznam použité literatury

- [1] SHELLABEAR, M. a O. NYRHILÄ. DMLS – DEVELOPMENT HISTORY AND STATE OF THE ART. In: *DMLS – DEVELOPMENT HISTORY AND STATE OF THE ART* [online]. Erlangen, Germany, 2004, 21.9.2004, s. 12 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/DMLS-DEVELOPMENT-HISTORY-AND-STATE-OF-THE-ART-Shellabear-Nyrhilae/87af24fe907c337cdeacfec11c7cf2c5cd0aff7b#paper-header>
- [2] HERZOG, Dirk et al. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 2016, vol. 117, s. 371-392. ISSN 1359-6454
- [3] PRUSA3D. Naše 3D tiskárny [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/>
- [4] SINGH, Riya, Akash GUPTA, Ojestez TRIPATHI, et al. Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, 26, 3058-3070 [cit. 2020-04-26]. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.635. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785320313900>
- [5] DUDA, Thomas a L. Venkat RAGHAVAN. 3D Metal Printing Technology. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2016, 49(29), 103-110 [cit. 2020-04-26]. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.11.111. ISSN 24058963. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896316325496>
- [6] Design Guide: Direct Metal Laser Sintering (DMLS). *Xometry* [online]. s. 16 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/340051/Design\\_Guides/Xometry\\_DesignGuide\\_DMLS.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/340051/Design_Guides/Xometry_DesignGuide_DMLS.pdf)
- [7] Proces aditivní výroby. [Www.renishaw.cz](http://www.renishaw.cz) [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/renishaw-zvysovani-efektivit-ve-vyrobe-a-zdravotni-peci--1030>
- [8] DAS, Suman, David BOURELL a S.S. BABU. Metallic materials for 3D printing. *MRS Bulletin* [online]. 2016, 41(10), 729-741 [cit. 2020-05-12]. DOI: 10.1557/mrs.2016.217. ISSN 0883-7694. Dostupné z: [http://www.journals.cambridge.org/abstract\\_S0883769416002177](http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0883769416002177)
- [9] Selective Laser Melting. In: *Manufacturing Guide* [online]. b.r. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-melting-slm>



- [10] EBM Hardware. In: Arcam EBM [online]. b.r. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware/>
- [11] Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM). In: Additive Manufacturing [online]. b.r. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-advantages-of-wire-am-vs-powder-am/>
- [12] MILEWSKI, John. Additive manufacturing of metals. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-58204-7.
- [13] HERZOG, Dirk, Vanessa SEYDA, Eric WYCISK a Claus EMMELMANN. Additive manufacturing of metals [online]. Germany: Elsevier, 2016 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645416305158>
- [14] SKOTNICOVÁ, Kateřina. Prášková metalurgie: studijní opory: učební text, scénáře, testy [online]. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2020-05-17]. ISBN 978-80-248-3378-1. Dostupné z: [https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijniopory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/praskovametallurgie/Skotnicova\\_Praskova-metalurgie.pdf](https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijniopory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/praskovametallurgie/Skotnicova_Praskova-metalurgie.pdf)
- [15] Frazier, W.E. J. of Materi Eng and Perform (2014) 23: 1917. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- [16] Available Materials for Metal Additive Manufacturing: Characteristics & Applications. In: Farinia Group [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.farinia.com/additive-manufacturing/3dmaterials/characteristics-and-applications-of-available-metals-for-additivemanufacturing>
- [17] Methods of AM metal Powder production. In: Carpenter Additive [online]. b.r. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.carpenteradditive.com/technical-library/powder-production/>
- [18] 3D-printed lattice structures. In: Www.researchgate.net [online]. [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Schematics-of-a-lattice-structures-b-lattice-reinforced-composite-structures-and-c\\_fig1\\_322924419](https://www.researchgate.net/figure/Schematics-of-a-lattice-structures-b-lattice-reinforced-composite-structures-and-c_fig1_322924419)
- [19] Low Voronoi shelf. In: Http://marc-newson.com [online]. [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <http://marc-newson.com/low-voronoi-shelf/>

- [20] A Mechanical metamaterial with extreme stiffness and strength [online]. California Santa Barbara, 2017 [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <https://briefs.techconnect.org/wp-content/volumes/TCB2017v1/pdf/447.pdf>. Kritická rešerše. University of California Santa Barbara.
- [21] Foam structure with cylindrical struts generated by LV tessellation. In: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net) [online]. [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Foam-structure-with-cylindrical-struts-generated-by-LV-tessellation\\_fig2\\_313815953](https://www.researchgate.net/figure/Foam-structure-with-cylindrical-struts-generated-by-LV-tessellation_fig2_313815953)
- [22] YAP, C. Y. et al. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*. 2015, vol. 2, no. 4, s. 41101. ISSN 1931-9401.
- [23] SAUNDERS, Marc. Design for metal AM - a beginner's guide. LinkedIn [online]. 2017, 31. července 2017 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://www.linkedin.com/pulse/design-metal-am-beginners-guide-marc-saunders/?trk=portfolio\\_article-card\\_title](https://www.linkedin.com/pulse/design-metal-am-beginners-guide-marc-saunders/?trk=portfolio_article-card_title)
- [24] Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS). In: *Crucible* [online]. *Crucible Design*, 2015 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.crucibledesign.co.uk/images/uploaded/guides/bs7000-part-2-a-management-guide-download-original.pdf>
- [25] Design Rules for DMLS. EOS GmbH - Electro Optical Systems [online]. EOS [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [http://www.3dimpuls.com/sites/default/files/download/dmls\\_design-rules\\_en.pdf](http://www.3dimpuls.com/sites/default/files/download/dmls_design-rules_en.pdf)
- [26] Crucible Design Ltd. [online]. Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS). 2015 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.crucibledesign.co.uk/images/uploaded/guides/bs7000-part-2-amanagement-guide-download-original.pdf>
- [27] MACONACHIE, Tobias, Martin LEARY, Bill LOZANOVSKI, Xuezhe ZHANG, Ma QIAN, Omar FARUQUE a Milan BRANDT. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design* [online]. 2019, 183 [cit. 2020-06-11]. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108137. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127519305751>

- [28] RECROSIO, Eole. Optimize your 3D Printed Parts with Lattice Structures. Sculpteo [online]. May 24, 2017 [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/05/24/optimize-your-3d-printed-parts-with-lattice-structures/>
- [29] BHATE, Dhruv, Clint PENICK, Lara FERRY a Christine LEE. Classification and Selection of Cellular Materials in Mechanical Design: Engineering and Biomimetic Approaches. *Designs*. 2019, 3(1). DOI: 10.3390/designs3010019. ISSN 2411-9660. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/2411-9660/3/1/19>
- [30] WHEELER, Andrew. 3D printing: The Renishaw AM250 Additive Manufacturing System. In: *Engineering.com* [online]. 2015 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/10527/The-Renishaw-AM250-Additive-Manufacturing-System.aspx>
- [31] ALLEN, George. *NTopology Modeling Technology* [online] [cit. 2020-06-20] Dostupné z: <https://ntopology.com/resources/whitepaper-ntopology-modeling-technology/>
- [32] AM250. In: *Www.renishaw.cz* [online]. [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/am250--1525>
- [33] Lighter, Righter Objects Through Lattice Structures. In: *Medium* [online]. 2020 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://medium.com/datadriveninvestor/10-ways-artificial-intelligence-is-making-art-better-a59246b09d3f>
- [34] Powder Bed Fusion. In: *Additive Manufacturing Research Group* [online]. Loughborough Leicestershire, UK, 2019 [cit. 2020-07-029]. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>
- [35] Laser beam melting. In: *The 7 main types of additive manufacturing* [online]. [cit. 2020-07-029]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/main-types-additive-manufacturing/>
- [36] Electron beam melting. In: *Manufacturing guide* [online]. [cit. 2020-07-029]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/sv/electron-beam-melting-ebm>
- [37] Laser Metal deposition. In: *Triumph* [online]. [cit. 2020-07-029]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/pouziti/aditivni-vyroba/laser-metal-deposition-lmd/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/aditivni-vyroba/laser-metal-deposition-lmd/)

- [38] Available Materials for Metal Additive Manufacturing: Characteristics & Applications. In: Farinia Group [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.farinia.com/additive-manufacturing/3dmaterials/characteristics-and-applications-of-available-metals-for-additivemanufacturing>
- [39] Lattice structure. In: Materials Today [online]. [cit. 2020-07-029]. Dostupné z: <https://www.materialstoday.com/additive-manufacturing/news/light-consortium-to-present-am-project-findings/>
- [40] HLADKÝ, D. Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení. [online]. [cit. 2020-07-30] Dostupné z: [http://www.pf.jcu.cz/structure/departments/kaft/wpcontent/uploads/Ing\\_Hladky\\_4.pdf](http://www.pf.jcu.cz/structure/departments/kaft/wpcontent/uploads/Ing_Hladky_4.pdf)
- [41] Data sheets - Additive manufacturing: Data sheet: SS 316L-0407 powder for additive manufacturing. RENISHAW [online]. 2020 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/data-sheets-additive-manufacturing--17862>

## Seznam obrázků

Obr. 1. Periodicky se opakující základní buňky [34] .....	- 12 -
Obr. 2. postup vzniku výrobku na 3D tiskárně .....	- 13 -
Obr. 3. metody aditivní výroby [4] .....	- 14 -
Obr. 4. Popis tiskárny PBF [35].....	- 15 -
Obr. 5. Naplnění práškem [7] .....	- 16 -
Obr. 6. Vložení podkladové desky [7].....	- 16 -
Obr. 7. Příprava stavby dílu [7] .....	- 16 -
Obr. 8. Odčerpání vzduchu [7] .....	- 16 -
Obr. 9. Inertní plyn [7].....	- 16 -
Obr. 10. Nanesení vrstvy prášku [7] .....	- 16 -
Obr. 11. Laserové spékání [7].....	- 16 -
Obr. 12. Nanášení dalších vrstev [7].....	- 16 -
Obr. 13. Laser beam melting [36].....	- 17 -
Obr. 14. Electron beam melting [37] .....	- 18 -
Obr. 15. Laser metal deposition [38] .....	- 19 -
Obr. 16. Přehled materiálů tisknuté metodou DMLS [39] .....	- 20 -
Obr. 17. Atomizace taveniny plynem a vodou [14].....	- 21 -
Obr. 18. Strategie typu „Meander“ [24] .....	- 22 -
Obr. 19. Strategie typu „Stripes“ [24].....	- 23 -
Obr. 20. Strategie typu „Chessboard“ [24] .....	- 23 -
Obr. 21. Vzdálenost bodů [24].....	- 24 -
Obr. 22. Samonosné úhly.....	- 25 -
Obr. 23. Díry .....	- 25 -
Obr. 24. Orientace dílu .....	- 26 -
Obr. 25. Lattice structure [40] .....	- 27 -
Obr. 26. Struktura mřížky [28] .....	- 27 -
Obr. 27. Pravidelné 2,5D mřížky [18] .....	- 28 -
Obr. 28. Náhodná 2,5D mřížka [19] .....	- 28 -
Obr. 29. Příhradové struktury [27].....	- 29 -
Obr. 30. Trojnásobně periodické minimální plochy [27] .....	- 30 -
Obr. 31. Deskové struktury [20] .....	- 30 -
Obr. 32. Náhodné pěnové struktury [21] .....	- 30 -

Obr. 33. Smluvní diagram zkoušky tahem u měkké uhlíkové oceli a normalizované tyče [41].....	- 31 -
Obr. 34. Pracovní diagram mechanické zkoušky tlakem [41].....	- 32 -
Obr. 35. Průběh mechanické zkoušky ohybem a schéma zatěžování při zkoušce ohybem [41].....	- 32 -
Obr. 36. Vzorky pro zkoušku tlakem.....	- 34 -
Obr. 37. Vzorky pro zkoušku tahem.....	- 35 -
Obr. 38. Vzorky pro zkoušku ohybem.....	- 35 -
Obr. 39. Zařízení Renishaw AM250 [32].....	- 36 -
Obr. 40. prostředí softwaru nTop [31].....	- 37 -
Obr. 41. LabTest 5.100SP1.....	- 38 -
Obr. 42. Příprava zkoušky tlakem .....	- 39 -
Obr. 43. Průběh zkoušky tlakem.....	- 39 -
Obr. 44. Graf-zkouška tlakem.....	- 41 -
Obr. 45. Příprava zkoušky tahem.....	- 42 -
Obr. 46. Průběh zkoušky tahem.....	- 42 -
Obr. 47. Graf - zkouška tahem.....	- 44 -
Obr. 48. průběh zkoušky třibodovým ohybem .....	- 45 -
Obr. 49. Průběh zkoušky třibodovým ohybem.....	- 45 -
Obr. 51. Graf - zkouška třibodovým ohybem.....	- 46 -
Obr. 52. Zdeformované zkušební vzorky .....	- 48 -

## Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení [viz. Příloha 1] [42] .....	- 33 -
Tab. 2 Mechanické vlastnosti [viz. Příloha 1] [42].....	- 33 -
Tab. 3. Parametry stroje LabTest 5.100SP1 .....	- 38 -
Tab. 4. Naměřené hodnoty – zkouška tlakem.....	- 40 -
Tab. 5. Naměřené hodnoty - zkouška tahem .....	- 43 -
Tab. 7. Naměřené hodnoty - zkouška tříbodovým ohybem.....	- 46 -

## Seznam příloh

Příloha 1 – Materiálový list AISI 316L