

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N 2301 Univerzitní strojírenství  
Studijní zaměření: Katedra technologie obrábění

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vliv změny objemového podílu gyroidní struktury vyrobené z nástrojové oceli technologií DMLS na její únosnost

Autor: **Pavel HANZL**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

Akademický rok 2015/2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel HANZL**

Osobní číslo: **S14N0070P**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**

Název tématu: **Vliv změny objemového podílu gyroidní struktury vyrobené z nástrojové oceli technologií DMLS na její únosnost**

Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh porézních struktur a provedení experimentu
4. Výhodnocení a summarizace dosažených výsledků
5. Závěr

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Mé poděkování patří panu Ing. Miroslavovi Zetkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnoval. Odborným konzultantem byla paní Ing. Ivana Zetková, které tímto děkuji za kvalifikované rady a vstřícné jednání. Dále bych rád poděkovat za spolupráci při experimentálním měření Ing. Josefu Volákovi, Ph.D. a Ing. Janu Kutlwašerovi za odbornou pomoc.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Hanzl	Jméno Pavel	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Strojírenská technologie – technologie obrábění		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Vliv změny objemového podílu gyroidní struktury vyrobené z nástrojové oceli technologií DMLS na její únosnost		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>CELKEM</b>	61	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	46	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Poptávka průmyslů, jako je lékařský, letecký nebo automobilový, nepřímo podněcuje pokrok po lehkých ale zároveň tuhých porézních strukturách a tedy i činnosti v oblasti výzkumu a vývoje. To je hlavní důvod, proč se tento článek zaměřuje na lehkou Schoenovu gyroidní strukturu, která možná nabízí hledanou kombinaci mechanických vlastností, jako je vysoká pevnost doprovázená nízkou hmotností. Cílem práce stanovit vliv změny objemového podílu pevné fáze na dosaženou únosnost gyroidní struktury. K dosažení tohoto cíle bylo však nejdříve nutné popsat vliv účinků, které se mohou podílet na zkreslení výsledků tlakových zkoušek, kterým byly podrobeny navržené tlakové vzorky. Pro zhotovení vzorků z nástrojové oceli byla využita aditivní výroba, která zde uplatňuje své přednosti před ostatními známými technologiemi výroby.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ</b></p>	<p>Schoenův Gyroid, porézní struktury, tuhé konstrukce, aditivní výroba, selective laser melting</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Hanzl	Name Pavel		
<b>FIELD OF STUDY</b>	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO			
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The influence of a volume fraction on load capacity of the gyroid structure made of maraging steel using the DMLS technology			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2016
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	61	<b>TEXT PART</b>	46	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>The quest for light and stiff structures by industries such as the medical industry, the aerospace industry and other industries drives the progress in this technology. This is the reason why the thesis is focused on the light-weight Schoen Gyroid cellular structure, which might offer a combination of the desired mechanical properties. The goal is to determine influence of a volume fraction on load capacity of the gyroid structure. However, at the beginning it was necessary to describe the influence effects that contribute to a distortion of results of pressure tests. Additive manufacturing has a high potential for producing these otherwise hard to make structures.</p>
<b>KEY WORDS</b>	Schoen Gyroid, lattice structures, rigid constructions, additive manufacturing, selective laser melting

## Obsah

1	Úvod .....	12
2	Rozbor současného stavu .....	13
2.1	Dělení porézních struktur .....	13
2.2	Využití aditivní technologie a konvenčních postupů .....	14
2.2.1	Seznámení s DMLS technologií výroby .....	18
2.3	Způsoby predikce chování porézních struktur.....	19
2.3.1	Gibson – Ashbyho model .....	19
2.3.2	Analýza metodou konečných prvků .....	20
2.4	Geometricky definované porézní struktury .....	21
2.4.1	Porézní struktury tvořené jednoduchými geometrickými tělesy .....	21
2.4.2	Porézní struktura definovaná implicitní funkcí .....	23
2.4.3	Fyzikální a mechanické vlastnosti Schoen Gyroid .....	24
2.5	Testovací metodiky porézních struktur .....	28
2.5.1	Tlaková zkouška, zkouška pětčováním [16] .....	29
2.5.2	Zkouška smykem a ohybem .....	31
3	Návrh porézních struktur a provedení experimentu .....	33
3.1	Popis virtuálního modelu [3] .....	33
3.2	Strukturální charakterizace .....	34
3.3	Generování gyroidní buňky .....	35
3.4	Návrh postupu měření .....	37
3.4.1	Výrobní zařízení .....	37
3.4.2	Procesní parametry .....	38
3.4.3	Výrobní materiál .....	39
3.4.4	Zkušební zařízení [33].....	40
3.4.5	Provedení zkoušky .....	40
3.4.6	Předběžný experiment .....	41
3.4.7	Zkušební těleso.....	43
3.4.8	Ověření schopnosti výroby konceptu navrženého zkušební tělesa .....	44
3.5	Hlavní experiment .....	48
3.5.1	1. etapa - Určení rozměrů vzorků.....	48
3.5.2	2. etapa – Vliv tření na experimentálně změřené hodnoty .....	50
3.5.3	3. etapa – Vliv změny objemového podílu na únosnost gyroidní struktury.....	51

4	Vyhodnocení a sumarizace dosažených výsledků.....	52
5	Závěr.....	56
6	Seznam použité literatury .....	58



## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Ukázka aplikace pravidelné porézní struktury [25].....	13
Obrázek 2 - Uzavřená šestiúhelníková včelí pláštěv; částečně otevřená prizmatická konstrukce [24] .....	15
Obrázek 3 - Uzavřená šestiúhelníková včelí pláštěv; částečně otevřená prizmatická konstrukce [24] .....	15
Obrázek 4 - Reálný produkt pravidelné porézní struktury vyrobené konvenčním způsobem s relativní hustotou 4,6%; (a) půdorys (b) pohled z boku (c) pohled z perspektivy (d) detail spojení [8].....	16
Obrázek 5 - Ukázka možností lití slitiny stříbra na vytavitelné jádro[26] .....	17
Obrázek 6 - Schéma rozprašování plynem [37] .....	19
Obrázek 7 - Zrekonstruovaná kovová pěna počítačovou tomografií [28].....	21
Obrázek 8 - Ukázka obvyklých geometrií porézních struktur: (a) BCC (b) BCCz (c) FCC (d) PFCC (e) F2BCC [11].....	22
Obrázek 9 - Ukázka struktur tvořené implicitní funkcí; a) Schoen Gyroid; b) SchwartzDiamond [3] .....	23
Obrázek 10 - Závislost mezi objemovým podílem a proměnnou $ t $ [2].....	24
Obrázek 11 - Gyroidní struktury; a) velikost buňky 2 mm; b) velikost buňky 8 mm [3] .....	24
Obrázek 12 - Vlevo: Nejvhodnější orientace ( $45^\circ$ ); Vpravo: Nejhorší orientace ( $0^\circ$ ) [6] .....	25
Obrázek 13 - Šíře průřezů vzpěr a jejich shoda s modelovou předlohou [6].....	25
Obrázek 14 - (a) náhled na spečený povrch; (b) schodišťový efekt a oblasti ulpívání zrněk výrobního prášku [6] .....	26
Obrázek 15 - (a) Vizualizace rozložení deformační energie (b) Youngův modul vypočtený z FEA pro Gyroid [1] .....	26
Obrázek 16 - Vliv orientace tisku na mechanické chování v tlaku, relativní hustota 15%, velikost buňky 5 mm, materiál nerezová ocel 316L [6].....	27
Obrázek 17 - Mez kluzu v tlaku zkušební sady vzorků [6].....	27
Obrázek 18 - Pevnost v tlaku pro jednotlivé velikosti buněčných struktur a objemových podílů pevné fáze[4] .....	28
Obrázek 19 - Smluvní a pracovní diagram tahové a tlakové zkoušky [19] .....	30
Obrázek 20 - Koncept vzorku pro zkoušku smykem; (a) dle ASTM C-273(b) dle ASTM E8-96a [3] .....	31
Obrázek 21 - Provedení zkoušky ohybem [13].....	32
Obrázek 22 - Hranice buňky, jež obsazuje Gyroid v prostoru .....	34
Obrázek 23 - Náhled na vytvořený program .....	35
Obrázek 24 - Závislost parametru $ t $ na objemovém podílu.....	36
Obrázek 25 - Výrobní zařízení EOS M 290 .....	38

Obrázek 26 - SEM snímek výrobního prášku EOS MaragingSteel MS1 .....	39
Obrázek 27 - Zkušební stroj Zwick/Roell Z250 [38] .....	40
Obrázek 28 - Platforma s testovacími vzorky před vyndáním z operačního prostoru 3D tiskárny .....	41
Obrázek 29 - Vzorek s 9,5 % objemovým podílem .....	42
Obrázek 30 - Předběžné výsledky tlakových zkoušek .....	42
Obrázek 31 - Předběžné výsledky tlakových zkoušek .....	43
Obrázek 32 - (a) Detail na narušenou samonosnou vlastnost (b) Detail na obnovenou samonosnou vlastnost.....	43
Obrázek 33 - Náhled z perspektivy na testovací vzorek .....	44
Obrázek 34 - Orientace zkušebních vzorků .....	45
Obrázek 35 - Výroba vrchního plátu u svislého vzorku.....	46
Obrázek 36 - Defekt nakloněného vzorku s velikostí buňky 5 mm .....	46
Obrázek 37 - Nakloněný vzorek s velikostí buňky 3 mm .....	47
Obrázek 38 - Vzorek vyrobený v horizontální poloze .....	47
Obrázek 39 - Testovací sada s rozdílnou velikostí matrice.....	48
Obrázek 40 - Dvojice vzorků ve velikosti 3x3x3 a s přerušenými přebývajícými uzly prutů..	49
Obrázek 41 - Závislost velikosti matrice vzorku na mez kluzu .....	49
Obrázek 42 - Vliv třecích podmínek na maximální únosnost.....	50
Obrázek 43 - Změna tloušťky vzpěr v závislosti na objemovém podílu pevné fáze .....	51
Obrázek 44 - Průběh deformačních křivek v závislosti na objemovém podílu.....	51
Obrázek 45- Pracovní diagram tlakové zkoušky: a) Síla/Stlačení ; b) Napětí/Poměrné stlačení .....	53
Obrázek 46 - Průběh deformace porézní struktury při stlačení: a) 0mm; b) 2 mm; c) 4 mm; d) 6 mm.....	54
Obrázek 47 - Únosnost vzorků v závislosti na změně objemového podílu.....	54
Obrázek 48 - Závislost mezi relativní únosností a objemovým podílem pevné fáze.....	55

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Matematické zákonitosti vyjádření mechanických vlastností [13].....	20
Tabulka 2 - Řada vygenerovaných jednotek gyroidů.....	36
Tabulka 3 - Specifika výrobního zařízení EOS M 290 [30] .....	38
Tabulka 4 - Chemické složení EOS Maragingsteel MS1[31].....	39
Tabulka 5 - Únosnost gyroidní struktury v závislosti na změnu objemového podílu pevné fáze .....	55

## Seznam symbolů a zkratek

AM – Additive Manufacturing

EOS – Electro Optical Systems

SLM – Selective Laser Melting

FDM – Fused Deposition Modeling

DMLS – Direct Metal Laser Sintering

CAD – Computer aided design

STL – Standard Tessellation Language nebo Stereolithography

SW – Software

NURBs – Non-Uniform B-spline

SEM – Scanning Electron Microscope

FEM – Finite Element Method

CT – Computed Tomography

BCC–Body Centered Cubic Unit Cell

FCC–Face Centered Cubic Unit Cell

PFCC –Perpendicular Face Centered Cubic Unit Cell

## 1 Úvod

Porézní struktury lze chápat jako pevnou fázi s dutinami, jejichž mechanické vlastnosti závisí především na vlastnostech materiálu, ze kterého jsou vyrobeny, a na topologii definující strukturu, do níž spadá geometrie a relativní hustota. Tyto funkční porézní materiály, které mají zvláštní nativní vlastnosti požadované pro různé moderní aplikace, mohou propůjčovat výrobkům nezvyklou kombinaci užitečných vlastností, jako je vysoká pevnost, tuhost doprovázená relativně nízkou hmotností a dobrou absorpcí energií. Proto se kovové pravidelné porézní struktury staly široce rozšířenými v lehkých konstrukcích a jejich nasazení se s výhodami uplatňuje v biomedicíně, leteckém a automobilovém průmyslu.

Snaha včlenit porézní struktury do návrhu dílu je motivována touhou po zvýšení přidané hodnoty výrobku a snížení potřeby nasazení drahých materiálů, které často mají i obtížnou obrobiteľnost. Z těchto důvodů v posledních letech některé oblasti strojírenství nahrazují koncepci dílů z plných materiálů lehkými porézními strukturami. Zájem o porézní struktury stále roste. [3]

Na výrobu těchto porézních materiálů je často nasazována aditivní technologie, která poskytuje návrháři volnost během návrhu geometrie dílu či porézní struktury. Aditivní technologie zjednodušuje fyzickou výrobu takovýchto dílů a je často jedinou metodou výroby, kterou mohou být tyto výkonné díly vyrobeny.[3]

Proto se tento článek zaměřuje na speciální druh pravidelné porézní struktury ve spojení s aditivní metodou výroby. Tato specifická struktura nese název po svém objeviteli Schoenovi, je jí Schoenova gyroidní struktura, které se v zahraniční literatuře věnovala nemalá pozornost. Hlavním cílem diplomové práce je ověřit její funkční vlastnosti z pohledu maximální možné únosnosti v závislosti na změně objemového podílu pevné fáze. Tyto charakteristiky je potřeba znát pro správné začlenění zkoumané porézní struktury do konceptu dílu, který má plnit specifické požadavky na tuhost a pevnost.

Pro samotnou výrobu vzorků, byla využita pokročilá výrobní technologie 3D tisku z nástrojové oceli 1.2709 dle evropské klasifikace, jež spadá do technologií označovaných pod souhrnným pojmem Additive Manufacturing (AM), v přímém překladu aditivní výroba. Přesný název použité technologie je Direct Metal Laser Sintering (DMLS), která je licencovaná společností EOS GmbH (Electro Optical Systems).

## 2 Rozbor současného stavu

### 2.1 Dělení porézních struktur

Porézní struktury se rozdělují podle různých kritérií. Avšak jako hlavní parametr třídění se běžně uvádí, zda se jedná o porézní struktury geometricky definované nebo geometricky nedefinované. Dalším možným kritériem je dle otevřenosti či uzavřenosti topologie struktur. Uzavřené struktury se vyznačují tím, že obsažené dutiny jsou zcela neprůchozí. Naopak otevřené struktury mají dutiny, které jsou vzájemně propojeny, a proto je umožněn průtok tekutin přes jejich masu.

#### *Geometricky definovaná porézní struktura*

Geometricky definovaná porézní struktura je přesně daná podle předlohy, kterou je v mnoha případech CAD model, jehož přesnou podobu určil konstruktér. Tato skupina porézních materiálů se dále může rozlišovat dle typu matrice, která udává umístění řady základních jednotek struktur v prostoru. Nejběžnější formou matrice je kubická, ale existují i matrice kruhové. Avšak tato práce bere v potaz pouze struktury založené na kubické mřížce, které jsou označovány pojmem periodické buněčné struktury s kubickou mřížkou. [2] [3]

Na obrázku 1 je znázorněná aplikace geometricky definovaných struktur, kde optimalizace dílce poskytla úsporu hmotnosti při dostatečné tuhosti. Jedna z cenných vlastností geometricky daných struktur je, že mají dané mechanické vlastnosti, které jim vytyčil konstruktér během návrhu. Proto lze snadno přizpůsobovat topologii buněk potřebám aplikace.



*Obrázek 1 - Ukázka aplikace pravidelné porézní struktury [25]*

#### *Geometricky nedefinovaná porézní struktura*

Těž označovány jako stochastické pórovité struktury, mají náhodnou distribuci otevřených a uzavřených dutin. Zde hrají hlavní roli fyzikálně-chemicko-mechanické vlivy, které se mohou označit do určité míry za nahodilé nebo chaotické. Jsou tedy přímým opakem definovaných struktur.

Poměrně pravidelného rozložení pórů je docíleno u pěnových struktur se sférickými dutinami, které jsou nazývány syntaktické pěny (syntactic foams). Tyto struktury taktéž mohou

absorbovat značné množství tepelné energie, mají velmi malou relativní hustotu a jsou výbornými zvukovými izolanty. Hlavní nevýhodou je nedostatek nebo naprostá absence možnosti navržení rozložení topologie těchto struktur. [7]

V roce 2001 existovalo celkem 9 metod výroby kovových pěn, přičemž pouze 5 z nich bylo komerčně dostupných. Nicméně dalším způsobem výroby stochastické hmoty je změna vstupních procesních parametrů při aditivní výrobě jako je výkon laseru, rychlost paprsku nebo výška tavené vrstvy. Všechny tyto parametry se podílejí během aditivní výroby na množství dodané energie jednotce plochy či objemu výrobního prášku. Proto tyto parametry ovlivňují tavné podmínky výrobního prášku během procesu spékání vrstvy. Empirický vztah pro výpočet dodané energie ploše výrobního prášku je obsažen ve vzorci 1. Zahrnutím šrafovací rozteče se formule vzorce rozšíří a dodaná energie je vztažena k jednotce objemu výrobního prášku (viz vzorec 2).

$$E \left[ \frac{J}{\text{mm}^2} \right] = \frac{\text{Výkon laseru [W]}}{\text{Rychlost} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] \cdot \text{Výška vrstvy [mm]}} \quad (1)$$

$$E \left[ \frac{J}{\text{mm}^3} \right] = \frac{\text{Výkon laseru [W]}}{\text{Rychlost} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] \cdot \text{Šrafovací Rozteč [mm]} \cdot \text{Výška vrstvy [mm]}} \quad (2)$$

Avšak těmito strukturami se tato práce nezaobírá, nicméně závěry zdrojů [15] a [10] odhalily, že pravidelné buněčné struktury se správně navrženou geometrií buněk vykazují lepší profil mechanických vlastností než je tomu u stochastických analogů se stejnou pórovitostí. Například strukturální výkon u pravidelné struktury s objemovým podílem 5% se ukázala být až třikrát vyšší než u stochastických pěn. Tato výrazná změna závisí na skutečnosti, že vzpěry pravidelných struktur mohou být vystaveny pouze tlakovým nebo tahovým účinkům při zatěžování v jednom směru, zatímco ve stochastických strukturách zlepšení mechanických vlastností závisí na síle a rozložení stěn mezi sférickými dutinami, které jsou vystaveny i ohybovým účinkům. [7] V současné době se ale pravidelné struktury potýkají s výrazně vyššími náklady a výrobní náročností, než je tomu u stochastických struktur. [4]

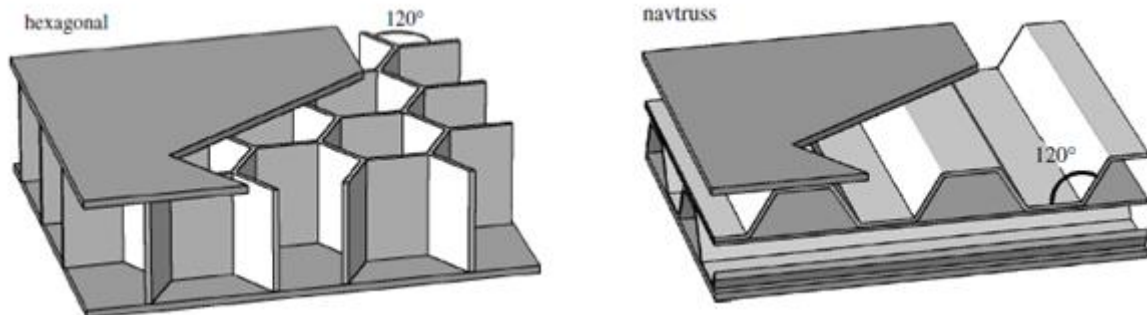
## 2.2 Využití aditivní technologie a konvenčních postupů

Topologie pravidelných buněčných struktur s příhradovými nosníky mohou být vyrobeny řadou výrobních metod, které zahrnují technologie lití na vytavitelný model, anebo technologie skrývající se souhrnně pod pojmem deformační tváření<sup>1</sup>, které se uplatňují nejen při výrobě těchto složitých otevřených topologií, ale také u jednodušších uzavřených voštinových a prizmatických struktur. [3]

Do deformačního tváření je zahrnuta technologie, která skládáním profilů plechů tvoří uzavřené, nebo částečně otevřené konstrukce. Jako ukázka uzavřené topologie může posloužit šestiúhelníková voštinová plástev, která je vyobrazena na Obrázek 2 (vlevo). Obecně jsou tyto jednoduché struktury složeny z desek nebo tenkých plechů, které jsou „naohýbány“ podle zvolené topologie buněk, které se opakují ve dvou směrech, tudíž se jedná o typický příklad 2 dimenzionálně se opakující struktury. Různým vrstvením a natočením jednotlivých vrstev

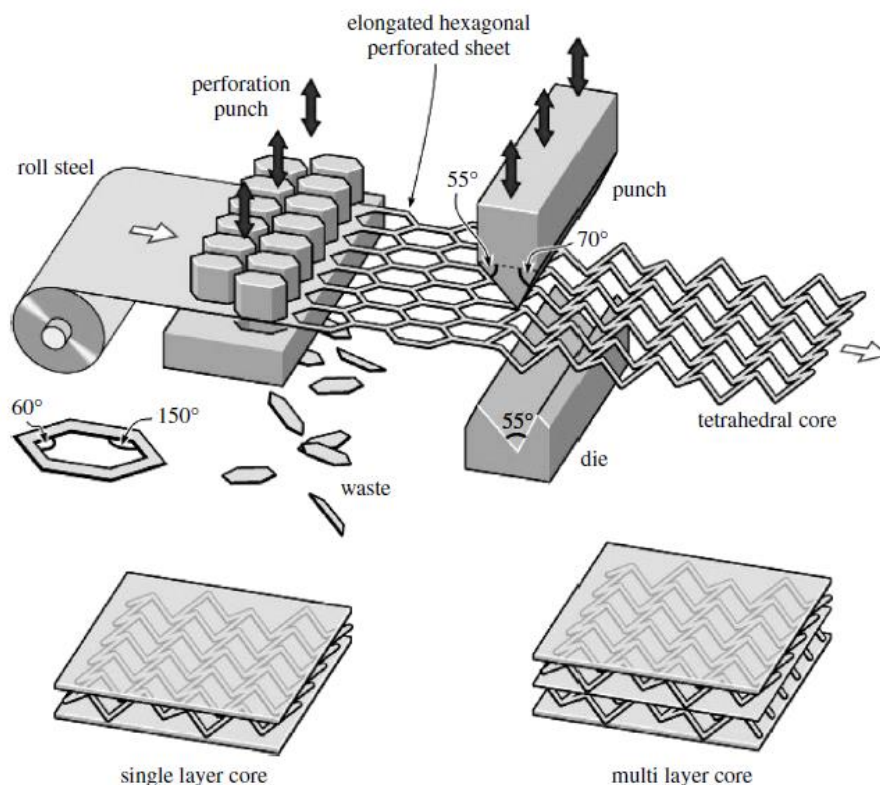
<sup>1</sup> Přeloženo z cizojazyčného výrazu „deformation forming“.

vůči sobě mohou vznikat vždy jen částečně otevřené prizmatické konstrukce (viz Obrázek 2 vpravo) a je pravidlem, že takto vytvořené konstrukce mají značně anizotropní chování. [24]

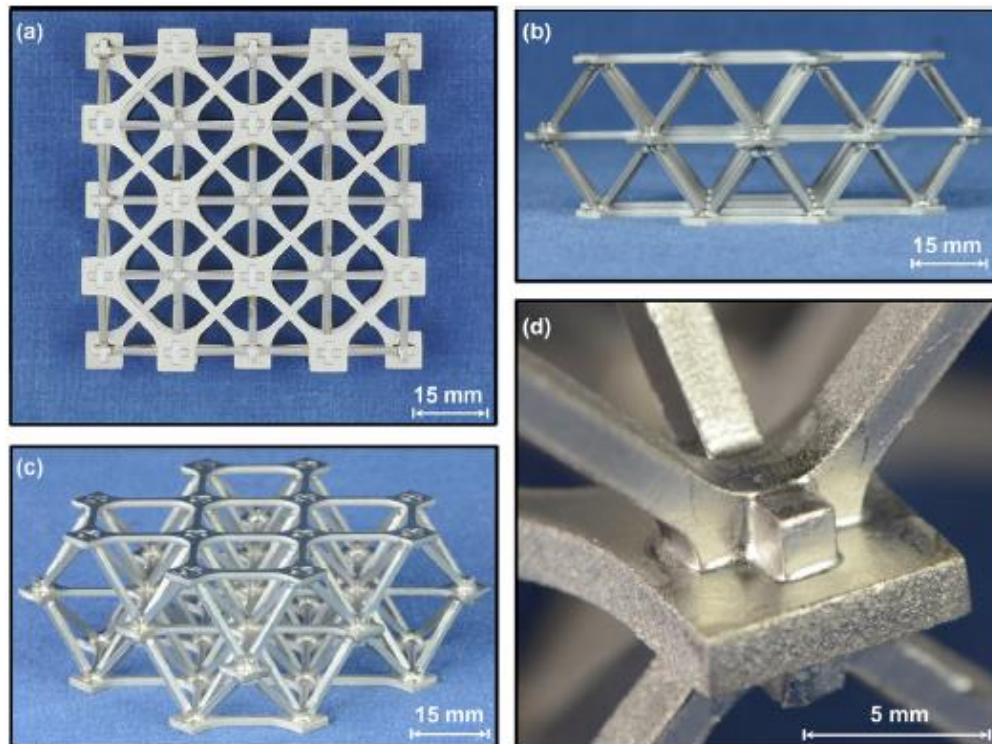


**Obrázek 2 - Uzavřená šestiúhelníková včelí plástev; částečně otevřená prizmatická konstrukce [24]**

Naopak pokud se do technologie výroby zařadí perforace, můžou již vznikat plně otevřené příhradové topologie. Perforace může být vytvořena střížnými raznicemi, výřezem laserem nebo vodním paprskem. Ilustrativní představu o výrobě může poskytnout Obrázek 3. Ukázka reálné pravidelné buněčné topologie je na Obrázek 4, na kterém je vyobrazena porézní struktura, jenž byla vyrobena z výpalků plátu z titanové slitiny bez přídavného ohýbání či tvarování. [24]



**Obrázek 3 - Uzavřená šestiúhelníková včelí plástev; částečně otevřená prizmatická konstrukce [24]**



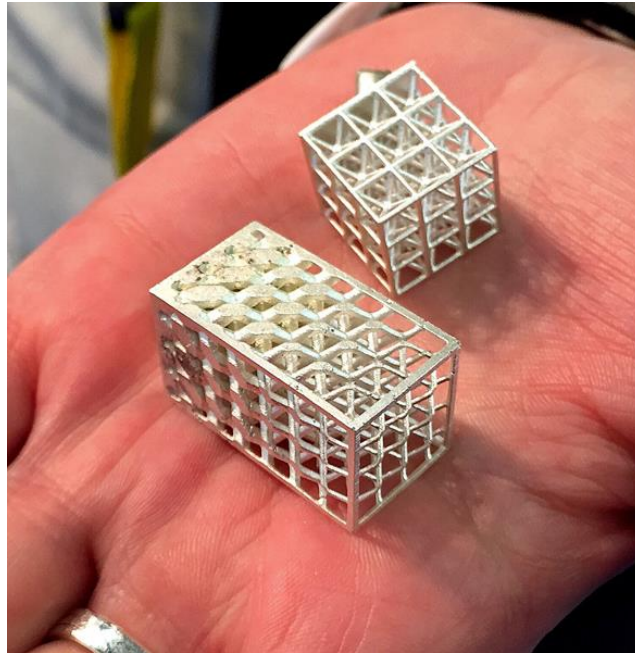
**Obrázek 4 - Reálný produkt pravidelné porézní struktury vyrobené konvenčním způsobem s relativní hustotou 4,6%; (a) půdorys (b) pohled z boku (c) pohled z perspektivy (d) detail spojení [8]**

Všechny metody deformačního tváření vyžadují dodatečnou montáž, lepení či pájení, aby mohly vzniknout celky buněčných příhradových struktur. Na Obrázek 4d je detail spojení, které vzniklo vakuovým pájením. Navíc technologie, které jsou založeny na perforaci, produkují velké množství odpadu a mají značně omezené schopnosti vyrábět složité tvary. Z těchto důvodů jsou i možnosti geometrie a velikosti buněk omezené a začlenění takto vyrobených struktur do koncepce dílů, které by tak získaly na efektivitě, je velmi omezené. V praxi se technologie deformačního tváření uplatnila zejména u nosných sendvičových panelů, kvůli jejich tuhosti a úspoře materiálů. V energetice našly uplatnění voštinové struktury například jako usměrňovače toku kapalin. Obecně vykazují stejné vlastnosti jako porézní struktury jiných technologií až na zhoršenou izotropii mechanických vlastností, vycházející z povahy výroby a možností spojovacích technik. [24]

Lití na vytavitelný model je další metodou výroby, která začíná vytvořením voskové nebo polymerové šablony topologie struktury. Šablony s nižší výškou a jednodušší geometrií, které mohou být například určeny pro jádra nosných panelů, mohou být vyrobené injekčním vstřikováním (injection molding). Zatímco pro výrobu komplexnějších struktur se již nasazuje aditivní technologie jako je Fused Deposition Modeling (FDM). Jedná se o proces, který tiskne díly z termoplastických materiálů. K licí šabloně je potom přidána nutná přívodní soustava, která obstará přívod taveniny kovu. Šablona je poté pokryta keramickou skořepinou, z které se prohřátím odstraní materiál šablony, a poté je prázdná skořepina vylita taveninou kovu. Po zchladnutí kovu je skořepina rozbita a je vyjmut odlitek, z kterého se začištěním stává výrobek. V zásadě platí, že touto technologií mohou být vyrobeny velmi složité struktury o hmotnostech do několika set kilogramů, avšak s relativně vysokou relativní hustotou, uvádí se více jak 5%, protože při nižší relativní hustotě se stávají malé průřezy



nosníků velmi problematické pro technologii lití. I když byla již touto technologií vyrobena řada struktur z tzv. superslitin, doporučuje se nasazení slévárenských slitin s dobrou zabíhavostí. [24]



*Obrázek 5 - Ukázka možnosti lití slitiny stříbra na vytavitelné jádro[26]*

Dalším způsobem jak tyto struktury vyrobit je za použití technologie aditivní výroby (AM) z kovu, která může zlepšovat mechanickou výkonnost komponent, protože ty jsou tak méně omezovány limity danými tradičními technikami. Aditivní výroba zahrnuje pokročilé výrobní technologie, které umožňují přímo vyrábět složité kovové díly podle počítačové předlohy bez použití mnohdy velmi drahých nástrojů, jako jsou zápustky, formy, raznice, nebo řezné nástroje. Je však třeba brát zřetel na možné překážky spojené s AM, protože některé geometrie vyžadují nasazení podpěrných struktur, které mají nepříznivý vliv na povrch a náročnost dodatečných úprav. Jelikož v některých případech, kdy je geometrie komponenty velmi složitá, jdou těžce odstranit. Nosné nebo také podpěrné struktury se používají ke strukturální integritě stavěného dílu, protože je vystaven tepelnému namáhání během výroby. Vhodná orientace může nutnost použití nosných struktur eliminovat nebo aspoň částečně zmírnit. To je velmi prospěšné, když se aditivní výroba používá k výrobě dílů s vestavěnými porézními strukturami, protože odstranění nosných struktur z porézních konstrukcí s omezenou přístupností je nepraktické. [11]

S ohledem na výše zmíněné omezení se přesto dá s jistotou tvrdit, že tato technologie je bezkonkurenční ve schopnosti produkovat dílce s téměř nulovým geometrickým omezením. Avšak kvůli výrobní povaze AM nelze doporučit výrobu uzavřených porézních struktur kvůli skutečnosti, že by nebylo možné vysypat ze struktur nespečený výrobní prášek.

Spojení aditivní výroby a porézních struktur může mít v důsledku pozitivní vliv na výsledný produkt, který je hospodárněji vyroben, protože je zkrácen čas výroby, jsou ušetřeny drahé materiály, licí formy nebo vynaložené výrobní energie. Proto nasazení AM představuje efektivní přístup k navrhování a výrobě pravidelných porézních struktur a není divu, že jsou v současné době vynaloženy značné finanční prostředky na vývoj a výzkum pravidelných struktur s přizpůsobenými vlastnostmi. [3]

### 2.2.1 Seznámení s DMLS technologií výroby

DMLS je aditivní technologie německé společnosti EOS. Vstupním materiálem pro samotnou výrobu je kovový prášek, který je rovnoměrně nanášen pomocí pravítka<sup>2</sup> po tenkých vrstvách při obvyklé tloušťce 20-80  $\mu\text{m}$  na stavěcí platformu stroje. Pravítko může být vyrobeno buď z oceli nebo keramiky a pro výrobní prášek EOS MaragingSteel MS1 se standardně používá keramické. Po nanesení je prášek vystaven energetickému paprsku, který jej speče do tvaru průřezu výrobku, který byl vygenerován z příčných řezů CAD modelu vždy pro konkrétní vrstvu. V dalším kroku se posune stavební platforma o velikost jedné vrstvy dolů a nanese se nová tenká vrstva prášku, která je znovu vystavena paprsku a spečena v místech průřezu výrobku. Tento postup se opakuje tak, že každá následná spečená vrstva se přitavuje během procesu k předchozí vrstvě. Tímto způsobem je vytvořen požadovaný výrobek s určitou přesností, která je závislou proměnnou mnoha vstupních parametrů.

Více o problematice vlivu procesních parametrů na mechanické charakteristiky spečených kovových výrobků se lze dočíst v bakalářské práci *Využití metody spékání kovových prášků laserem pro konstrukci řezných nástrojů*, která byla publikována v roce 2014 týměž autorem jako tato diplomová práce.

#### ***Výroba prášku z vysokopevnostní oceli 1.2709 dle evropské normy [37]***

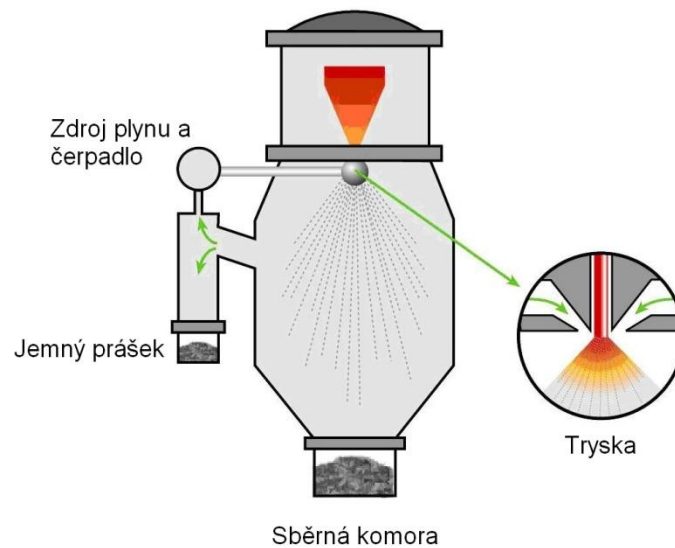
Podle dostupných informací dodavatel EOS nabízí pod obchodním označením EOS MaragingSteel MS1 výrobní prášek z materiálu 1.2709 (Wr.Nr.), který je vyráběn metodou gas atomization process (rozprašování plynem), kdy je proud roztaveného kovu rozprašen do malých kovových kapiček pomocí vysokotlakého inertního proudu dusíku nebo argonu. Tyto kapičky po rychlém ztuhnutí tvoří malé kovové částice výrobního prášku.

Rozprašování plynem - Gas atomization (Obrázek 6) je fyzikální metoda (na rozdíl od chemické nebo mechanické metody), která je podobná metodě rozprašování vodou (water atomization). Nicméně prášky vyrobené rozprašování plynem mají kulovitý tvar, což je velmi prospěšné pro zabíhání a vyplňování prázdných mezer v prášku. Zatímco prášky vyrobené rozprašování vodou mají nepravidelný tvar. Proto je atomizace plynem nejběžnější metodou výroby, která:

- zajišťuje kulovitý tvar částic prášku,
- zajišťuje dobrou hustotu prášku, kvůli kulovitému tvaru a diferencí velikostí částic (v prášku jsou rozdílné průměry částic, ty tak dobře vyplňují prostor),
- zajišťuje dobrou opakovatelnost zrnitosti prášku,
- umožňuje výrobu výrobních prášků z různých slitin.

---

<sup>2</sup> Též označován jako recoater.



Obrázek 6 - Schéma rozprašování plynem [37]

## 2.3 Způsoby predikce chování porézních struktur

### 2.3.1 Gibson – Ashbyho model

Mechanické vlastnosti porézních materiálů jsou do značné míry určeny charakteristikami pórů –jmenovitě jejich velikostí, objemovým podílem a tvarem, protože ty určují velikost a mohutnost nosných prvků. [12] S velmi zajímavým postupem předpovědi mechanických vlastností přišli Gibson a Ashby [13], kteří vyvinuli matematický model popisu těchto charakteristik pro kovové pěny s různou relativní hustotou na základě jejich fyzikálních vlastností. Matematický model zahrnuje následující parametry: relativní hustotu, povaha pórovitosti (otevřená nebo uzavřená) a materiálové vlastnosti použitého kovu. Ukázka možných matematických zákonitostí pro řadu mechanických veličin je uvedena v tabulce 1. V této publikaci jsou také uvedeny mechanické charakteristiky kovových pěn, které byly vyrobeny v té době dostupnými technologiemi.

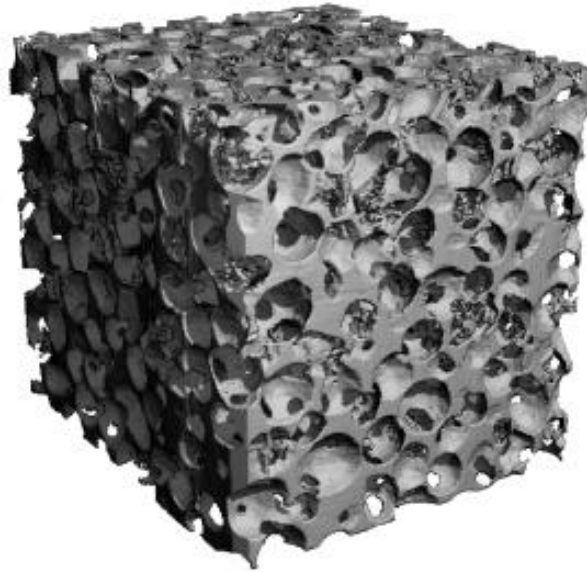
Pro geometricky nedefinované porézní materiály, jako jsou pěnové materiály, je tato metoda predikce stále zajímavá, protože geometrie pěn je víceméně náhodná. Nicméně se potvrdilo, že tato metoda predikce chování v zátěži u pravidelných porézních struktur nenabízí zcela přesné výsledky v porovnání s FEM analýzami.

**Tabulka 1 - Matematické zákonitosti vyjádření mechanických vlastností [13]**

Mechanické vlastnosti Otevřené buňky		Uzavřené buňky
Youngův modul (GPa), $E$	$E = (0.1-4)E_s \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2$	$E = (0.1-1.0)E_s \times \left[0.5 \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 + 0.3 \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)\right]$
Modul pružnosti ve smyku (GPa), $G$	$G \approx \frac{3}{8}E$	$G \approx \frac{3}{8}E$
Modul objemové pružnosti (GPa), $K$	$K \approx 1.1E$	$K \approx 1.1E$
Modul pevnost v ohybu (GPa), $E_f$	$E_f \approx E$	$E_f \approx E$
Poissonovo číslo $\nu$	0.32–0.34	0.32–0.34
Pevnost v tlaku (MPa), $\sigma_c$	$\sigma_c = (0.1-1.0)\sigma_{c,s} \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{3/2}$	$\sigma_c = (0.1-1.0)\sigma_{c,s} \times \left[0.5 \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{2/3} + 0.3 \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)\right]$
Pevnost v tahu (MPa), $\sigma_t$	$\sigma_t \approx (1.1-1.4)\sigma_c$	$\sigma_t \approx (1.1-1.4)\sigma_c$
Mez únavy (MPa), $\sigma_e$	$\sigma_e \approx (0.5-0.75)\sigma_c$	$\sigma_e \approx (0.5-0.75)\sigma_c$

### 2.3.2 Analýza metodou konečných prvků

Další možností predikce je již zmiňovaná numerická analýza metodou konečných prvků (FEM), což je technika založená na řešení parciálních diferenciálních rovnic. Metoda rozkládá složité úlohy na menší části, tzv. konečné prvky, a nabízí velmi přesnou metodu určení chování fyzikálně specifikovaných těles vystavených vnějším podmínkám, kterými mohou být silové účinky, vibrace a další fyzikální jevy. Nicméně v běžné praxi zprvu nemusí být známé přesné rozvržení hmoty uvnitř zkoumaného tělesa, jako jsou kosti lidí nebo kovové pěny s uzavřenými buňkami. Takovýmto analýzám obvykle předchází kvantifikace 3D geometrie, jednou z možností je využití technologie X-ray počítačové tomografie (CT), která poskytuje trojrozměrnou představu o rozložení a tvaru povrchů uvnitř uzavřených a nedostupných míst v nitru zkoumaných těles. Na Obrázek 7 je zrekonstruovaná geometrie ukázkové kovové pěny počítačovou X-ray tomografií. Avšak pravidelné porézní struktury často vycházejí z počítačového modelu, proto je jejich geometrie známá a mohou tak být podrobeny FEM analýze bez nasazení počítačové tomografie. Výhoda této techniky předpovědi tkví v její shodě se skutečným chováním mechanického dílu za předpokladu, že byly správně zadány materiálové konstanty a okrajové podmínky. Nevýhodou je vyšší cenová náročnost analýzy. [12] [27]



*Obrázek 7 - Zrekonstruovaná kovová pěna počítačovou tomografií [28]*

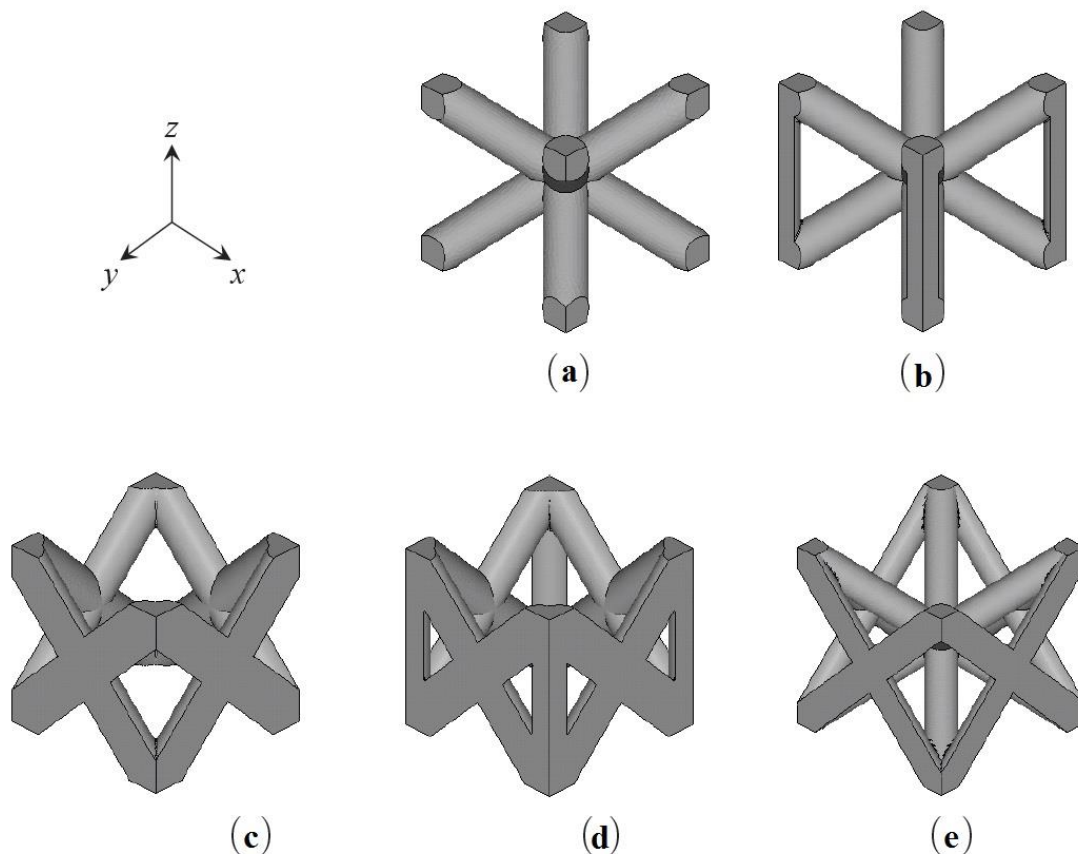
## **2.4 Geometricky definované porézní struktury**

Pravidelné porézní struktury, jak jsou taktéž označovány, mohou být vyrobené ze široké škály mikro-geometrií v různých měřítkách. Těmto porézním materiálům je věnována pozornost v aplikačních oblastech po dobu několika desetiletí, kvůli jejich jedinečným vlastnostem a byla objevena řada článků věnovaných tomuto tématu, ve kterých se zjišťují ať mechanické nebo fyzikální základní charakteristiky nejrůznějších navržených pravidelných struktur. Vlastnosti jsou dané geometrií struktury a materiálem výrobního prášku, z kterého jsou postaveny. Periodické struktury se vyznačují tím, že jejich základní stavební jednotkou je takzvaná buňka, která se v případě kubické mřížky opakuje v prostoru po vhodném mřížkovém parametru. [15]

### **2.4.1 Porézní struktury tvořené jednoduchými geometrickými tělesy**

Základní buňky těchto struktur jsou tvořeny jednoduchými geometrickými tělesy, která jsou tvořena kvádry, krychlemi, válci a koulemi. Případné hrany těles jsou zaobleny. Obecně tyto geometrie jdou velice dobře navrhnout v CAD prostředí.

Na Obrázek 8 je ilustrativní přehled geometricky relativně jednoduchých pravidelných porézních struktur, které jsou jedny z nejpoužívanějších geometrií v případě výroby aditivních technologií.



**Obrázek 8 - Ukázka obvyklých geometrií porézních struktur: (a) BCC (b) BCCz (c) FCC (d) PFCC (e) F2BCC [11]**

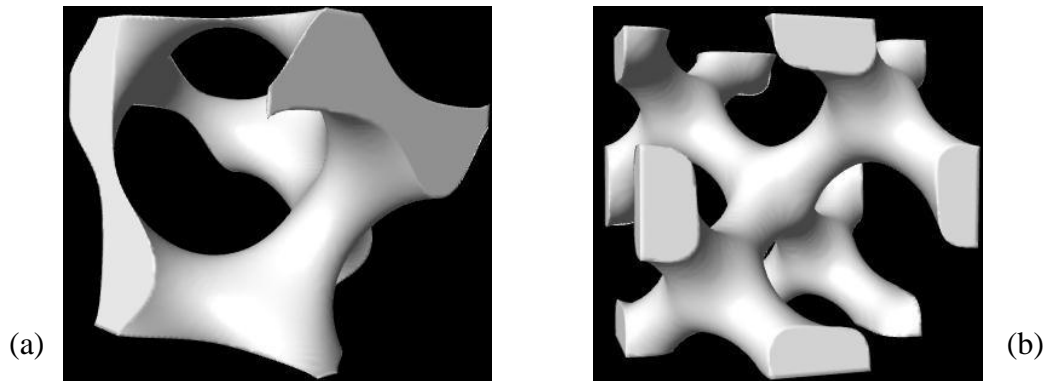
Body Centered Cubic Unit Cell (Lattice) - Prostorově středěná krychlová buňka (mřížka) vyobrazená na obrázku 4a) má 4 vzpěry, které začínají a končí ve vrcholových bodech kubického prostoru buňky. Všechny 4 vzpěry se sbíhají do centra. BCCz je varianta BCC, u které byla v ose z zvýšena tuhost přidáním vzpěr mezi krajní rohy buňky (viz obr. 4b). [17]

Face Centered Cubic Unit Cell (Lattice) – Plošně středěná krychlová buňka (mřížka) obsahuje pouze stěnové úhlopříčky krychle (obr. 4c) a přidáním vzpěr mezi krajní rohy, podobně jako v případě BCCz, vznikla varianta PFCC (obr.4d). Konečně F<sub>2</sub>BCC je booleovskou kombinací BCC a FCC, tato geometrie je na obrázku 4e.

Ze zhodnocení typů těchto struktur zdrojem [11] vyplývá, že pro konstrukční aplikace, kde je komponenta namáhána tlakovým zatížením v jedné ose, jsou nejvhodnější topologie FCC a PFCC, které nabízejí vyšší výkon než ostatní typy. Podobnému závěru dospěli [7]. Je však běžné, že komponenty jsou častěji namáhány ve více osách. V tomto případě [11] doporučuje nasadit geometrie vycházející z gyroidní struktury, která se jevila v této oblasti jako nejvýkonnější konstrukce, protože dosahovala nejvyšší, přibližně vyrovnané tuhosti a nejnižšího napětí podél všech tří os, jmenovitě v osách x, y, z.

### 2.4.2 Porézní struktura definovaná implicitní funkcí

Poněkud složitější porézní struktury mají geometrii tvořenou ze složitě zakřivených ploch. Může se jednat o plochy, které jsou popsány implicitní matematickou funkcí. Jako příkladem může posloužit Schoenův Gyroid a Schwartz Diamond, které jsou k vidění na Obrázek 9.



Obrázek 9 - Ukázka struktur tvořené implicitní funkcí; a) Schoen Gyroid; b) Schwartz Diamond [3]

#### Schoenova Gyroidní struktura

Formálně gyroidní struktura patří do ploch, které jsou nazývány IMDS<sup>3</sup>. Jedná se o povrchy, které rozdělují prostor na dvě nebo tři oblasti a minimalizují mezifázovou (interfaciální) oblast. Poprvé tuto IMDS s I4<sub>32</sub> symetrií upozoroval v roce 1967 Luzzati a spol. jako kubickou fázi, která nastala v surfaktantu<sup>4</sup> stronciového mýdla. Avšak úplnou matematickou identifikaci provedl až v roce 1970 Schoen, podle kterého byla nakonec struktura pojmenována. Ten tak zcela matematicky definoval jeden ze 17 případů trojitě periodických minimálních povrchů bez průniku<sup>5</sup> (TPMS), jejichž vlastností je, že mají podobně jako koule nulové střední zakřivení<sup>6</sup>. [2] [5]

Základní stavební jednotka celé struktury sestává ze složitě zakřivené plochy, která se formuje do vzpěr kruhového průřezu, jež opisují téměř sférické prázdné jádro. V každé jednotce se nacházejí 3 body, do každého z nich se sbíhají 3 tyto vzpěry a celý gyroid zabírá v trojrozměrném prostoru krychli o specifické délce hrany. Poloha a tvar ploch gyroidní jednotky v prostoru jsou pak blíže popsány implicitní funkcí (1). [11]

$$\sin\left(\frac{2\pi}{L}x\right)\cos\left(\frac{2\pi}{L}y\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{L}y\right)\cos\left(\frac{2\pi}{L}z\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{L}z\right)\cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) - t = 0 \quad (1)$$

Kde dělitel „L“ ovlivňuje velikost základní buňky iso-plochy gyroidu a parametr „t“ rozhoduje o velikosti průměru průřezu vzpěr, a tím ovlivňuje nejdůležitější charakteristiku gyroidní struktury a tou je relativní hustota, často zaměňována za objemový podíl pevné fáze.

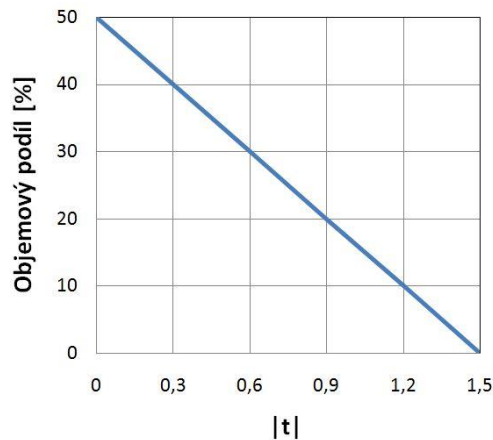
<sup>3</sup>Intermaterial dividing surfaces

<sup>4</sup>Složka, která snižuje povrchové napětí.

<sup>5</sup>Přeloženo z anglického výrazu intersection-free triply periodic minimal surfaces.

<sup>6</sup>Dalšími významnými TPMS jsou Weaire-Phelan struktura, Kelvinova pěna, Schwarz P a D plochy.

Závislost dopadu proměnné „t“ na objemový podíl je vysvětlen obrázkem 10, přičemž jsou předpokládány hodnoty mezi 0 a 1,413. [11]



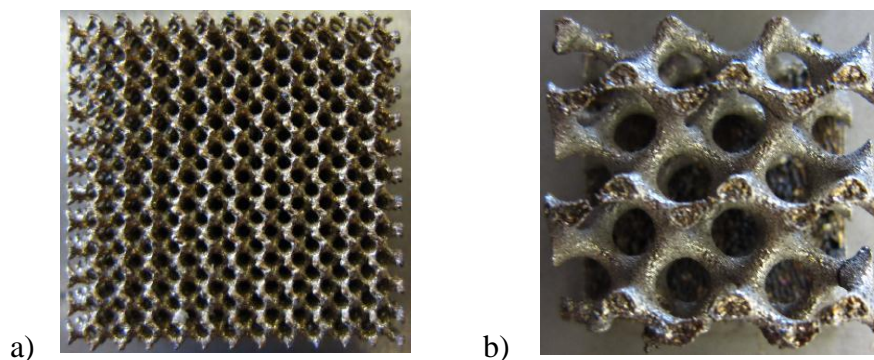
Obrázek 10 - Závislost mezi objemovým podílem a proměnnou  $|t|$  [2]

Do dnešní doby byl potvrzen výskyt této struktury, například v kutikulárních strukturách jakými jsou šupiny na motýlích křídlech. Struktura je tvořena z chitin<sup>7</sup> a vzduchu, které vytvářejí biologický fotonický krystal, jež vytváří krásné duhové barvy. Podobné formace gyroidů se vyskytují v některých polymerech. Tato skutečnost není překvapující, protože je snaha těchto polymerů se ustálit do co možné nejnižší energetické hladiny. [2][5]

### 2.4.3 Fyzikální a mechanické vlastnosti Schoen Gyroid

#### Fyzikální vlastnosti

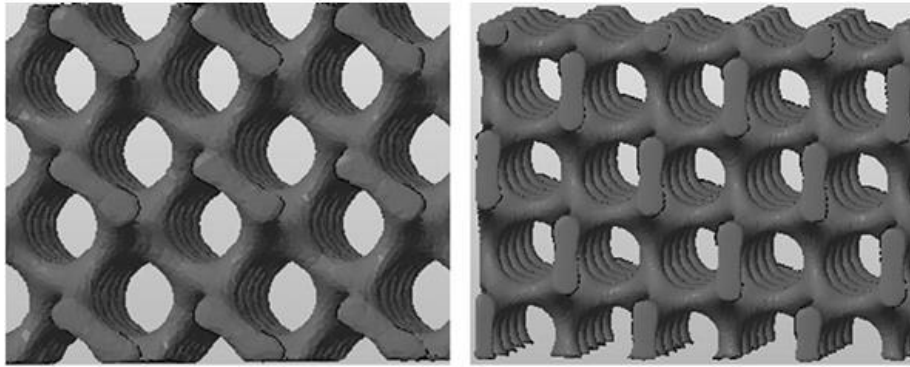
Topologie Schoen Gyroidu vykazuje samonosné vlastnosti, a proto mohou být tyto struktury úspěšně vyrobené aditivní technologií bez použití podpěrných struktur. Samonosnou schopnost potvrzuje informační pramen [3], jehož autoři s úspěchem postavily struktury ve velikostech stavebních buněk v rozmezí 2 až 8 mm, výsledné struktury jsou k vidění na obrázku 11.



Obrázek 11 - Gyroidní struktury; a) velikost buňky 2 mm; b) velikost buňky 8 mm [3]

<sup>7</sup> Chitin je nejrozšířenějším polysacharidem na Zemi, tvoří hlavní složku například kutikul členovců. [32]

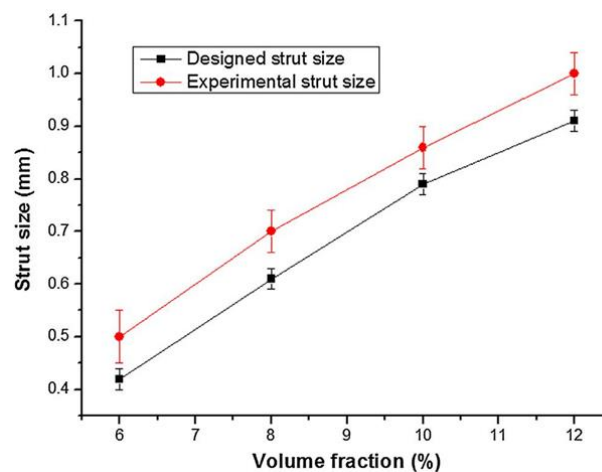




**Obrázek 12 - Vlevo: Nejvhodnější orientace ( $45^\circ$ ); Vpravo: Nejhorší orientace ( $0^\circ$ ) [6]**

Jak se ukázalo ve zdroji [6], tak ani různá orientace struktur v prostoru během tisku není rozhodující pro zdárnou výrobu, tím je umožněna flexibilita zakomponování gyroidních struktur do koncepcí dílů. Přesná orientace vzorků během zkušebního tisku je patrná z obrázku 12.

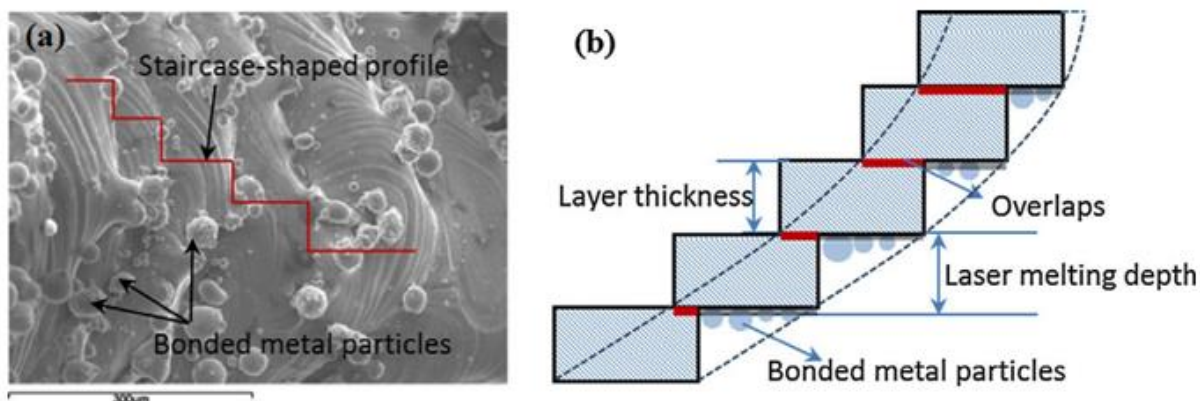
Autoři v tomto článku také ověřovali vyrobiteľnosť vzorků v návaznosti na změnu relativní hustoty. Proto byla vytvořena experimentální sada s relativními hustotami (objem solidu/objem struktury) 6%, 8%, 10%, 12% a 15%, při konstantní velikosti buněk 5mm. Geometrie postavených vzorků byla ve shodě se softwarovou CAD předlohou, avšak průřezy vyrobených struktur měly průměrně větší šíři o 0,09 mm než jejich modelová předloha (viz obrázek 12). Nicméně tato vada může být způsobena špatnou kalibrací samotného výrobního zařízení, nebo špatně nastavenou hodnotou beam offsetu.<sup>8</sup>



**Obrázek 13 - Šíře průřezů vzpěr a jejich shoda s modelovou předlohou [6]**

Z mikroskopického hlediska byl povrch postavených struktur nedokonalý, jelikož na povrchu ulpívala zrnka kovového prášku a pod mikroskopem byl potvrzen schodišťový efekt, který je pro výrobky aditivní technologie typický (viz obrázek 14b), protože jeho výskyt vyplývá ze samotné povahy aditivní výroby. Ukázka mikroskopického náhledu na spečený povrch se zachycenými nedokonalostmi povrchu je na obrázku 14a.

<sup>8</sup> Tato hodnota uvažuje v potaz průměr energetického paprsku, laseru.

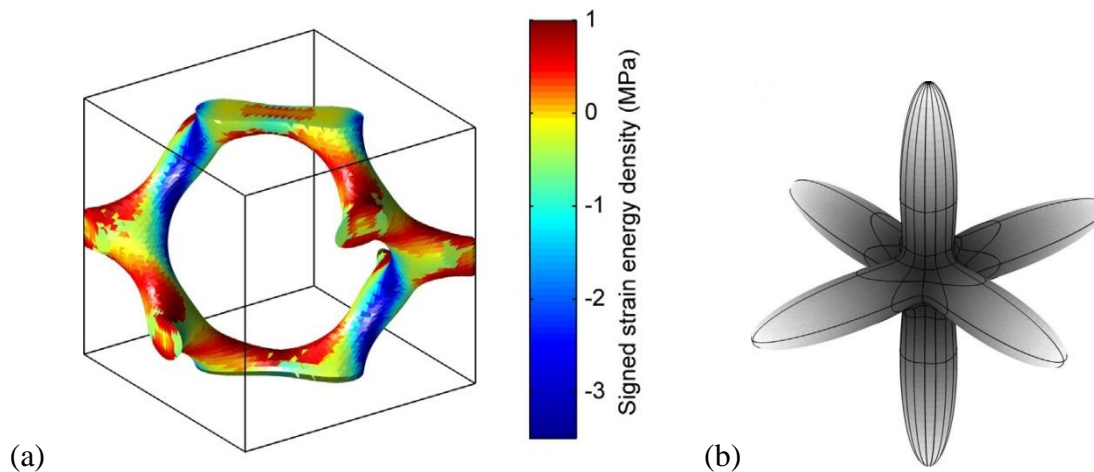


Obrázek 14 - (a) náhled na spečený povrch; (b) schodišťový efekt a oblasti ulpívání zrněk výrobního prášku [6]

### Mechanické vlastnosti

V této podkapitole budou s nejvyšší pečlivostí a stručností sumarizovány dosavadní závěry cizojazyčných zdrojů, které se zabývaly mechanickým chováním gyroidních struktur.

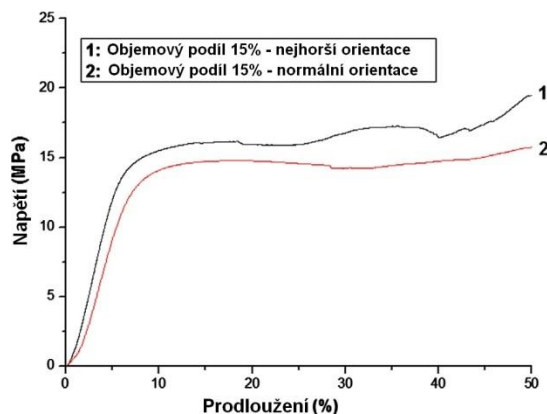
Vizualizace rozložení deformační energie při tlakovém zatížení (viz obrázek 15a) odkrývá místa, kde se při zátěži koncentruje napětí. Červené oblasti jsou místa s tahovou deformační energií, zatímco modrá barva reprezentuje tlakové zatížení. Z rozložení deformační energie se dá usuzovat, že geometrie Gyroidu obecně může nabídnout uspokojivé mechanické vlastnosti pro řadu aplikací. [1]



Obrázek 15 - (a) Vizualizace rozložení deformační energie (b) Youngův modul vypočtený z FEA pro Gyroid [1]

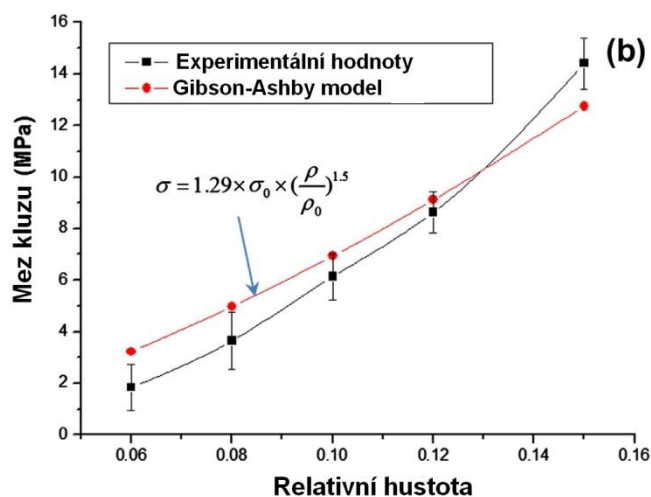
Co se týče izotropie Gyroidu, tak má dle příspěvku [1] geometrie Gyroidu 6 hlavních směrů modulu pružnosti (viz obrázek 15b), ve kterých nabývá nejvyšších hodnot, a proto je v těchto směrech nejtuzší. Vzdálenost mezi bodem na povrchu a počátkem (středem) poskytuje představu o velikosti Youngova modulu u gyroidní buňky.

V souvislosti s mechanickými vlastnostmi bylo prokázáno, že pevnost v tlaku a Youngův modul se zvyšují s narůstajícím objemovým poměrem. Gyroidy při tlakových zkouškách provedených v různých směrech, podávají vcelku konzistentní výkon. Průběh deformačních křivek gyroidní struktury pro nejlépe orientaci (45°) a nejhorší orientaci (0°) s objemovým podílem 15% je pro ilustraci uveden na obrázku 16. Rozdíly v pevnosti u těchto dvou vzorků nejsou veliké.



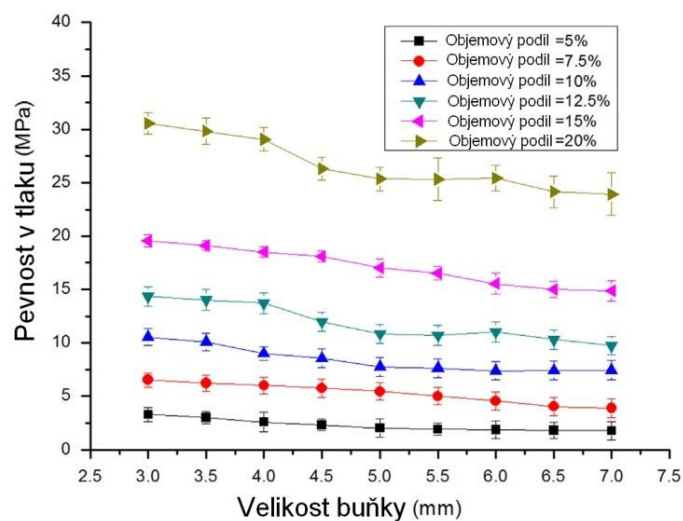
**Obrázek 16 - Vliv orientace tisku na mechanické chování v tlaku, relativní hustota 15%, velikost buňky 5 mm, materiál nerezová ocel 316L [6]**

Výsledky tlakových zkoušek sady vzorků s relativní hustotou 6%, 8%, 10%, 12% a 15%, při konstantní velikosti buněk 5mm a zvoleném materiálu 316L, jsou na obrázku 17, ve kterém je i zaneseno předpokládané chování založené na Gibson-Ashbyho modelu, který se odchyľuje od skutečně naměřených hodnot.



**Obrázek 17 - Mez kluzu v tlaku zkušební sady vzorků [6]**

Rozsáhlejší test gyroidních struktur z hliníkové slitiny provedl L. Hao a spol [4]. Velikost základních buněk se pohybovala v rozpětí 3 až 7 mm a objemový podíl byl nastaven v rozmezí 5% až 20%. Příspěvek zkoumal i mikrostrukturu a mikrotvrdotost vzorků. Bylo zjištěno, že vzpěry struktur se vyznačují velmi jemnou dendritickou strukturou a pevnost v tlaku s mikrotvrdotostí klesá se zvyšující se velikostí buňky. To je odůvodněno hlavně tím, že tenčí vzpěry menších buněk se ochladí rychleji, protože jejich okolí vykazuje vyšší schopnost chlazení, což vede k jemnější mikrostruktuře. Naopak pevnost v tlaku se zvyšuje s rostoucím objemovým podílem pevné fáze. Na obrázku 18 jsou zaneseny získané hodnoty.[4]



**Obrázek 18 - Pevnost v tlaku pro jednotlivé velikosti buněčných struktur a objemových podílů pevné fáze[4]**

## 2.5 Testovací metodiky porézních struktur

Častým jevem při úloze zjišťování a hodnocení výkonnosti geometrií lehkých porézních struktur je nasazení kombinace analýzy metodou konečných prvků s ověřením shody na experimentálních vzorcích. Ve většině případů jsou tyto testovací vzorky podrobeny tlakovým zkouškám. Tento postup byl upozorován v následujících zdrojích: [6], [4], [1], [7] a [12]. V příspěvku [9] rozšířili tlakové zkoušky a zahrnuli do testovací metodiky zkoušku tahem a ohybem.

K mechanickému popisu nestochastických struktur tedy řada zdrojů přistupovala podobným způsobem. Ve většině případů se provedla měření na základě tlakových zkoušek. Teorie těchto zkoušek je zpracována v následující kapitole.

### 2.5.1 Tlaková zkouška, zkouška pěchováním [16]

Řadí se do nejvíce používaných deformačně mechanických zkoušek. Podstatou zkoušky je získat mechanické chování vzorku při působení tlakové síly. Ta vzorek stlačuje, deformuje a v průběhu působení je překročena meze kluzu, která vyvolá nezvratné plastické změny v materiálu. Zkouška se ukončuje ve stavu, ve kterém je vzorek stlačen o stanovenou výšku, nebo při objevení trhlin ve vzorku. Výsledkem zkoušky je pracovní diagram, ze kterého se stanovují materiálové deformační charakteristiky, jakými jsou například křivky zpevnění, přetvárný odpor a další.

Během tlakové zkoušky nebo také zkoušky pěchováním se konají ve vzorku významné přesuny materiálu vlivem prostorové deformace, která je nerovnoměrná v důsledku přítomnosti jak vnitřního tření, tak tření mezi nástrojem a tělesem. Pro tento stav nerovnoměrné deformace je charakteristické víceosé napětí. Pokud by se zamezilo tření, nastalo by v celém objemu jednoosé napětí a znamenalo by to ideální stav, ve kterém by těleso bylo deformováno rovnoměrně v celém svém objemu. Jedná se ovšem pouze o modelový případ a v praxi je nedosažitelný.

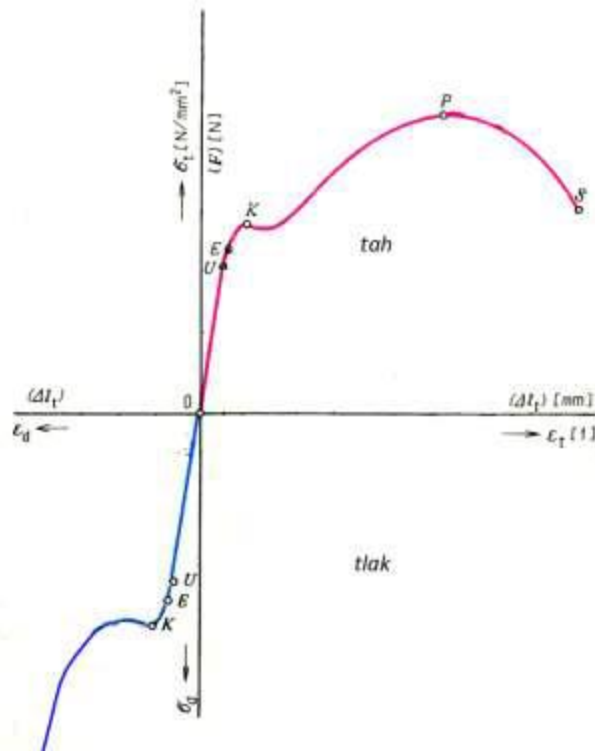
Bylo zjištěno, že vzrůstajícím třením mezi styčnými plochami ztrácejí měřené charakteristiky materiálu na přesnosti. Typickým příkladem je měření přetvárného odporu při pěchování. Z těchto důvodů byly nalezeny postupy, které snižují tření mezi styčnými plochami, a průběh zkoušky se přibližuje rovnoměrné deformaci. Asi nejběžnější variantou zkušebních těles jsou, kvůli své cenové výhodnosti, tělesa s hladkými dosedacími plochami. Styčné plochy u takto připravených testovacích těles jsou broušeny a leštěny. Nicméně nevýhodou je vytlačování maziva leštěnými plochami. Proto vymyslel Šofman alternativu, při které se mezi styčné plochy vložil plech hliníku nebo olova o síle 0,5 mm, tím bylo zajištěno zlepšení přesnosti měření přetvárného odporu.

#### *Vyhodnocení tlakových a pěchovacích zkoušek*

V běžné praxi se ze zkoušek vyhodnocuje výrazná mez kluzu, pokud zkouška končí křehkým lomem, stanovují se i další charakteristiky, jako je mez pevnosti a přetvoření. Výstupem je pracovní diagram, ve kterém je zanesena závislost tlaku na poměrném stlačení v případě tlakových zkoušek, anebo pro zkoušku pěchováním obvyklejší, závislost tlakové síly na stlačení. Z počátečních hodnot vzorku a z provedených deformací se dopočítávají poměrné zkrácení a příčné rozšíření. U pěchovací zkoušky se vyhodnocuje i přetvárný odpor<sup>9</sup> a křivky zpevnění, což jsou charakteristiky plynoucí z plastických deformací. Nicméně u houževnatých materiálů se tlaková zkouška provádí jen výjimečně, protože hodnota meze kluzu v tahu u houževnaté oceli přibližně odpovídá mezi kluzu pro tlak. Mez pevnosti v tlaku pro houževnaté materiály se nestanovuje, jelikož nabývají limitní hodnoty. [19] [16]

---

<sup>9</sup> Vyjadřuje odolnost vůči plastickým deformacím.



**Obrázek 19 - Smluvní a pracovní diagram tahové a tlakové zkoušky [19]**

Na obrázku 19 je znázorněn průběh tlakového a tahového diagramu pro měkkou ocel. Jsou v něm zaneseny významné meze. Přičemž do meze úměrnosti (U) jsou v platnosti Hookeovi vztahy, které slouží ve strojírenství především pro pevnostní výpočty strojních součástí. Po překročení bodu elasticity (E) se začíná materiál plasticky deformovat. Po dosažení bodu meze kluzu (K = bod "tečení") se vzorek protahuje nebo zkracuje, aniž by se zvyšovalo významně vnitřní napětí nebo tlaková síla. [19]

Ovšem testování porézních materiálů si vynucuje řadu specifík. Částečně zachytává danou problematiku Ashby [13], který se zaměřuje na popis mechanických vlastností stochastických pěn. Ten zjistil, že modul pružnosti a pevnost zkušebních vzorků pěn závisí na poměru velikosti vzorku k velikosti buňky a mohou být ovlivněny strukturálním stavem povrchu a způsob jak je vzorek uchycen a zatížen. To znamená, že vzorky musejí být relativně velké a měly by mít určitý minimální počet buněk v každém směru testovacího tělesa, aby se velikost vzorku stala proměnnou se zanedbatelným vlivem na přesnost získaných hodnot. U stochastických pěn byl určen tento počet na 7 buněk, avšak pro pravidelné porézní struktury byl tento údaj k nedohledání.

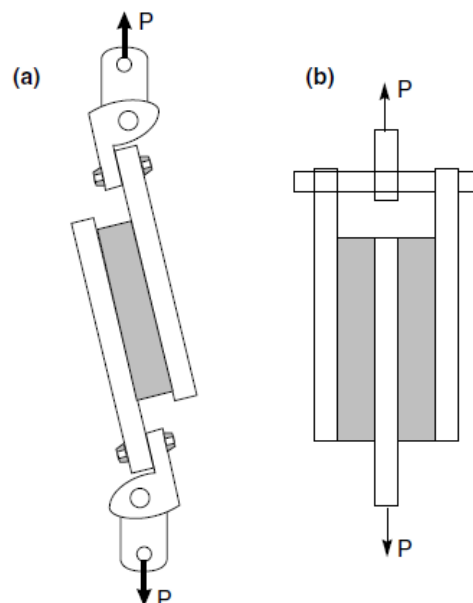
## 2.5.2 Zkouška smykem a ohybem

Pro úplnost nad rámec práce jsou připojeny další mechanické zkoušky, které mají opodstatnění v řadě funkčních oblastí použití porézních struktur. Zkušební metodiky byly převzaty ze zdroje [13] pro stochastické kovové pěny.

### Zkouška smykem

Modul pružnosti ve smyku u kovových pěn se nejnadhěji měří torzními zkouškami na válcových vzorcích. Vzorky by měly být obrobeny ve shodě s normou ASTM E8-96a. Také i zde platí pravidlo, že v každém směru by mělo být aspoň 7 buněk, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Uspořádání testovacího tělesa je patrné z obrázku 20b), přičemž toto uspořádání vyvozuje na vzorek čistší jednoosou napjatost než popsaná alternativa níže (viz obr. 20a), a proto je tento způsob upřednostňován pro určování pevnosti ve smyku. Točivý moment se měří siloměrem.

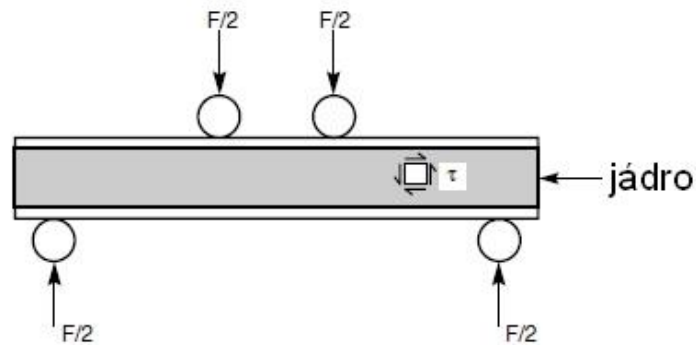
Alternativou je měření smykové pevnosti podle ASTM C-273. Dlouhý tenký vzorek je přilepen ke dvěma tuhým deskám a vzorek je zatížen napříč jeho porézní hmotou (viz obrázek 20a). Pokud je relativně dlouhý k jeho tloušťce (ASTM C-273 uvádí  $L/t > 12$ ), potom je vzorek zatížen téměř čistým smykem. Experimentální měření vzorku z hliníkové pěny ukázalo, že zavazbení buněk měla zanedbatelný vliv na mechanické vlastnosti, pokud byl poměr velikosti vzorku k velikosti buňky větší než 3.



Obrázek 20 - Koncept vzorku pro zkoušku smykem; (a) dle ASTM C-273(b) dle ASTM E8-96a [3]

### Zkouška ohybem

Pokud je cílem získat představu o průběhu deformačního selhání, tak je dostačující jednoosé namáhání. Nicméně předpokládané nasazení těchto struktur vykazuje komplexnější zatěžující podmínky, proto se může do hodnocení struktur zahrnout čtyřbodový ohyb.[9]



**Obrázek 21 - Provedení zkoušky ohybem [13]**

Zkouška dokáže poskytnout cenné informace, protože úzce souvisí s praktickou aplikací, jelikož jsou porézní hmoty často používány, jako sendvičové soustavy, kde na površích je deska a v jádru je porézní struktura. Tato zkouška byla navržena tak, aby jádro bylo zatíženo převážně na smyk.[13]

Zkouška ohybem se také přednostně používá pro zkoušky cyklického namáhání, kdy je vzorek cyklicky vystavován definovanému průhybu a výsledkem je počet cyklů, který vzorek absolvoval do nastalé destrukce.



### 3 Návrh porézních struktur a provedení experimentu

#### 3.1 Popis virtuálního modelu [3]

Volba povrchové reprezentace virtuálních objemových modelů je obzvláště důležitá při modelování 3D objektů, protože každá z nich má své výhody a nevýhody. Jelikož se od zvolené reprezentace odvíjí složitost operací pro editaci či manipulaci s povrchy. Každá forma má také vliv na samotnou vizualizaci objektu. Nejčastější formy mohou být rozděleny do následujících skupin:

##### *Explicitní vyjádření*

V explicitní povrchové reprezentaci body, které leží přesně na povrchu, jsou explicitně uloženy. Nejběžnějším případem explicitního povrchu je povrch tvořený sítí polygonů. Typicky jimi jsou trojúhelníkové (triangles) nebo čtyřúhelníkové (quadrilaterals) polygony. Tyto polygony jsou často uloženy jako seznam, ve kterém každý řádek obsahuje vrcholové souřadnice jednotlivých polygonů. Přičemž pořadí se používá k definování směru normály k povrchu. [3]

$$x = f(x, y)$$

##### *Parametrický popis povrchu*

Na rozdíl od explicitních povrchů nejsou parametrické povrchy tvořené body, ale místo nich jsou vyjádřeny pomocí parametricky proměnné funkce s proměnnými (u,v). Non-Uniform B-spline (NURBs) povrchy jsou formou parametrického popisu ploch, které se běžně používají v CAD softwarech kvůli jejich ucelené reprezentaci, hladkým povrchům a snadné manipulaci. [3]

$$x = x(u, v), y = y(u, v), z = z(u, v)$$

##### *Implicitní popis povrchu*

Implicitní plochy jsou vyjádřeny jako iso-plochy funkcí  $f(x,y,z)$ . Ve 3D prostoru je daná sadou bodů  $P \in \mathbb{R}^3$  splňující matematickou podmínku:

$$f(x, y, z) = 0$$

Jako parametrické vyjádření plochy i implicitní poskytují ucelenou reprezentaci potenciálně složitých ploch. Nabízejí také řadu výhod, dobře definované logické operace a zejména jejich pružnost, jak bude ukázáno dále v této práci. Na druhou stranu nabízejí malou lokální tvarovou kontrolu a manipulace s nimi může být obtížná.

V řadě případů je implicitní vyjádření kompaktnější a je i potenciálně užitečnā. Pro podpoření tohoto tvrzení může být určení, zda se body v prostoru vyskytují na ploše, vně nebo uvnitř popsaneho útvaru implicitní funkcí. Pro tento účel je přiloženā následující konvence.

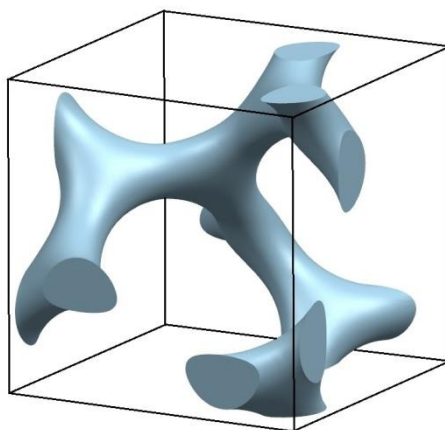
Podmínka	Poloha
$f(x, y, z) = 0$	Na ploše
$f(x, y, z) < 0$	Uvnitř
$f(x, y, z) > 0$	Vně

### 3.2 Strukturální charakterizace

Druhové rozčlenění porézních struktur se uskutečňuje, na základě topologie buňky (otevřeností či uzavřeností), matrice (kruhová, kubická), geometrií (definovaná, nedefinovaná). Nicméně toto dělení je pouze druhového charakteru. Pokud by se měla gyroidní struktura začlenit podle těchto pravidel, tak by její rodové začlenění byla pravidelná buněčná struktura v kubické mřížce (periodic cellular lattice structures).

Což znamená, že spadá do struktur, jejichž struktura v objemu je definovaná základní jednotkou, buňkou, která se systematicky opakuje v prostorové kubické mřížce. Tím se dostáváme ke stěžejním parametrům, které specifikují konkrétní strukturu na základě fyzických charakteristik.

První charakteristikou je velikost buňky, která je definována stranovou délkou kubického prostoru, v němž se nachází právě jedna buňka. Ukázka prostoru buňky, jež obsazuje jedna základní jednotka Gyroidu, je na obrázku 22. Vložení buněk do kubické matrice o velikosti hranové délky se vytvářejí rozsáhlé struktury. Například matrice 4x3x2 označuje strukturu, která je tvořena v ose x čtyřmi buňkami, v ose y třemi a v ose z pouze dvěma.



Obrázek 22 - Hranice buňky, jež obsazuje Gyroid v prostoru

Dalším parametrem je objemový podíl pevné fáze, jehož hodnota vyjadřuje z kolika procent prostor buňky je tvořen z pevné fáze materiálu Gyroidu. Matematický vztah je zanesen do vzorce (2).

$$\text{Objemový podíl} = \frac{\text{Objem pevné fáze}}{\text{Celkový objem}} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

Ekvivalentem objemovému podílu je relativní hustota, která má odpovídající informační potenciál. Její matematické vyjádření obsahuje vzorec (3). Tato metoda výpočtu je preferovaná u hmotných vzorků, jelikož se lépe určuje z váhy vzorku.

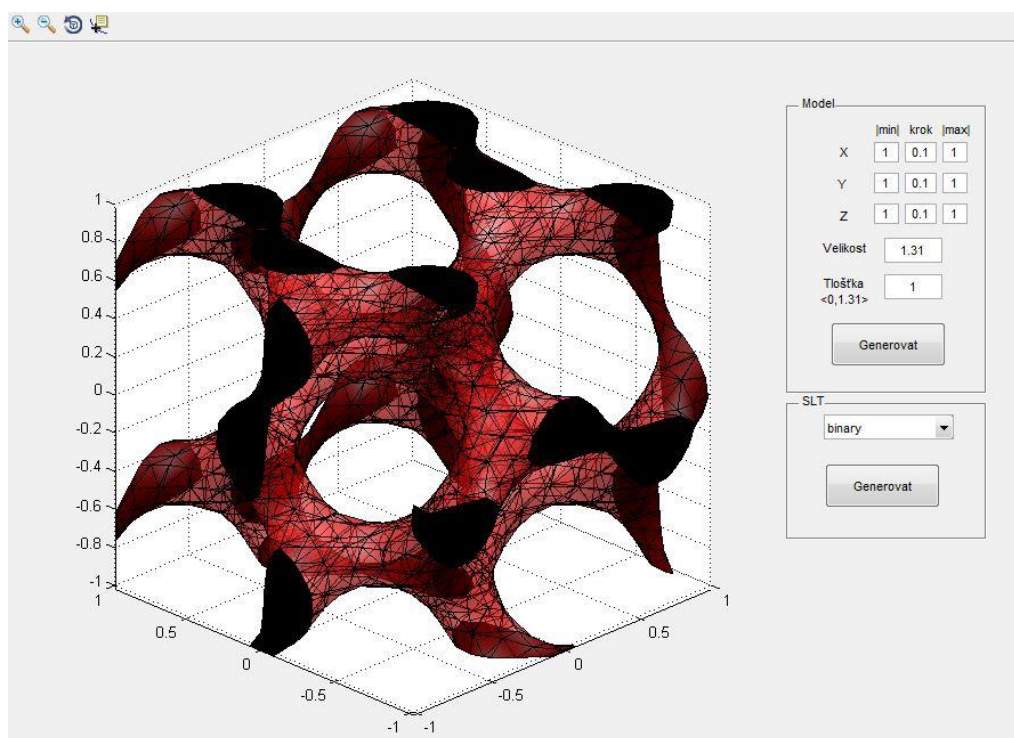
$$\text{Relativní hustota} = \frac{\text{Hmotnost vzorku}}{\text{Hmotnost plného materiálu}} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

### 3.3 Generování gyroidní buňky

Schoen Gyroid je typickým příkladem implicitní funkce, která vyžaduje speciální přístup při generování její geometrie, protože standardní CAD řešení dodavatelů nejsou utvořena pro generování takto zadaných ploch. Na trhu se však již objevují softwary, které dokážou vytvářet gyroidní strukturu a zároveň ji zakomponovat do koncepce vloženého dílu. Takovým softwarem je například Simpleware<sup>10</sup>.

Pro získání gyroidní jednotky pro vědecké účely bylo využito interaktivního programovacího prostředí MATLABu, ve kterém byl vykreslen povrch gyroidu a poté byl přeložen do formátu STL. Tím je zaručena možnost importu této jednotky do pracovního prostředí jiných softwarů, jelikož tento formát je pseudo-standardním rozhraním mnoha CAD systémů.

Napsaná posloupnost příkazů v tomto prostředí používá pro vykreslení gyroidní jednotky příkaz "isosurface", tato funkce zjednodušeně spočítá data iso-plochy z objemu dat "V", v tomto případě z nadefinované implicitní funkce gyroidu. Při výpočtu iso-plochy postupuje tak, že v jednotlivých hladinách výšky pospojuje body, které náleží nadefinované funkci "V". [29] Zatímco příkazem "stlwrite"<sup>11</sup>, který odkazuje na m-soubor, se iso-plocha exportuje do STL formátu. Po sepsání příkazů bylo vytvořeno přes GUI modul v Matlabu prostředí, přes které může uživatel jednoduše měnit vstupní parametry, a tím vykreslovat gyroidní struktury s rozdílnou velikostí buňky a objemového podílu pevné fáze. Přípravenou strukturu pak uživatel exportuje do formátu STL v binárním nebo ACSII kódu. Ukázka vytvořeného programu je na obrázek 23.



Obrázek 23 - Náhled na vytvořený program

<sup>10</sup><http://www.simpleware.com/>

<sup>11</sup> Copyright (c) 2015, Sven Holcombe, All rights reserved.

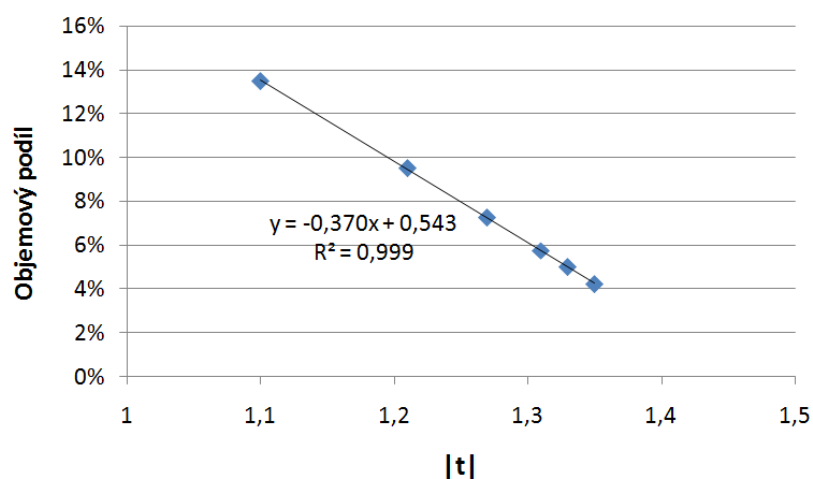
Programem se vytvořily jednotky gyroidů s rozdílným parametrem  $|t|$  ve velikostech dle tabulky 2. V této tabulce je také ověřena shoda mezi parametrem  $|t|$  a objemovým podílem pevné fáze, podle teoretické závislosti, a skutečně naměřenými hodnotami. Teoretická závislost byla přejata regresí z grafu, který byl převzat ze zdroje [2], viz rovnice 4. Skutečné hodnoty se určily importem modelu do CAD prostředí, kde byl odečten z analytických nástrojů objem pevné fáze, kdežto celkový objem byl doložen ze zabraného kubického prostoru gyroidu o stranové délce 10 mm, proto je celkový objem buňky roven  $1000 \text{ mm}^3$ . Pro výpočet objemového podílu ze získaných hodnot posloužil vzorec (2).

$$\text{Objemový podíl} = -\frac{100}{3}|t| + 50 \quad (4)$$

**Tabulka 2 - Řada vygenerovaných jednotek gyroidů**

Parametr $ t $	Objem pevné fáze	Objemový podíl	Teoretická
1,1	134,91	13,5%	13,0%
1,21	95,10	9,5%	9,7%
1,27	72,70	7,3%	7,7%
1,31	57,62	5,8%	6,3%
1,33	49,91	5,0%	5,7%
1,35	42,14	4,2%	5,0%

Byly zjištěné odchylky od převzaté závislosti, proto byly vypočtené hodnoty zaneseny do obrázku 24 a body byla proložena lineární funkcí s vysokou hodnotou spolehlivosti. Korelační koeficient spočítaný pro lineární chování byl 0,9998, což by mohla být chyba vzniklá zaokrouhlením.



**Obrázek 24 - Závislost parametru  $|t|$  na objemovém podílu**

Protože povrch STL modelu je vyjádřen explicitně, není ho obecně možné editovat, proto jsou modely podrobeny konverzi vhodným SW nástrojem do formátu Step. Tak bylo učiněno v programu Geomagic a modely tak byly připraveny na uplatnění booleovských operací, které jsou nutné pro sestavení komplexní gyroidní struktury. Konverze má i pozitivní dopad na snížení výpočetního výkonu během kompilace testovacích vzorků, jelikož STL o vysoké přesnosti se skládá z velkého množství trojúhelníkových ploch, jejichž počet se násobil počtem rozkopírovaných jednotek gyroidu a celý model struktury byl tak neúnosně náročný na vykreslování a manipulaci.

### 3.4 Návrh postupu měření

Opakovatelnost experimentálního měření je důležitým předpokladem pro věrohodnost experimentálních výsledků. Proto je důležité sestavit systematiku, která by zamezila nadměrnému rozptylu naměřených hodnot. Postup experimentálního měření porézních vzorků byla inspirována řadou norem a zdrojů, na základě nichž byla navržena. Předmětem postupu měření je tedy navrhnout postup pro vyhodnocování porézních vzorků pro tlak a stanovit tak stěžejní tlakové charakteristiky gyroidní struktury.

Při návrhu byl brán zřetel na to, že získané charakteristiky mohou být použity pro vzájemné porovnání rozdílných typů porézních struktur. Proto se ověřoval vliv předpokládaných fyzikálních jevů (např. třecích podmínek) na přesnost a věrohodnost měření. Velká pozornost byla věnována tření a velikosti matrice, jelikož, jak je z rešerše patrné, mohou mít negativní dopad na přesnost experimentálně získaných hodnot.

Pro snížení obsáhlosti zkoušek se zatím nebude brán zřetel na to, jaký má vliv orientace gyroidní struktury vůči směru zatežující síly na vybrané tlakové vlastnosti. Proto se osa zatežující síly ztotožní s hlavní osou (osa z) geometricky dané gyroidní struktury.

Tyto podklady mohou být poté rozhodující při výběru použité struktury v reálném funkčním dílu, s ohledem na předpokládané silové účinky, které budou vyvíjeny na těleso během své životnosti.

#### 3.4.1 Výrobní zařízení

Testovací vzorky byly vyrobené zařízením EOS M290, které je vyobrazeno na obrázku 25. Toto zařízení využívá licencovanou technologii výroby Direct Metal Laser Melting (DMLS). Hlavní specifika stroje jsou uvedeny v tabulce 3.



*Obrázek 25 - Výrobní zařízení EOS M 290*

*Tabulka 3 - Specifika výrobního zařízení EOS M 290 [30]*

Pracovní prostor	250 mm x 250 mm x 325 mm
Výkon laseru	400 W
Rychlost skenu	Až 7 m/s
Průměr laseru	100 $\mu$ m

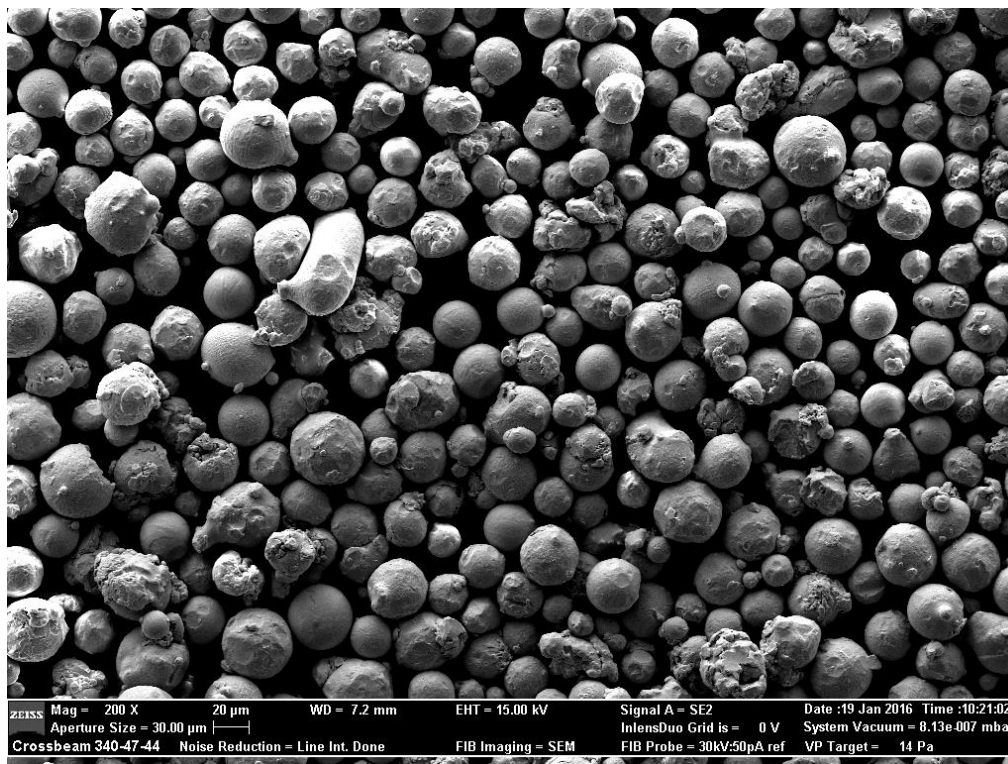
### 3.4.2 Procesní parametry

Pro bezproblémovou výrobu všech testovacích vzorků byla využita defaultní sada parametrů, které jsou nazvány EOS\_Direct Part. Tyto parametry jsou uzamčené a nelze ani nahlédnout jak jsou nastaveny, proto přesné údaje nejsou známy. Nicméně tato sada parametrů je použitelná a doporučována pro všechny díly, které jsou stavěny na základnu z podpor. Tedy pro všechny díly, které se netisknou přímo na platformu, ale pro díly, které jsou odděleny od platformy podpěrnými strukturami.

Výrobní prášek spékal vláknový laser v inertní atmosféře dusíku o čistotě 99,97 %.

### 3.4.3 Výrobní materiál

Výrobním materiálem byla vysokopevnostní ocel MS1. Částice prášku byly sférické s přibližným rozsahem průměru 15-50  $\mu\text{m}$ . Rozdílnost velikostí zrn prášku je vítaná, protože menší částice vyplňují prostor, který může vzniknout mezi stykem větších zrn. Obrázek 26 ukazuje pořízený snímek výrobního prášku rastrovacím elektronovým mikroskopem.



Obrázek 26 - SEM snímek výrobního prášku EOS MaragingSteel MS1

Konvenčně vyrobená ocel 1.2709 dle evropské normy má vynikající mechanické vlastnosti, vysokou mez kluzu a pevnosti v tahu, je tažná a odolná proti dynamickému namáhání. V případě aditivně spečeného materiálu má sníženou tažnost a odolnost proti dynamickému namáhání. Lze ji jednoduchým tepelným zpracováním vytvrdit na přibližnou tvrdost cca 54 HRC. Tabulka 4 přináší chemické složení výchozího materiálu prášku EOS Maragingsteel MS1. [7]

Tabulka 4 - Chemické složení EOS Maragingsteel MS1[31]

Wt [%]	Fe	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr,Cu	C	Mn, Si	P,S
MS1	zbytek	17-19	8,5-9,5	4,5-5,2	0,6-0,8	0,05-0,15	$\leq 0,5$	$\leq 0,03$	$\leq 0,1$	$\leq 0,01$

### 3.4.4 Zkušební zařízení [33]

Konstrukce zkušebního stroje musí být provedena tak, aby umožňovala plynulý pohyb části stroje, který vyvíjí na testovaný vzorek tlak. Těmto předpokladům plně vyhovuje zkušební stroj Zwick/Roell Z250 se silovou kapacitou až 250 kN (viz obr. níže).

Zkušební vzorek musí být vložen mezi dvě broušené podložky, které jsou vystředěné a dostatečně tuhé. Kolmost styčných ploch na osu zatěžující síly a jejich rovnoběžnost by měla být pokud možno co nejlepší.



Obrázek 27 - Zkušební stroj Zwick/Roell Z250 [38]

### 3.4.5 Provedení zkoušky

Podstatou zkoušky je vyvodit na vzorek tlakové zatížení, které po překročení meze kluzu vyvolá v materiálu nevratné plastické deformace. Zkouška se ukončuje, pokud bylo docíleno stanoveného stlačení, nebo pokud se ve vzorku objevily výrazné destrukční stavy. Výsledkem je tlakový diagram, ze kterého se vyhodnocují deformační charakteristiky, těmi jsou mez kluzu v tlaku a maximální silové zatížení neboli únosnost. [16] Také je vyšetřováno jakým způsobem se daná topologie deformuje během zkoušky.

Zkušební vzorky budou stlačovány za studena. Termín za studena znamená, že teplota vzorku je totožná s teplotou okolí asi 20°C s dovolenou odchylkou -10°C a +15°C. Tato volba byla zvolena na základě jednoduchosti provedení, protože k tomuto experimentu dostačuje univerzální trhací zařízení dovybavené broušenými rovnoběžnými dosedacími plochami. [33]

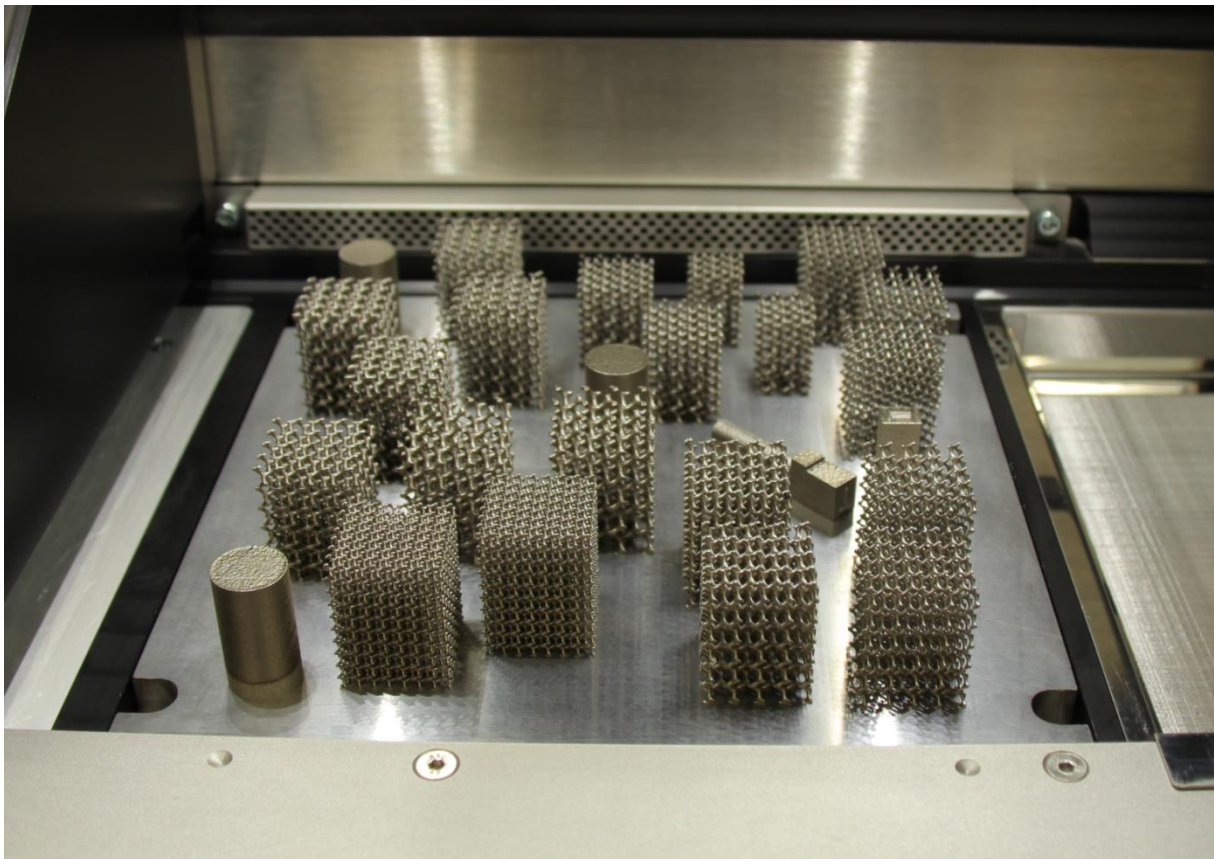
Na zkušební vzorky nesmí být vyvíjen před zkouškou tlak, který by je výrazně deformoval. Nicméně předzatižení může být nezbytné pro eliminaci vůlí mezi zkušebním a zkoušeným tělesem, proto byly testovací vzorky předzatiženy silou 10 N. Rychlost stlačování vzorků byla nastavena na 0,1 mm/s.



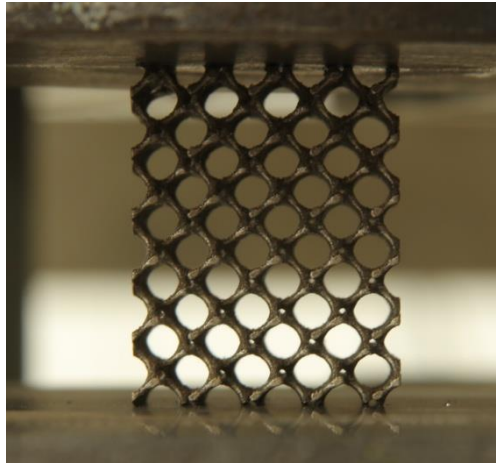
### 3.4.6 Předběžný experiment

Předběžné experimenty měly za cíl posoudit schopnosti aditivní technologie tisknout gyroidní struktury bez podpěrných struktur. Proto se vytiskly vzorky o velikostech základních buněk v rozmezí 3 mm až 8 mm s objemovým podílem 15 %. Všechny velikosti vzorků byly vytištěné bez vad a tím byla potvrzena samonosná vlastnost Gyroidu v daném rozsahu velikostí. Podobných výsledků dospěli [3], jejichž výrobní zařízení bylo schopné tisknout z hliníkové slitiny nejmenší vzorky z testované série, které měly velikost buňky 2 mm a objemový podíl 15%.

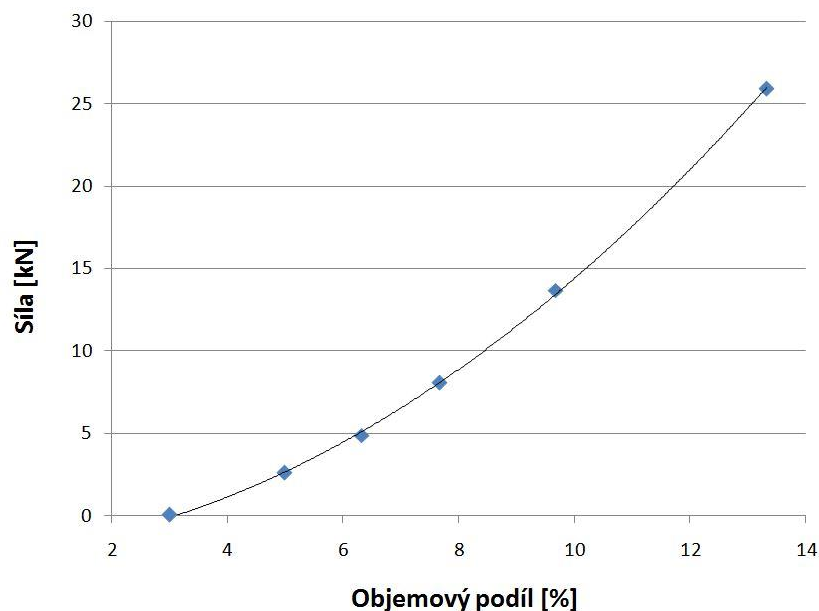
V této fázi byla také vytištěna řada testovacích vzorků, které měly velikost buněk 6,5 mm a objemový podíl pevné fáze 13,5%, 9,5%, 7,3%, 5,8%, 5,0% a 4,2%, což odpovídá v pořadí hodnotám parametru  $|t|$ : 1,1; 1,21; 1,27; 1,31; 1,33; 1,35. Na následujícím obrázku 28 je platforma se sadou testovacích vzorků. Tyto vzorky byly zatíženy tlakovou silou. Orientační naměřené hodnoty jsou zaneseny v obrázku 30.



*Obrázek 28 - Platforma s testovacími vzorky před vyndáním z operačního prostoru 3D tiskárny*



**Obrázek 29 - Vzorek s 9,5 % objemovým podílem**

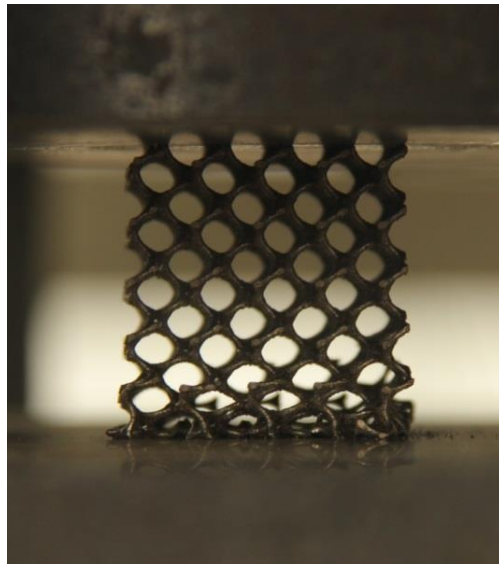


**Obrázek 30 - Předběžné výsledky tlakových zkoušek**

Z předběžných výsledků je patrné, že se nepatrně zvyšuje relativní únosnost vzorku při klesajícím objemovém podílu. To znamená, že jednotka hmoty Gyroidu s nižším objemovým podílem je schopna přenést větší zátěž do selhání než tomu je u Gyroidu s vyšším objemovým podílem. Tento poznatek je ale v rozporu s předpokládaným chováním, jelikož u menšího objemového podílu jak 5,8 % se na vzpěrách Gyroidů začnou vytvářet zužující krčky, které by měly mít za následek právě snížení relativní únosnosti. Studie [3], která se zabývala spékáním hliníkové slitiny, zmíněný jev vysvětluje jemnoznějši strukturou materiálu tenčích vzpěr, zapříčiněnou rychlejšim odvodem tepla do práškového lože během procesu spékání.

Nicméně tento experiment měl řadu specifíků, které mohly mít vliv na přesnost výsledných hodnot. Jednou z nich byl deformační průběh testovacích vzorků, které se deformovaly v blízkosti jedné ze styčných ploch, vždy na straně, kde byl vzorek odříznut od platformy

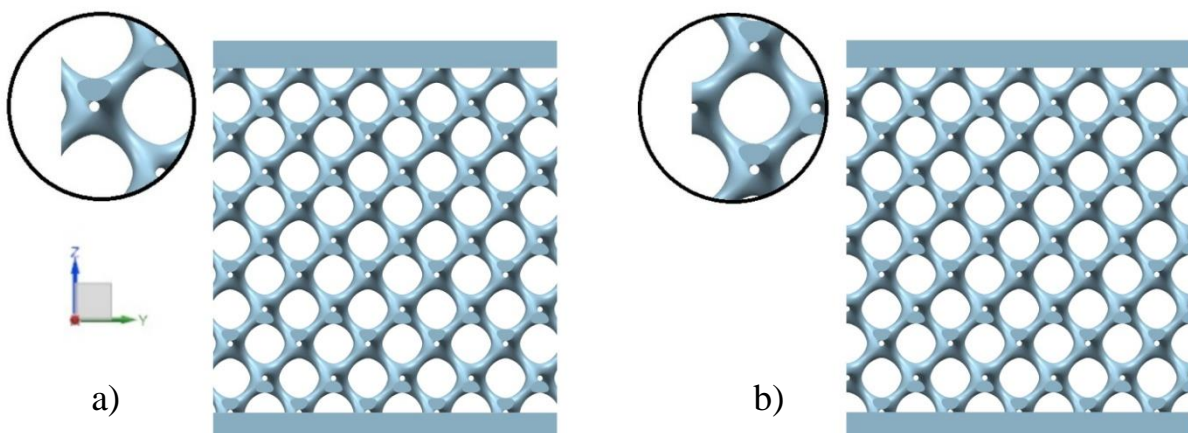
(viz obrázek 31). Vznik tohoto jevu může mít původ ve snížené tuhosti této oblasti vlivem přiohnutí vzpěr struktury, během odřezávání pásovou pilou s jemným zubem vzorků od platformy. Taktéž rovnoběžnost dosedacích ploch nemusela být zcela korektní. Proto byla přijata opatření, které by výstupním datům měla přidat na věrohodnosti v dalších etap experimentu, o kterých se dozvíte v následujícím textu.



*Obrázek 31 - Předběžné výsledky tlakových zkoušek*

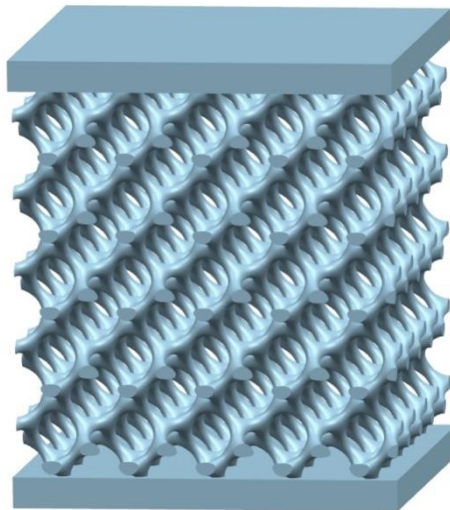
### 3.4.7 Zkušební těleso

Všechna tělesa byla navržena v CAD prostředí Siemens NX 10, ve kterém byly editovány a přizpůsobeny možnostem aditivní výroby. Na obrázku 32a je vyobrazen model zkušebního tělesa, jehož samonosná funkce po krajích byla narušena. Řešením bylo zvětšení matrice o jednu buňku v inkrementovaném směru a byl proveden odřez kritické části modelu. Vzorek s plně samonosnou povahou je na obrázku 32b.



*Obrázek 32 - (a) Detail na narušenou samonosnou vlastnost (b) Detail na obnovenou samonosnou vlastnost*

Těleso se tedy skládá z deformačního jádra, které bylo na obou styčných plochách dovybaveno dosedacími deskami, které jsou vysoké 2,5 mm. Vetknutí koncových vzpěr by mělo podpořit během tlakových zkoušek deformaci v celém objemu porézní struktury, a tak zamezit lokální deformitu v místě styku s hlavou testovacího zařízení. Měla by být zajištěna vzájemná rovnoběžnost dosedacích ploch. Ukázka modelu zkušební tělesa z perspektivy je na obrázku 33.



*Obrázek 33 - Náhled z perspektivy na testovací vzorek*

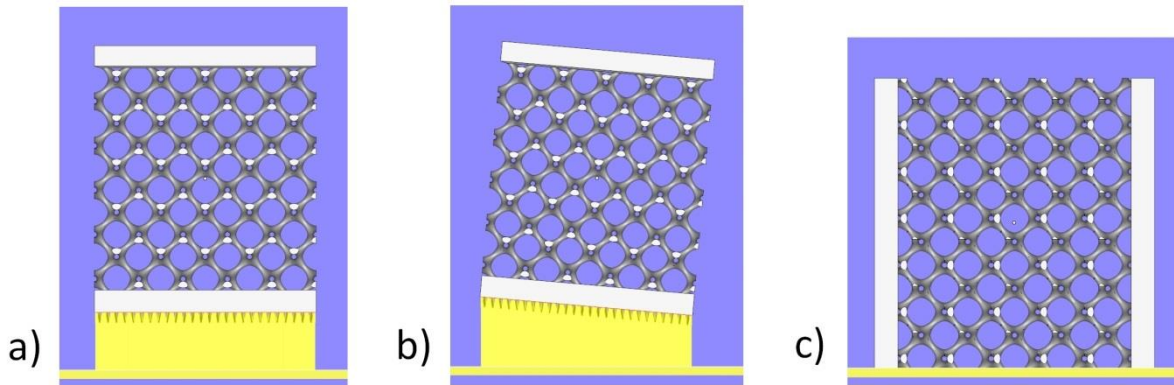
Kvůli snížení cenové náročnosti na vzorek, kubické mřížce porézních struktur a splnění podmínky minimálního počtu buněk v každém směru vzorku má jádro zkušební tělesa tvar krychle. Během vstupního experimentu byla ověřena schopnost aditivní výroby spéct porézní struktury o objemovém podílu 15 % ve velikosti buňky v rozmezí 3 až 8 mm. Dalším krokem bylo stanovit velikost buňky pokud možno s prozřetelností na případné budoucí srovnání s jinými topologiemi struktur, a proto by stanovená velikost měla umožnit výrobu co nejširší škály porézních topologií.

### **3.4.8 Ověření schopnosti výroby konceptu navrženého zkušební tělesa**

Z teorie polohování a možností aditivní výroby kovových dílů je známo, že aditivní technologie je přibližně schopna překlenout bez podpěrných prvků zhruba 3mmpřevís. Proto by v případě výroby tlakových vzorků ve vertikální poloze mohly nastat komplikace při spékání dosedací desky, u které suplují podpěrné prvky vetknuté vzpěry porézní struktury.

Chybějící praktické znalosti daly vzniknout dalšímu experimentu, ve kterém byly hodnoceny různé orientace tlakových vzorků během aditivní výroby. Na obrázku 34 jsou uvedeny různé variace polohy, kdy vzorek na obrázku 34a byl tisknut ve vertikální poloze. Následným natočením kolem osy y o 5° byla dána poloha pro další vzorek (obrázek 34b). Větší natočení vzorku by výrazně zkomplikoval návrh podpěrných struktur, jelikož by některé části vzpěr porézního jádra bylo potřeba vypodložit podpěrnými elementy, aby se tyto kritické části nezačaly stavět v sypkém loži výrobního prášku, což by mělo za následek defekty ve stavbě porézního jádra. Poslední variantou byla výroba ve vodorovné poloze, viz obrázek 34c. Vzorek byl v místě spojení s platformou prodloužen o jednu řadu buněk, aby vznikl

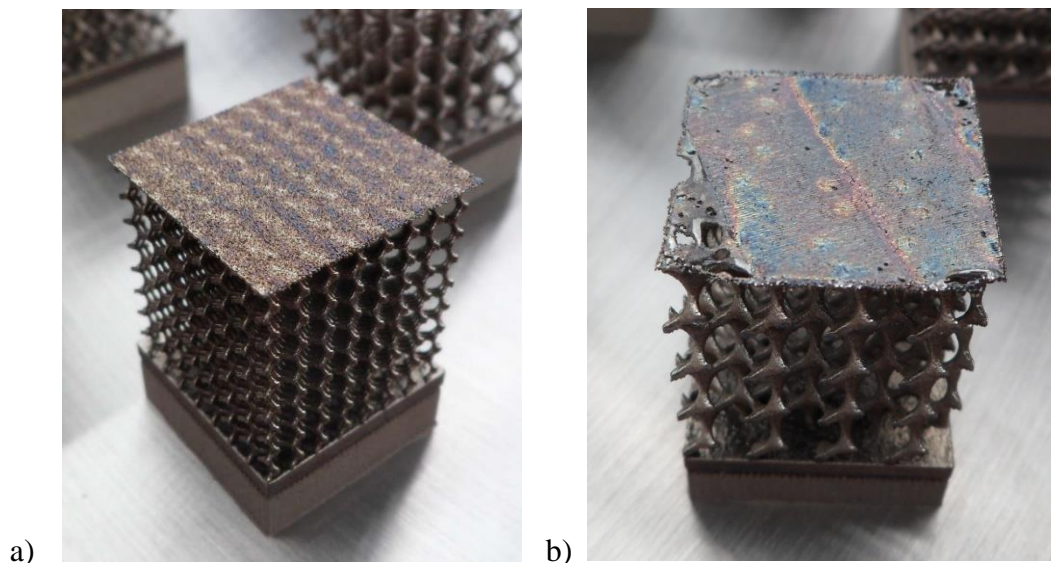
dostatečný prostor na prořez během oddělování vzorků od platformy pásovou pilou. Po odříznutí byly přebytečné vzpěry ručně odříznuty, tak aby vnikly vzorky s krychlovým porézním jádrem.



**Obrázek 34 - Orientace zkušebních vzorků**

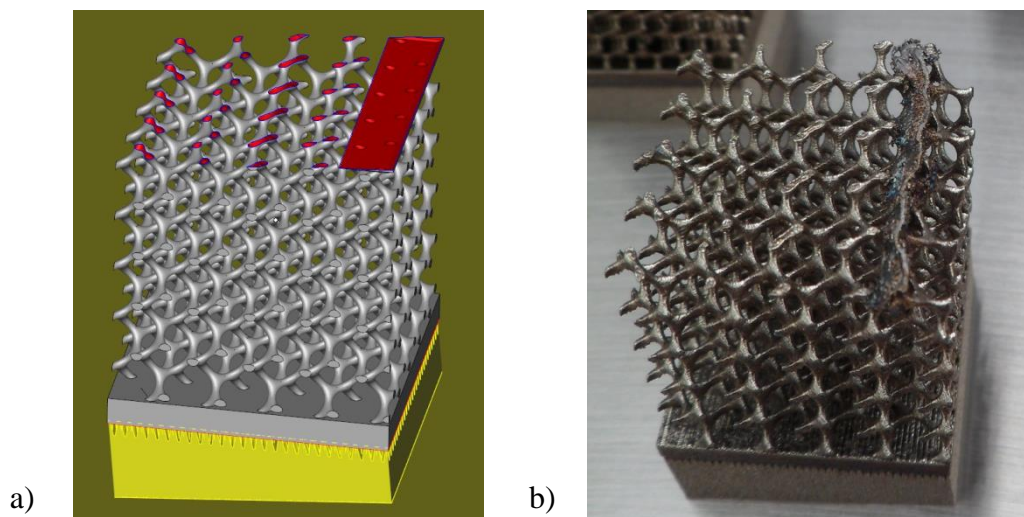
Velikost buňky a tedy vzdálenost mezi koncovými vzpěrami může být také rozhodující pro úspěšné vytisknutí vzorků ve svislé poloze a pod  $5^\circ$  úhlem natočení. Proto byly připraveny dvě varianty vzorků s velikostmi buněk 3 a 5 mm.

Očekávané komplikace během aditivní výroby se potvrdily u všech svislých vzorků. Problémy vždy nastaly během spékání horní desky, přičemž první tři vrstvy se povedlo navařit na horní konce vzpěr (viz obrázek 35a), jelikož byly pro spékání automaticky využity procesní parametry určené pro downskin, které dodají práškovému loži nižší množství energie. Tím je připraven podklad pro plnohodnotně spékanou čtvrtou vrstvou, která je vystavena podstatně vyšší energii. Vlivem vysokého stupně prohřátí během spékání čtvrté vrstvy bez adekvátního odvodu tepla a nedostatečného podepření oblasti došlo k deformaci a propalům (viz obrázek 35b). Práškové kovové lože má totiž horší schopnost odvádět teplo z přehřáté oblasti, proto v oblastech, kde se předpokládá zvýšené teplotní zatížení, se aplikují podpěrné prvky, na kterých se díl může nejen stavět, ale slouží i k efektivnějšímu odvodu tepla.



**Obrázek 35 - Výroba vrchního plátu u svislého vzorku**

U vzorku, který byl nakloněn ze svislé polohy, se projevovaly také potíže během výroby, dokonce vzorky s velikostí buňky 5 mm byly nevyrobitelné. Během několika spečených vrstev horní desky byly deformace vzniklé tepelnými ději natolik závažné, že při nanášení nové vrstvy recoater zavadil za vystouplou zdeformovanou část desky a ohnul vetknuté vzpěry. Nebylo možné dále pokračovat ve výstavbě tohoto vzorku a byla ukončena jeho výroba. Na obrázku 36a je ukázána na modelu vrstva, ve které byl tisk přerušen. Na obrázku 36b je vidět defekt na skutečném vzorku.



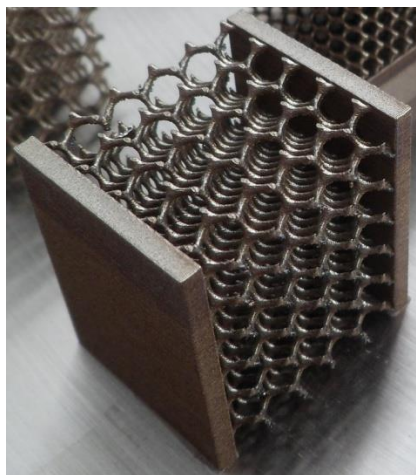
**Obrázek 36 - Defekt nakloněného vzorku s velikostí buňky 5 mm**

Průběh výstavby nakloněného vzorku s velikostí buňky 3 mm nebyl zcela bezproblémový, nanášecí pravítko také drhlo o plochu styčné desky. Nicméně tlakový vzorek se povedlo vyrobit, i když dle očekávání dolní plocha styčné desky měla zhoršený povrch (viz obrázek 37). Nejspíše kombinace menší spékané plochy a menší rozestupy vzpěr přispěly ke zdárné výrobě.



**Obrázek 37 - Nakloněný vzorek s velikostí buňky 3 mm**

Výstavba horizontálně situovaných vzorků s velikostí buňky 5 mm byla plně plynulá bez známek možné příčiny zastavení tisku. Vzorky splňovaly požadovanou spolehlivost výroby a jejich stavba nenesla žádné známky poruch. Z výše uvedených důvodů byla horizontální poloha vyhodnocena jako nejvhodnější. Na obrázku 38 je zobrazen vzorek s velikostí buňky 5 mm, který byl vytištěn v horizontální poloze.



**Obrázek 38 - Vzorek vyrobený v horizontální poloze**

Obecně všechny vzorky s velikostí buňky 3 mm a objemovým podílem 7,3 % měly častý výskyt defektů u všech zkoumaných poloh. To může naznačovat, že minimálním možným průměrem prutu gyroidní struktury je během aditivní výroby přibližně 0,42 mm. Už i s tímto průřezem se výrazně snižuje spolehlivost aditivní výroby a výtěžnost je malá. Proto byla velikost buňky nastavena konstantně na 5 mm, aby bylo možné vytisknout i zkušební vzorky s nejmenším objemovým poměrem.

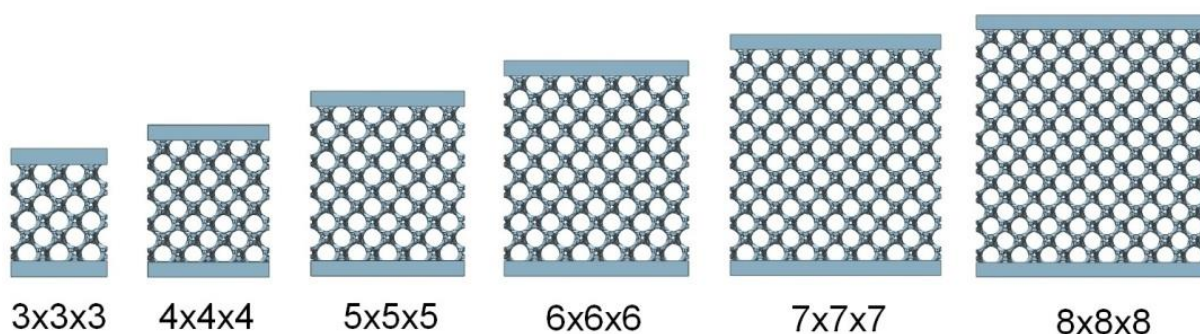
### 3.5 Hlavní experiment

Navržený hlavní experiment byl rozdělen do 3 etap. V první etapě se zjišťoval vliv velikosti vzorku na experimentálně změřené hodnoty, více v následující podkapitole. Druhá etapa si stanovila za cíl odhalit případný vliv třecího koeficientu mezi styčnými plochami vzorku a hlavou testovacího zařízení na naměřenou relativní únosnost. Vlivu změny objemového podílu pevné fáze na únosnost gyroidní struktury je věnována poslední etapa. Pro ověření správnosti měření byla provedena u všech tlakových zkoušek dvě opakování. I když se nejedná o statisticky podloženou věrohodnost, výsledky se ve všech případech shodují jen s velmi nepatrnou odchylkou.

#### 3.5.1 1. etapa - Určení rozměrů vzorků

Z provedené rešerše je patrné, že obnažené deformační jádro během tlakových zkoušek kovových pěn může ovlivňovat velikost naměřené meze kluzu v případě, že nejmenší počet buněk v řadě bude nedostatečný pro roznesení vyvinutého tlakového zatížení. To tedy vede k nižším naměřeným hodnotám Youngova modulu a meze kluzu v tlaku u malých vzorků. Bylo prokázáno, že modul pružnosti a pevnost v tlaku roste se zvyšujícím se poměrem velikosti vzorku k velikosti buňky. Proto se v případě stochastických pěn doporučuje zanechat alespoň 7 buněk v nejmenším směru vzorku, čímž vliv odkrytých bočnic na získané naměřené tlakové charakteristiky ztrácí na významnosti. [13]

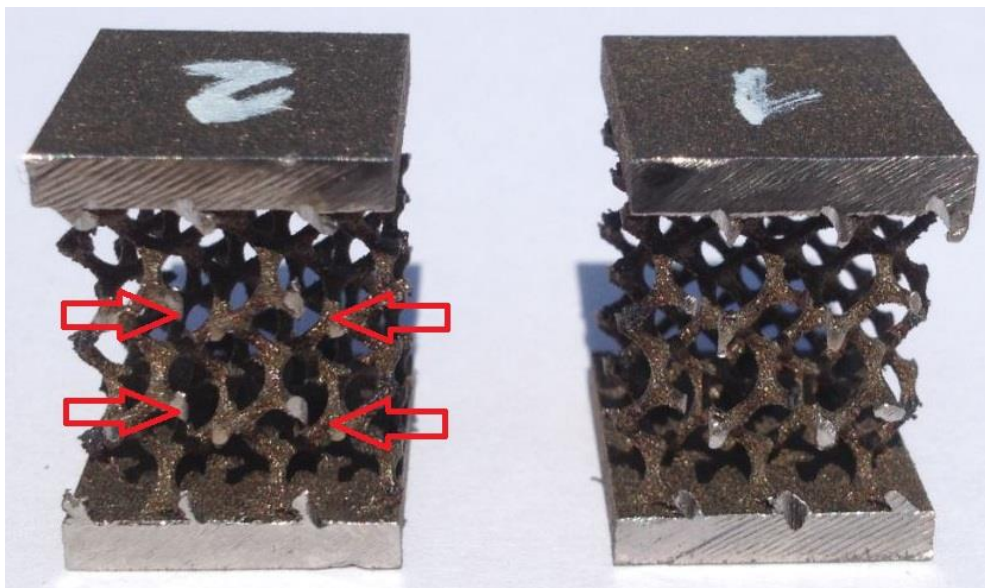
Vzpěry gyroidní struktury mají po stranách vzorků také volné konce, které jsou z mechanického hlediska nezavazbeny oproti vzpěrám přecházející do styčných desek. Proto byl v této části experimentu ověřován vliv počtu buněk na rozptyl naměřených mechanických charakteristik a byla navržena sada testovacích vzorků s rozdílným počtem buněk v kubickém jádře. Testovací sada měla definovaný parametr  $|t|$  s hodnotou 1,27, což odpovídá 7,3 % objemovému podílu pevné fáze (relativní hustotě) vzorků a kubická matrice začínala od velikosti 3x3x3 a končila na 8x8x8. Vzorky byly odstupňovány s krokem jedné buňky. Na obrázku 39 je ukázána sada testovacích vzorků.



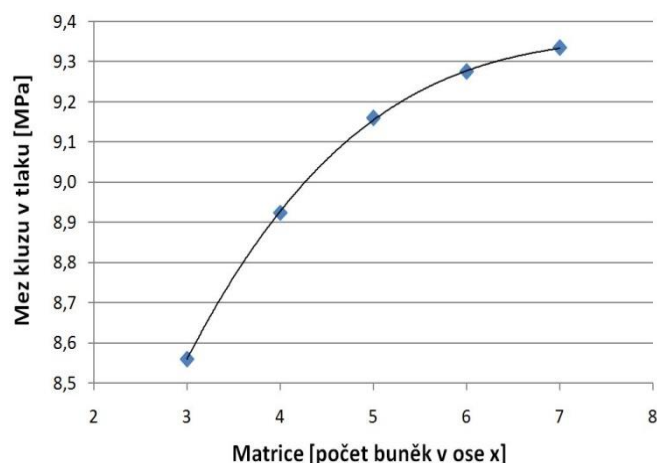
Obrázek 39 - Testovací sada s rozdílnou velikostí matrice

Sada vzorků byla vyrobena bez defektů a odříznuta od strojní platformy. Přebývající uzly prutů, které zůstaly po odříznutí vzorků od platformy, byly odstraněny ruční modelářskou frézku. Ukázka vzorku s maticí 3x3x3 a přerušenými přebývajícími uzly je na obrázku níže (obr. 40). Každý vzorek byl vyroben ve dvou kusech pro ověření opakovatelnosti.





**Obrázek 40 - Dvojice vzorků ve velikosti 3x3x3 a s přerušenými přebývajícími uzly prutů**



**Obrázek 41 - Závislost velikosti matrice vzorku na mez kluzu**

Na obrázku 41 jsou zaneseny výsledky z měření vlivu počtu buněk na mez pevnosti v tlaku. Bylo prokázáno, že velikost matrice ovlivňuje naměřenou tlakovou charakteristiku, přičemž průběh proložené funkce indikuje, že s přibývajícím velikostí se naměřené hodnoty blíží exponenciálně k absolutní mezi kluzu. Proto se hodnota meze kluzu vzorku v uskupení 3x3x3 odlišuje o 8,35% v porovnání s mezí u vzorku 7x7x7, zatímco vzorek s maticí 5x5x5 má již jen o 1,9% menší mez než největší testovací vzorek.

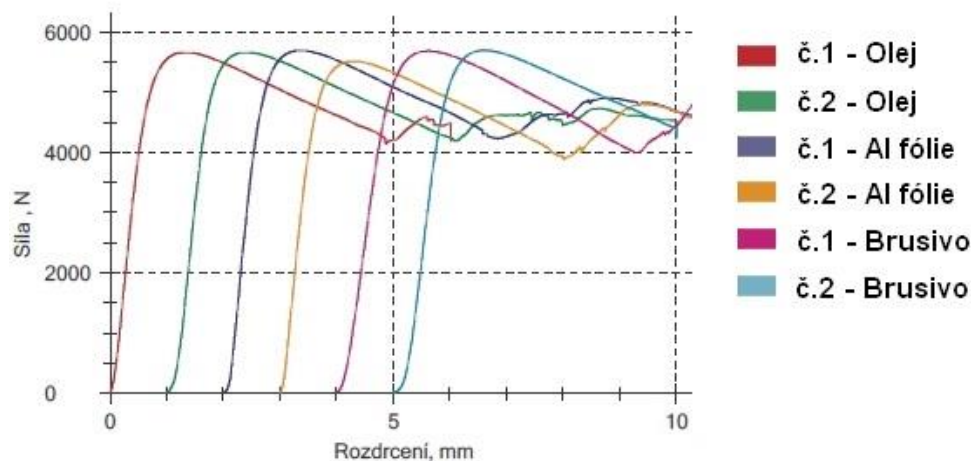
Pro další experimenty byla nastavena velikost vzorku na pět buněk v řadě z důvodu rovnováhy mezi přesností naměřených hodnot a ekonomickým ukazatelem, výrobními náklady na jednotku vzorku.

### 3.5.2 2. etapa – Vliv tření na experimentálně změřené hodnoty

Etapa si klade za hlavní cíl stanovit vliv třecích podmínek mezi styčnými plochami, hlavou stroje a vzorkem, na deformační křivku. Z rešerše vyplynulo, že tření může významně ovlivnit výslednou přesnost výsledků během zkoušky pýchováním. Vložení maziva mezi styčné plochy snižuje třecí účinky a výsledná naměřená pevnost může být až o 25% vyšší než u vzorku bez maziva. Proto byly navzájem porovnány čtyři varianty. U první bylo mezi zbrúšenou dosedací plochu a hlavu testovacího zařízení vloženo olejové mazivo. U druhé varianty byla vložena mezi zbrúšenou styčnou plochu a hlavu zařízení hliníková fólie. Především dvě varianty měly za cíl snížit třecí koeficient. Ve třetí variantě se naopak tření podpořilo vložení brusného papíru mezi dosedací plochy. V posledním případě byl vzorek stlačen ve vytištěném stavu. To znamená bez zbrúšených dosedacích ploch a jakýchkoliv přidaných maziv. [13]

Rovnoběžnost<sup>12</sup> dosedacích ploch byla měřena u všech vzorků. Dosažená odchylka rovnoběžnosti u broušených těles dosahovala hodnot v rozmezí 3 až 5  $\mu\text{m}$ . Vzorky ve výchozím stavu měly odchylku rovnoběžnosti výrazně horší, způsobenou převážně zhoršenou drsností spečeného povrchu, přibližná odchylka rovnoběžnosti byla 60  $\mu\text{m}$ .

Pro porovnání variant je přiložen obrázek 42, ve kterém jsou zaneseny výsledky z měření testovací sady. Výsledky pro výchozí vzorek byly převzaty z 1. etapy experimentu. Deformační křivky vykazují téměř totožný průběh, kdy průměrná dosažená únosnost byla 5680 N s odchylkou  $\pm 20$  N. Proto změna třecích podmínek má zanedbatelný vliv na průběh deformační křivky a tudíž i na tlakové charakteristiky porézních vzorků. Pokud se do hodnocení začlení pracnost přípravy vzorku a náklady, vychází jako nejvýhodnější varianta, jejíž vzorek byl ve výchozím stavu.

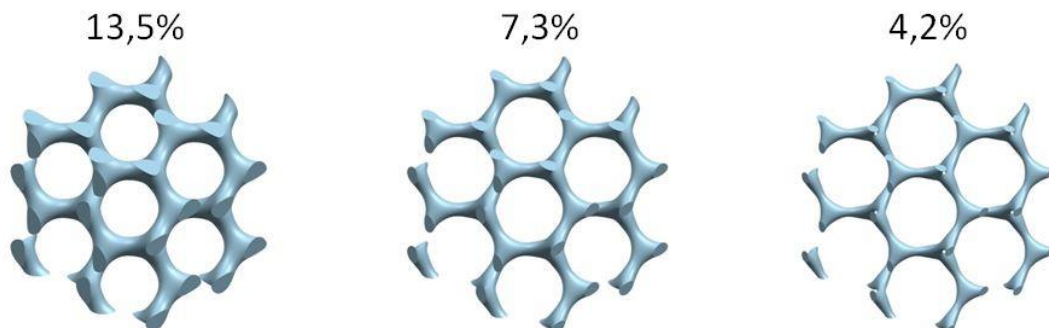


Obrázek 42 - Vliv třecích podmínek na maximální únosnost

<sup>12</sup> Definice rovnoběžnosti = rozdíl největší a nejmenší vzdálenosti mezi rovinami v rozsahu vztaženého úseku. [39]

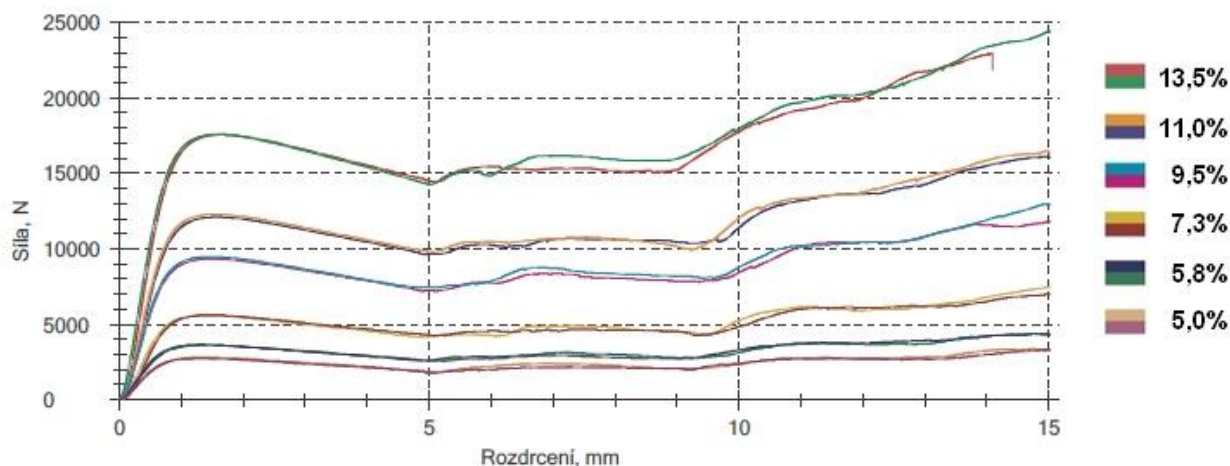
### 3.5.3 3. etapa – Vliv změny objemového podílu na únosnost gyroidní struktury

V poslední etapě hlavního experimentu byl měřen vliv změny objemového podílu na únosnost vzorků. Na obrázku níže je možné vidět, jak změna objemového podílu mění tloušťku vzpěr struktury.



Obrázek 43 - Změna tloušťky vzpěr v závislosti na objemovém podílu pevné fáze

V návaznosti na předešlé experimenty byla v této etapě použita velikost matrice 5x5x5, která se ukázala jako dostačující pro přesnost měření. Vzorky neměly zbrúšené dosedací plochy a nebylo použito žádného maziva pro snížení třecího koeficientu. Na obrázku 44 jsou změřené deformační křivky. Pro každou velikost objemového podílu byly zmáčknuty dva vzorky, jejichž deformační křivky vykazují vzájemnou shodu (viz obrázek).



Obrázek 44 - Průběh deformačních křivek v závislosti na objemovém podílu

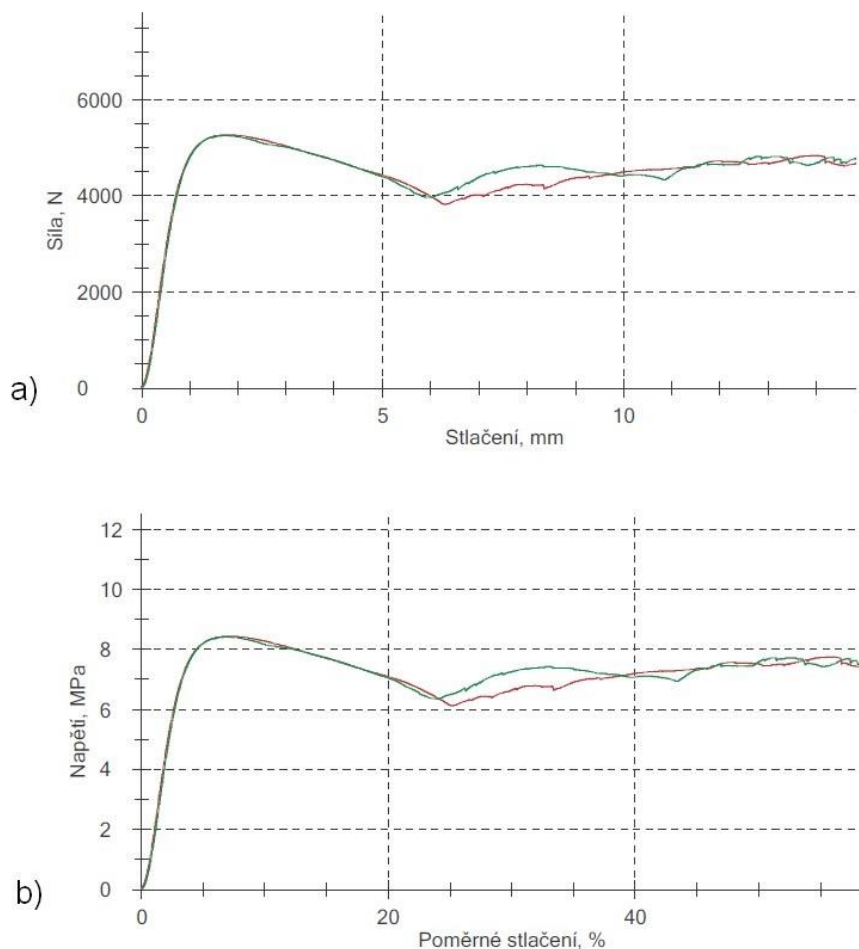
## 4 Vyhodnocení a sumarizace dosažených výsledků

Dle navržené metody byly namodelovány a vyrobeny aditivní technologií pro hlavní experiment zkušební vzorky, které byly vytištěny bez zjevných vad, což bylo potvrzeno průběhy deformačních zkoušek, protože veškerá opakování vykazovala vysoký stupeň shody. Vzorky byly vystaveny jednoosému tlakovému zatížení na zkušebním zařízení Zwick/Roell Z 250. Od každého zkušební tělesa byly vystaveny zkoušce 2 vzorky. Protokol o zkoušce byl zvolen podle nejpravděpodobnějšího druhu zhroucení, který byl určen v návaznosti na teorii učebnice od Gere a Timoshenko [34]. Pokud je příhradová konstrukce struktury vyrobena z materiálu s pozitivní rychlostí zpevnění, tak vznikne s rostoucí deformací materiálu větší odpor, to se projeví jako narůstající napětí v materiálu až do chvíle, kdy nastane zborcení vzpěr. Proto by bylo plně dostačující ukončit tlakové zkoušky po docílení stlačení 2,5 mm. Nicméně pro možné vyhodnocení množství uvořené energie porézním jádrem vzorku během zkoušky byla v řadě případů zkouška ukončena až při výrazném zvýšení deformační síly nad rámeček samotné únosnosti vzorku. [7]

V první etapě experimentu byl potvrzen vliv velikosti matrice vzorku na mez pevnosti v tlaku. Hlavní příčinou byly odhalené bočnice porézního jádra, a proto měly buňky po obvodu vzorků volné konce vzpěr, které tak nemohly přenést tlakové zatížení. Naměřené hodnoty mezi kluzu u vzorků s rozdílnou velikostí matrice potvrdily, že se se zvyšující velikostí mez kluzu ustaluje na své možné maximální hodnotě. Avšak s narůstajícími rozměry vzorků se zvyšuje spotřeba drahého výrobního materiálu a časová náročnost výroby jednoho kusu, což vede k navýšení výrobních nákladů. S přihlédnutím k této skutečnosti byla pro další etapy zvolena velikost vzorku v uskupení 5x5x5, která byla kompromisem mezi výrobními náklady a dosažené přesnosti měření, jelikož mez kluzu pro tuto velikost matrice se odchylovala od meze u největšího vzorku s maticí 7x7x7 pouze o 1,9%.

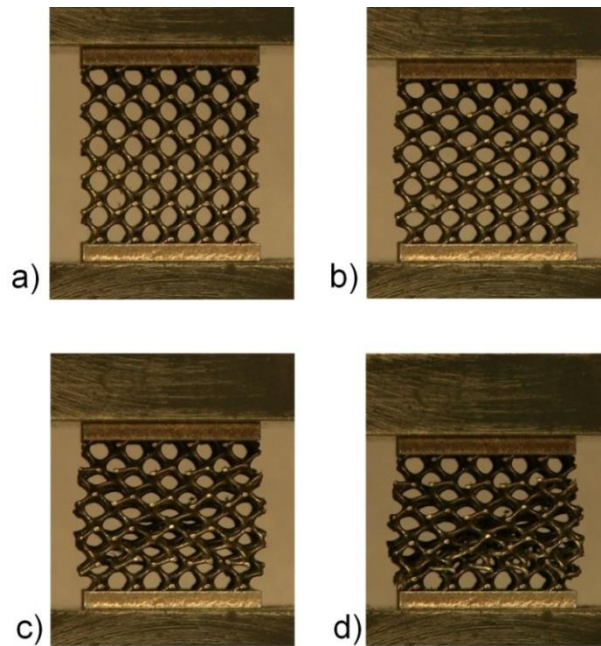
Výsledky vstupního testu signalizovaly, že se gyroidní tělesa při tlakovém zatížení deformují tak, že horní styčná plocha se natáčí vůči dolní o natočení  $\phi$ . Proto se předpokládalo, že pokud by mezi styčnými plochami vzniklo dostatečně vysoké tření, zamezilo by se natočení, což by se mohlo projevit na výsledcích měření. Jak bylo dokázáno ve druhé etapě, třecí podmínky mezi dosedacími plochami vzorku a hlavou zkušebního stroje neovlivňovaly přesnost naměřených tlakových charakteristik gyroidních vzorků. Vzájemné pootočení základů ve vstupním experimentu bylo způsobeno pravděpodobně nedostatečnou rovnoběžností dosedacích ploch jak na straně vzorků, tak použitých tlačných desek v hlavách testovacího zařízení. U žádného ze vzorků v hlavní části experimentů se nedetekovala přítomnost natočení základů vůči sobě.

Vzorky se styčnými deskami měly větší únosnost v průměru o 6,0% než vzorky bez těchto desek. Avšak průběh deformační křivek byl obdobný pro oba typy vzorků. Pracovní diagram tlakové zkoušky pro vzorky bez styčných desek s relativní hustotou 7,3 % s opakováním je na obrázku 45, který ukazuje deformační průběh v grafu zatížení/posuv (44a) a napětí/poměrné stlačení (44b). Po vzoru z čerpaných literatur, napětí bylo stanoveno jako poměr vyvinuté zátěže naměřené siloměrem stroje a nominálním průřezem vzorku. Poměrné stlačení bylo vypočteno z poměru nominální výšky a aktuální výšky stlačovaného vzorku. Únosnost nebo také limitní zatížení, při kterém dochází ve vzorku k plastickým deformacím, odpovídá nejvyššímu naměřenému silovému účinku v pracovním diagramu.



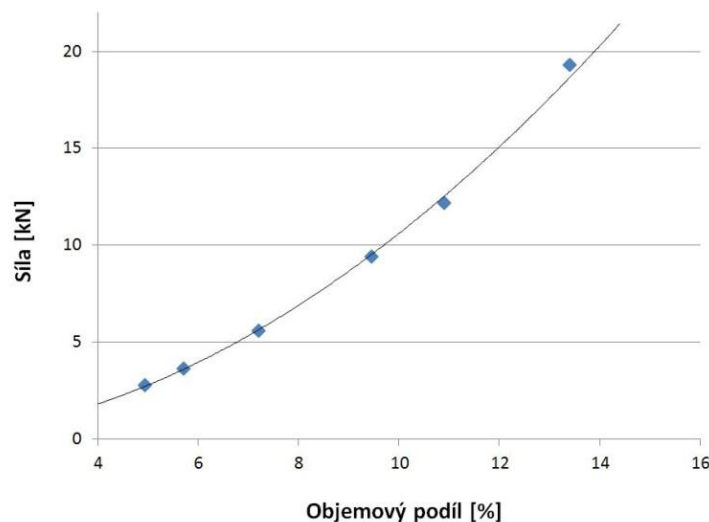
**Obrázek 45- Pracovní diagram tlakové zkoušky: a) Síla/Stlačení ; b) Napětí/Poměrné stlačení**

Vzorky se bortily v celém svém objemu porézního jádra rovnoměrně až na buňky, jejichž vzpěry byly vetknuté v dosedacích deskách. U těchto buněk s vetknutými vzpěrami se deformace viditelně projevovala se zpožděním, až při větším stlačení. Ilustrativní přehled o průběhu deformace vzorku během tlakové zkoušky poskytuje obrázek 46. Selhání porézního jádra se začalo vyvíjet lokálně a postupovalo směrem [1,0,1].

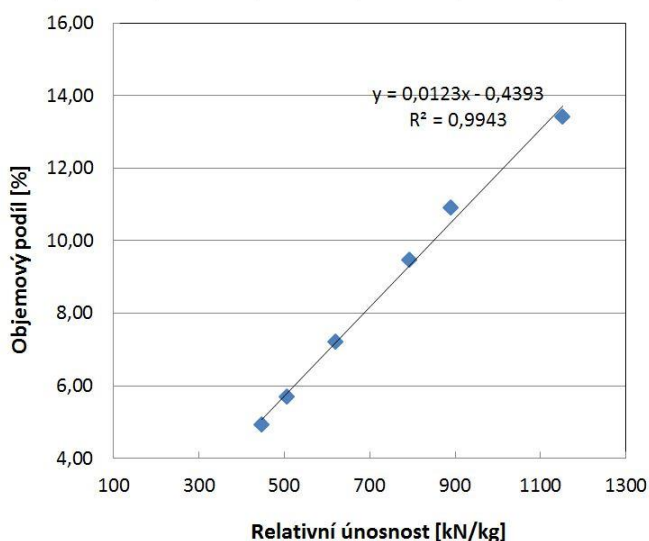


**Obrázek 46 - Průběh deformace porézní struktury při stlačení: a) 0 mm; b) 2 mm; c) 4 mm; d) 6 mm**

Na obrázku 47 je únosnost vzorků vztažená ke změně objemového podílu. Podle průběhu proložené funkce by se mohlo zdát, že se nepatrně zvyšuje s klesajícím objemovým podílem relativní únosnost, která vyjadřuje únosnost na jednotku hmotnosti. Případné navýšení relativní únosnosti se zmenšujícím objemovým podílem by bylo možné vysvětlit tak, že u prutů s menším průřezem vzniká během procesu výroby jemnozrnější struktura důsledkem rychlejšího odvodu tepla z tavené zóny než u vzpěr s větším objemovým podílem pevné fáze. Tato závislost byla zpozorována u gyroidních struktur vyrobených AM ze slitiny hliníku. [4] Nicméně po vypočtení relativní únosnosti pro jednotlivé vzorky se dospělo k závěru, že závislost mezi relativní únosností a objemovým podílem má v tomto případě lineární charakter s vysokou korelací (viz obrázek 48).



**Obrázek 47 - Únosnost vzorků v závislosti na změně objemového podílu**



**Obrázek 48 - Závislost mezi relativní únosností a objemovým podílem pevné fáze**

Z tlakových zkoušek plného materiálu byla stanovená smluvní mez kluzu, která měla hodnotu  $1065 \pm 25$  MPa. Z FEM analýz [7] potvrdil, že při limitním zatížení je v materiálu vyvinutá stejná mez kluzu bez ohledu na použitou geometrii buňky. Mez pevnosti je materiálová vlastnost a není tedy závislá na použité porézní struktuře. Zatímco geometrie buňky určuje, jaké limitní zatížení dokáže struktura přenést při okolních podmínkách a daném materiálu, aniž by se materiál plasticky deformoval. V tabulce 5 jsou uvedeny číselné hodnoty z měření vlivu objemového podílu na únosnost vzorků.

**Tabulka 5 - Únosnost gyroidní struktury v závislosti na změnu objemového podílu pevné fáze**

Objemový podíl	5%	5,8%	7,3%	9,5%	11,0%	13,5%
Únosnost [kN]	2,8	3,6	5,6	9,4	12,3	19,3
Relativní únosnost [kN/kg]	444	504	617	790	890	1145

## 5 Závěr

Existuje nepřeberné množství variací geometrií buněk porézních struktur, ale jen některé z nich jsou vhodné pro aditivní výrobu. Jelikož jsou nejvýhodnější geometrie, které mají během výroby samonosné vlastnosti a nevyžadují nasazení podpěrných struktur, které není možné v řadě případů dodatečně odstranit.

Proto do proniknutí problematiky hodnocení mechanických vlastností porézních struktur byla zvolena gyroidní struktura, u níž byly potvrzené samonosné vlastnosti. Gyroidní strukturou se zabývalo velké množství cizojazyčných odborných publikací, které se zabývaly jejím mechanickým popisem, přičemž v řadě z nich byla hodnocena na základě výsledků z tlakových zkoušek jako i jiné geometrie porézních struktur. Nicméně nedostatečná propracovanost nebo chybějící postupy pro systematické experimentální měření tlakových charakteristik těchto struktur daly podnět k vytvoření této diplomové práce. Dalším důvodem byla naprostá absence tlakové únosnosti gyroidní struktury vyrobené z nástrojové oceli 1.2709 dle evropské klasifikace.

Na základě provedené rešerše a vstupního experimentu byly vyhodnoceny možné faktory, které mohly mít vliv na hodnocení vybrané porézní struktury. Tyto faktory se totiž mohly podílet na snížené přesnosti tlakových zkoušek, které byly zvoleny pro relativní jednoduchost provedení a ekonomickou výhodnost. V odborných databázích jsou dostupné publikace, v nichž autoři uvádějí výsledky výzkumů, ve kterých vystavovaly porézní struktury tlakovému zatížení, proto je zde i prostor pro možné srovnání s jinými druhy porézních struktur.

Z provedeného vstupního experimentu byla navržena koncepce tlakového vzorku, která se skládala z porézního jádra a styčných desek. Nicméně dříve než se vyrobila první testovací sada těchto vzorků, hledala se nejvýhodnější strategie výroby těchto vzorků, jelikož při nevhodné orientaci vzorků na strojní platformě byly vzorky nevyrobitelné bez použití podpěrných struktur. Byla nalezena orientace, která respektovala obecná pravidla aditivní výroby a mohly se tak vyrobit sady tlakových vzorků pro experimenty. V provedených experimentech se nepotvrdil vliv třecích podmínek na naměřenou únosnost zkušebních vzorků. Avšak velikost matrice, která určuje počet buněk v hlavních směrech vzorku, má již prokazatelný účinek na přesnost měření. Vzhledem k ekonomickým aspektům byla vybrána pro koncepci vzorků matrice s velikostí 5x5x5, která poskytovala dostatečnou úroveň přesnosti měření, ale zároveň snižovala výrobní náklady na vzorek.

V závěrečném měření byla zjištěna závislost mezi objemovým poměrem pevné fáze a únosností gyroidní struktury. Zkušební vzorky se základnou 25 mm x 25 mm a výškou porézního jádra 25 mm měly v případě 5% objemového podílu limitní zatížení 2,8 kN a při objemovém podílu 13,5% únosnost 19,3 kN. Dopočítaný vztah mezi relativní únosností a objemovým podílem byl lineární, což poukazuje na zanedbatelný vliv velikosti průřezů vzpěr na materiálovou strukturu spečeného materiálu. Nicméně pro potvrzení tohoto závěru by bylo potřeba dodatečných materiálových analýz.

Byly podniknuty první kroky pro vytvoření postupu jak hodnotit rozdílné geometrie porézních struktur. V dalších krocích by bylo vhodné zjistit, jak ovlivňuje velikost buňky únosnost porézních struktur.

Neustále se zvyšující nároky na výkonnost strojních dílů tak, aby byly lehké, ale zároveň poskytovaly vysokou tuhost, pevnost a spolehlivost při provozním zatížení, nutí návrháře ke zvážení nasazení velmi drahých konstrukčních materiálů, které jsou často velmi těžko obrobitelné. V těchto případech nachází opodstatnění nasazení aditivní technologie výroby, která je schopna vyrábět geometricky velice složité díly z nejrůznějších kovových slitin



na bázi železa, hliníku, titanu a dalších kovů. Spojení aditivní výroby a porézních struktur může mít také v důsledku pozitivní vliv na výsledný produkt, který je hospodárněji vyroben, protože je zkrácen čas výroby a jsou ušetřeny drahé materiály, licí formy nebo vynaložené výrobní energie. Proto AM představuje efektivní přístup k navrhování a výrobě pravidelných porézních struktur.

S ohledem na výše zmíněné omezení se přesto dá s jistotou tvrdit, že tato technologie je bezkonkurenční ve schopnosti produkovat dílce s velmi složitou geometrií. Avšak kvůli výrobní povaze AM nelze doporučit výrobu uzavřených porézních struktur kvůli skutečnosti, že by nebylo možné vysypat ze struktur nespečený výrobní prášek.

## 6 Seznam použité literatury

- [1] Challis, V. J. all et. (2014) *High specific strength and stiffness structures produced using selective laser melting*, Published by Elsevier Ltd, Materials and Design 63 (2014) 783-788
- [2] Khaderi, S. N., Deshpande, V. S., Fleck, N. A. (2013) *The stiffness and strength of the gyroid lattice*, Department of Engineering, Cambridge University, Cambridge
- [3] Hao, L., Raymont, D., Yan, C., Hussiein, A., Young, P. *Design and Additive Manufacturing of Cellular Lattice Structures*, College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences, University of Exeter, Exeter EX4 4QF, Devon, United Kingdom
- [4] Yan, Ch., Hao, L., Hussein, A., Young, P., Huang, J. (2015) *Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering*, Published by Elsevier Ltd, Materials Science & Engineering A 628 (2015) 238-246
- [5] Scherer, M. R. J. (2013) *Double-Gyroid-Structured Functional Materials*, SpringerTheses, DOI: 10.1007/978-3-319-00354-2\_2, Springer International Publishing Switzerland
- [6] Yan, Ch., Hao, L., Hussein, A., Young, P., Raymont, D. (2014) *Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting*, Published by Elsevier Ltd, Materials and Design 55 (2014) 533-541
- [7] Contuzzi, N., Campanelli, S. L., Casavola, C., Lamberti, L., (2013) *Manufacturing and Characterization of 18Ni Marage 300 Lattice Components by Selective Laser Melting*, Materials 2013, 6, 3451-3468; doi:10.3390/ma6083451
- [8] Dong, L., Deshpande, V., Wadley, H. (2015) *Mechanical response of Ti-6Al-4V octet-truss lattice structures*, Published by Elsevier Ltd, International Journal of Solids and Structures 60-61 (2015) 107-124

- [9] Brenne, F., Niendorf, T., Maier, H.J. (2013) *Additively manufactured cellular structures: Impact of microstructure and local strains on the monotonic and cyclic behavior under uniaxial and bending load*, Published by Elsevier Ltd, Journal of Materials Processing Technology 213 (2013) 1558-1564
- [10] Harrysson, O., Cansizoglu, O., Cormier, D., West, H., Mahale, T. *Properties of Ti-6Al-4V non-stochastic lattice structures fabricated via electron beam melting*. Mater SciEng A 2008;492:468–74.
- [11] Aremu, A.O. all et. *A Comparative finite element study of cubic unit cells for selective laser melting*, EPSRC Centre for Innovative Manufacturing in Additive Manufacturing, Faculty of Engineering, University of Nottingham, Nottingham, NG7 2RD, UK.
- [12] Sercombe, T.B. all et. (2015) *Failure modes in high strength and stiffness to weight scaffolds produced by Selective Laser Melting*, Published by Elsevier Ltd, Material and Design 67 (2015) 501-508
- [13] Ashby, M.F. all et (2000) *Metal Foam: A Design Guide*, Butterworth-Heinemann
- [15] Evans, A.G., Hutchinson, J.W., Fleck, N. A., Ashby, M.F., Wadley, H.N.G.: *The topological design of multifunctional cellular metals*. Prog Mater Sci 2001;46: 309–327.
- [16] Sedlák, O. *Pěchovací zkoušky a jejich význam*, bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009
- [17] Smith, M., Guan, Z., Cantwell, W.J. (2013) *Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique*, Published by Elsevier Ltd, International Journal of Mechanical Sciences 67 (2013) 28-41
- [18] Thomas, D. (2009) *The Development of Design Rules for Selective Laser Melting*, Ph.D. Thesis

- [19] Strojírenská technologie - část I. - II., *studijní text pro tříletý učební obor zámečnick* [online]. [cit. 2016-01-29]. Dostupné z: <http://www.unicprum.cz/index.php/component/phocadownload/category/9-ucebnice?download=52:strojni-mechanik-ucebnice>.
- [24] Wadley, H.N.G. (2006) *Multifunctional periodic cellular metals*, Department of Materials Science and Engineering, University of Virginia, Charlottesville, VA 22903, USA
- [25] Lattice structures. *tctmagazine* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.tctmagazine.com/software/lattice-structures-simplified/>
- [26] *Netfabb* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.netfabb.com/blog/?bid=241>
- [27] Finite element method. *Wikipedia* [online]. [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_element\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method)
- [28] Jinnapat, A., Kennady, A. *The Manufacture and Characterisation of Aluminium Foams Made by Investment Casting Using Dissolvable Spherical Sodium Chloride Bead Preforms*, Metals 2011, ISSN 2075-4701
- [29] Isosurface. *MathWorks* [online]. [cit. 2016-01-12] Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/isosurface.html>
- [30] EOS M 290. *EOS* [online]. [cit. 2016-01-25] Dostupné z: <http://www.eos.info/eos-m290>
- [31] EOS MaragingSteel MS1. EOS. [online]. [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: [http://gpiprototype.com/images/PDF/EOS\\_MaragingSteel\\_MS1\\_en.pdf](http://gpiprototype.com/images/PDF/EOS_MaragingSteel_MS1_en.pdf).
- [32] Chitin. *Wikipedia* [online]. [cit. 2016-02-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Chitin>
- [33] ČSN EN 24506, *Tvrđokovy, Zkouška tlakem*, ISO 4506:1979
- [34] Gere, J.M., Timoshenko, S.P. *Mechanics of Materials*, PWS-KENT Publishing Company: Boston, MA, USA, 1984.

- [35] Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B. (2010) *Additive Manufacturing Technologies: Generalized Additive Manufacturing Process Chain*. Springer
- [36] Staněk, J., Němec, J. (2005) *Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací*.
- [37] Dawes, J., Bowerman, R., Trepleton, R., *Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain*. Johnson Matthey Technol. Rev., 2015, 59, (3), 243-256
- [38] Zwick. *amu-augsburg* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z:  
<http://www.amu-augsburg.de/materialanalyse/mechanik/>
- [39] Metrologie. *SlidePlayer* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z:  
<http://slideplayer.cz/slide/2916270/#>