

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

**Matuška
Karel**

2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Matuška** Jméno: **Karel** Osobní číslo: **456373**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza vlastností dutých, 3D tištěných struktur

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of properties of hollow, 3D printed structures

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznámení s problematikou
- 2) Návrh dutých struktur
- 3) Návrh metody zkoušení a tvar vzorků pro ověření vlastností dutých struktur
- 4) Analýza vlastností navržených dutých struktur
- 5) Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN ISO 6892-1
ASM Handbook 14B
Základy 3D tisku- <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Ing. Vít Novák, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**


Ing. František Tatiček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24.6.2020
Datum převzetí zadání

Datulek
Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma **Analýza vlastností dutých, 3D tištěných struktur** vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

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

V Praze dne

.....

Bc. Karel Matuška

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Františku Tatičkovi, Ph.D. za rady, připomínky a konzultace během psaní této práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Vítu Novákovi za pomoc s realizací experimentální části.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Karel Matuška
Název diplomové práce:	Analýza vlastností dutých, 3D tištěných struktur
Master's thesis title:	Analysis of properties of hollow 3D printed structures
Akademický rok:	2019/2020
Studijní program:	Výrobní a materiálové inženýrství
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí práce:	Ing. František Tatíček, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran: 75
	počet obrázků: 68

Klíčová slova: Mřížkové struktury, celulární materiály, 3D tisk, nTopology, nTop, tlaková, tahová, ohybová zkouška

Keywords: Lattice structures, Cellular solids, 3D printing, nTopology, nTop, compressive, tensile, bending testing

Abstrakt

Rozvoj aditivních technologií, především 3D tisk kovů, umožnil mimo jiné i výrobu dílů s dříve obtížně vyrobitelnými nebo nedosažitelnými geometriemi. Mezi takové geometrie patří i mřížkové struktury. Tato diplomová práce se zabývá právě mřížkovými strukturami, možnostmi jejich návrhu a analýzou vlastností při namáhání. V teoretické části jsou popsány vybrané metody 3D tisku kovů, které se objevují v literatuře v souvislosti s tiskem těchto struktur a klasifikace celulárních materiálů, mezi které lze mřížkové struktury zařadit. Dále byla představena platforma nTop, která byla použita pro návrh zkušebních těles na tlakovou, tahovou a ohybovou zkoušku mřížkových struktur. V experimentální části byla stanovena metodika zkoušení mřížkových struktur, navržené vzorky byly vytištěny metodou SLM z korozivzdorné oceli AISI 316L a následně byly provedeny zkoušky tlakem, tahem a ohybem.

Abstract

Development of additive manufacturing has enabled, among other things, fabrication of parts with complex geometry that were previously very hard or impossible to make. Such geometries include lattice structures. This master's thesis focuses on lattice structures, their design and analysis of properties under load. The theoretical part describes selected 3D printing methods associated with lattice structures in literature and classification of cellular materials. The nTop platform used for design of compression, tensile and bending test specimens was introduced next. In the experimental part, testing methodology was specified, and designed test specimens were 3D printed from stainless steel AISI 316L by selective laser melting. Afterwards, compression, tensile and bending tests were performed.

Obsah

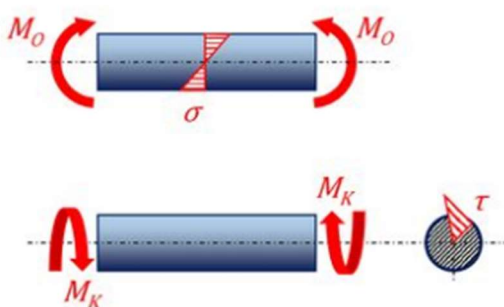
1	Úvod	8
2	3D tisk kovů	10
2.1	Powder Bed Fusion (PBF)	10
2.1.1	Selective laser melting SLM	10
2.1.2	Electron beam melting EBM	11
2.2	Binder Jetting (BJ)	12
3	Celulární (porézní) materiály	14
3.1	1. způsob dělení	15
3.2	2. způsob dělení	21
4	Software nTopology	24
4.1	Srovnání hraniční reprezentace s implicitním modelováním	24
4.2	Prostředí nTop	25
5	Návrh zkušebních tělísek	30
5.1	Zkouška tlakem	30
5.2	Zkouška tahem	31
5.3	Zkouška ohybem	34
5.4	Zjednodušování generovaných sítí	35
6	Vybrané mřížkové struktury	36
6.1	Příhradové struktury	36
6.2	Trojnásobně periodické minimální plochy jako hranice (TPMS)	37
6.3	Trojnásobně periodické minimální plochy s přiřazenou tloušťkou (Walled TPMS)	38
7	Simulace a Field-Driven design	39
7.1	Výsledky simulace:	40
8	Metodika zkoušení	44
8.1	Příprava zkušebních těles	44
8.2	Parametry nastavení zkušebního stroje	46
8.3	Způsoby vyhodnocování výsledků	47
8.4	Analýza výsledků	47
9	Praktická část	48
9.1	Zkouška tlakem	48
9.1.1	Předběžné tlakové zkoušky	48
9.1.2	Měření finálních vzorků	51
9.2	Zkouška tahem	55
9.2.1	Vzorek A - Schwarz	56

9.2.2	Vzorek B - Diamond (TPMS)	56
9.2.3	Vzorek C - BCC	57
9.3	Zkouška ohybem	60
9.3.1	Vzorek A - Schwarz	60
9.3.2	Vzorek B - FCC	62
9.3.3	Vzorek C - Diamond (TPMS)	64
10	Závěr	67
11	Literatura	71

1 Úvod

Rozvoj aditivních technologií umožnil výrobu dílů jejichž geometrie je často nedosažitelná tradičními způsoby výroby. Mezi takové komplexní geometrie patří i mřížkové struktury (z angl. Lattice structures). Tyto mřížky jsou topologicky uspořádané trojrozměrné struktury tvořené jednou či více opakujícími se základními buňkami. Volbou geometrie základní buňky a vhodnou úpravou jejich parametrů lze dosáhnout vlastností velmi odlišných od těch vykazovaných základním materiálem. Vzhledem k množství typů základních buněk a svobodě v modifikaci jejich parametrů, kterou nám dávají aditivní technologie, lze dosáhnout optimalizace nejen mechanických, ale i tepelných, akustických a dalších vlastností pro konkrétní aplikaci. [1] [2] [3]

Jednou z možných aplikací mřížkových struktur je odlehčování tisknutých dílů při zachování dobrých mechanických vlastností. To vede nejen k úsporám hmotnosti, ale i vstupního materiálu a času tisku. Při namáhání ohybem, nebo krutem přenáší největší napětí povrch součásti, zatímco jádro přispívá především ke zvýšení hmotnosti. Tento efekt by se dal omezit díly tvořenými skořepinou z plného materiálu na povrchu a výplní z mřížkových struktur v jádře. V medicíně mohou být mřížkové struktury využity při návrhu implantátů pro přiblížení jejich vlastností vlastnostem kosti. Mřížky mohou snižovat tuhost, podporovat prorůstání kosti a díky své porositě umožňovat prokrvení. V dalších oblastech mohou tyto struktury najít uplatnění jako deformační členy díky své schopnosti absorbovat energii nárazu, nebo jako způsob omezení přenosu tepla skrz součást. [2] [3] [4]



Obr. 1 Průběhy napětí při namáhání ohybem a krutem [30]

Z hlediska vlastností se mřížkové struktury liší od klasických příhradových konstrukcí především v měřítku. Na rozdíl od konstrukcí používaných například ve stavitelství se rozměry základních buněk 3D tisknutých mřížkových struktur pohybují v řádu jednotek milimetrů.

Na Obr. 2 je vidět typická příhradová mostní konstrukce v porovnání se základní buňkou kubické plošně středěné mřížkové struktury. Pokud budeme mřížky analyzovat na úrovni jednotlivých buněk můžeme o nich uvažovat jako o prostorových konstrukcích a použít běžné výpočetní metody. V globálním pohledu je však nutné o mřížkách neuvažovat jen jako o konstrukcích, ale také jako o materiálu. Budeme-li o těchto mřížkách uvažovat jako o materiálech, které mají své vlastnosti, můžeme je snadno srovnávat mezi sebou i s plnými materiály. [1]



Obr. 2 Nýtovaný ocelový příhradový most přes řeku Moravu [5] a jedna FCC buňka v programu nTopology

Cílem této práce je prozkoumat možnosti modelování a analýzy mřížkových struktur v platformě nTop, navrhnout zkušební tělíska a metodiku základních mechanických zkoušek mřížkových struktur (tah, tlak a ohyb), které by umožnily srovnání různých typů základních buněk a porovnání jejich vlastností s plným materiálem. Schopnost měřit mechanické vlastnosti a analyzovat chování jednotlivých struktur při namáhání by měla umožnit informovaný výběr nejvhodnější geometrie a parametrů pro danou aplikaci.

2 3D tisk kovů

Jak již bylo řečeno v úvodu, rozvoj aditivních metod výroby umožnil i výrobu mřížkových struktur nevyrobitelných, nebo obtížně vyrobitelných klasickými technologiemi. Z aditivních technologií má největší přínos pro výrobu funkčních dílů ve strojírenství 3D tisk kovů. K výrobě kovových mřížkových struktur se v současné době nejčastěji využívají metody spadající do kategorie Powder Bed Fusion nebo Binder Jetting. V této kapitole bude uveden přehled nepoužívanějších metod 3D tisku kovových mřížek, jejich funkční princip, vlastnosti, výhody a komplikace související s aditivní výrobou. [4] [6] [7]

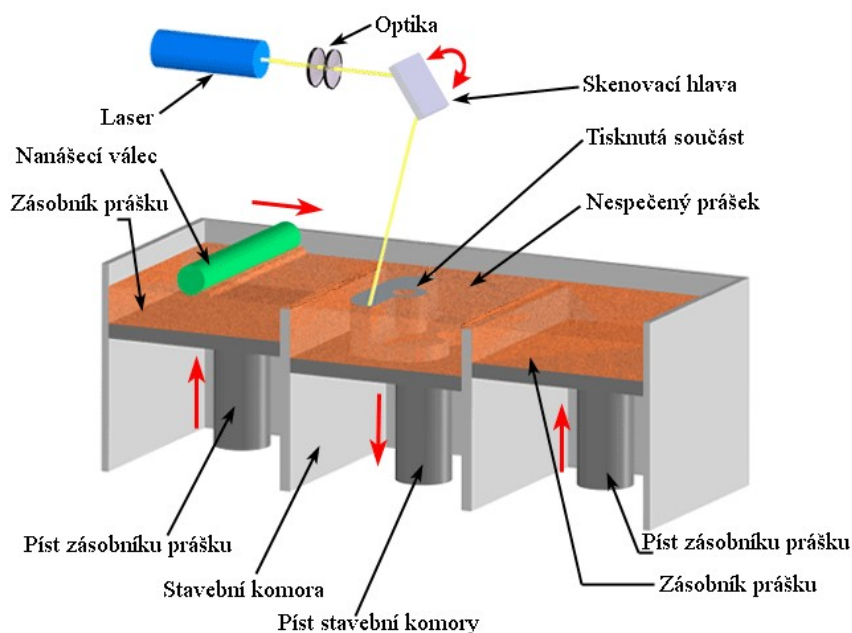
2.1 Powder Bed Fusion (PBF)

Powder Bed Fusion je skupinu velmi rozšířených aditivních technologií. Do této kategorie patří Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Direct Laser Metal Sintering (DMLS) a Electron Beam Melting (EBM). Principem těchto metod je využití zdroje tepla k selektivnímu spékání prášku v jednotlivých vrstvách za vzniku trojrozměrného dílu z CAD dat. Tepelným zdrojem může být laser, elektronový paprsek nebo infračervené světlo. Metodami spadajícími do skupiny PBF lze kromě kovů tisknout širokou škálu materiálů včetně plastů, skla a keramiky. Při tisku je materiál ve formě prášku nanesen v tenké vrstvě (běžně 20-100 μm) do pracovního prostoru a následně je zdrojem tepla spečen v místech určených CAD daty. Po dokončení spékání klesne pracovní platforma o výšku jedné vrstvy a dojde k nanesení nové vrstvy prášku pomocí bříty nebo válce. Zdroj tepla poté opět speče prášek, přičemž dojde i ke spojení nové vrstvy s vrstvou předchozí. Celý proces se opakuje, dokud není hotová celá součást. Výhodou metod PBF je, že při tisku funguje nespečený prášek jako podpora tisknutého dílu. Díky tomu je možné tisknout bez, nebo s minimem opěrných struktur. [8] [9]

2.1.1 Selective laser melting SLM

Jedná se o technologii aditivní výroby kovových dílů využívající laser jako zdroj tepla. Laserový paprsek o výkonu 20 W až 1 kW je vychylován galvanometrickou skenovací hlavou rychlostí až 15 m/s a taví kovový prášek. SLM je velmi univerzální metoda umožňující tisk ze slitin hliníku, titanu, železa, mědi, niklu a kobaltu. Tisk probíhá v ochranné atmosféře inertního plynu jako dusík nebo argon, která má za úkol chránit roztavený kov před oxidací. Pro dosažení kvalitních dílů je

nutné správně nastavit procesní parametry jako výkon laseru, skenovací rychlost, strategii skenování a další. [8] [9] [10]

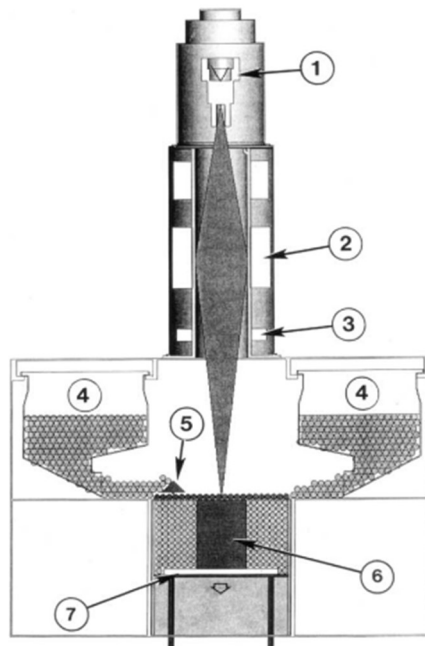


Obr. 3 Schéma metody SLM [12]

Výhodou technologie SLM je široké spektrum materiálů pro tisk a produkce ihned použitelných dílů s dobrými mechanickými vlastnostmi. Mezi hlavní nevýhody patří relativně nízká rychlost tisku, která lze zlepšit implementací více skenovacích hlav do stroje. Dalšími nevýhodami jsou omezený pracovní prostor, vyšší počáteční náklady a vysoká rychlost tuhnutí roztaveného prášku, která vede k velkým vnitřním pnutím, mající za následek deformaci dílů, nebo praskání křehkých materiálů. Rychlost tuhnutí lze v některých strojích zpomalit předehřátím celé pracovní komory na teploty 200 až 500 °C. V součástech vytvořených metodou SLM se také můžeme setkat s anizotropií mechanických vlastností s ohledem na orientaci při tisku. [8] [9] [10]

2.1.2 Electron beam melting EBM

Je to technologie obdobná k SLM, ale zdrojem tepla je v tomto případě elektronový paprsek. Elektrony jsou generovány z wolframového vlákna v elektronovém děle a následně jsou urychlovány elektrickým potenciálem kolem 60 kV. Svazek elektronů je zaostřován elektromagnetickými čočkami a vychylován skenovacími cívkami. Tisk metodou EBM probíhá ve vakuu a pracovní prostor se po celou dobu udržuje na teplotě vyšší než cca 600 °C. Spékání jednotlivých vrstev probíhá ve dvou fázích. Nejprve je vrstva prášku předehřáta defokusem paprskem o velkém výkonu a s vysokou skenovací rychlostí. V důsledku předehřátí dochází i k částečnému slinování částic prášku. Úplné spečení je poté provedeno, zvolenou skenovací strategií, zaostřeným paprskem o nižším výkonu. Metoda EBM má více procesních parametrů než SLM a optimalizace procesu je proto ještě složitější. [8] [9] [10] [13]



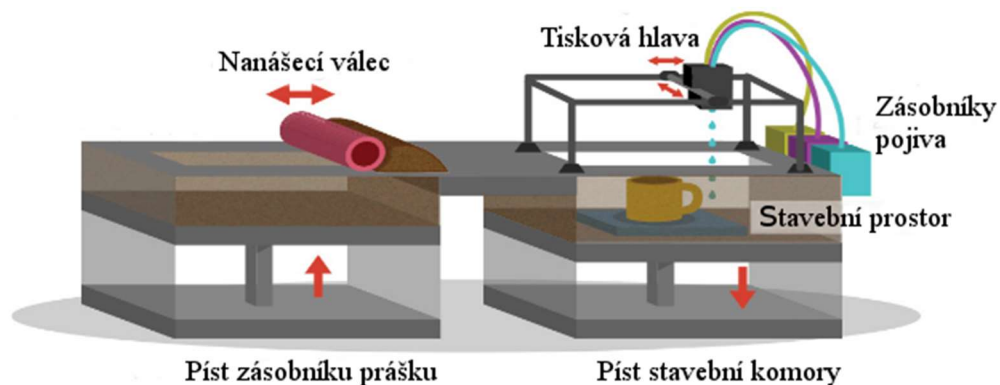
- (1) Elektronové dělo
- (2) Elektromagnetické čočky
- (3) Skenovací cívky
- (4) Zásobník prášku
- (5) Nanášecí břit
- (6) Tisknutá součást
- (7) Stavební platforma

Obr. 4 Schéma metody EBM [13]

Díky pomalému chladnutí tavné lázně je možné metodou EBM tisknout i velmi křehké materiály jako intermetalika (TiAl). Další výhodou EBM je minimalizace porozity způsobené adsorbovanými plyny v prášku díky tisku ve vakuu. Nevýhodami EBM jsou dlouhá doba vychladání pracovního prostoru po dokončení tisku, vysoká pořizovací cena, energetická náročnost a celková složitost procesu. [8] [9] [10]

2.2 Binder Jetting (BJ)

Principem BJG je spojování vrstev prášku pomocí pojiva a následné slinování vytisknutých dílů. Tisknutý materiál je, stejně jako u metod Powder Bed Fusion, ve formě jemného prášku rozprostírán v tenkých vrstvách. Tisková hlava poté nanese kapalné pojivo v místech budoucí součásti a slepí tak částičky prášku k sobě. Aby byla tisknutá součást použitelná musí po vytištění projít několika kroky. Nejdůležitějším krokem takzvaného postprocessingu je slinování, při kterém dojde k odpaření pojiva a slinutí částiček prášku. Následné zpracování vytištěných dílů může trvat déle než samotný tisk a nese s sebou nezanedbatelné náklady. [9] [10] [11]

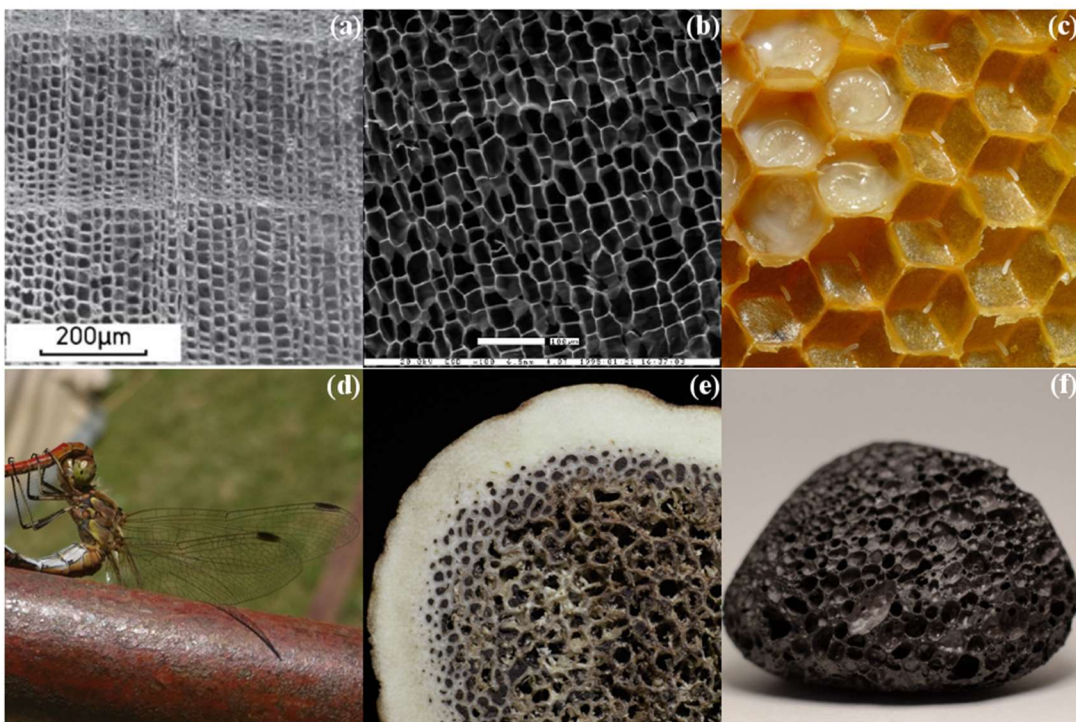


Obr. 5 Schéma metody BJ [14]

Hlavními přednostmi metody BJ je možnost tisknout téměř z jakéhokoliv materiálu, který je ve formě prášku, tisk bez podpor a vyplnění celého pracovního prostoru. Tisknuté díly mohou být naskládány nad sebou s velmi malými rozestupy. Samotný tisk je také rychlejší než u SLM a EBM. Nevýhodou Binder Jettingu je náročné následné zpracování vytisknutých dílů a přítomnost porosity spojené s procesem slinování. Mechanické vlastnosti dílů vytvořených pomocí BJ jsou horší než u dílů vytisknutých metodami SLM a EBM. [9] [10] [11]

3 Celulární (porézní) materiály

Mřížkové struktury, které jsou středem zájmu této práce, spadají do mnohem širší skupiny struktur, kterou nazýváme celulární materiály (z angl. Cellular solids). Jejich název je odvozen z latinského *cella* označující malou místnost ve středu chrámu obsahující sochu božstva. Slovo celulární je poté počestěnou variantou anglického slova „cellular“, přídavného jména od slova „cell“ neboli buňky. Celulární materiály se tak skládají z jednotlivých buněk s pevnými hranami, nebo stěnami, které na sebe navazují a vyplňují prostor. Takové struktury jsou velmi běžné v přírodě a patří mezi ně například dřevo, korek, včelí plástve, křídla vážek, pemza, kost a mnoho dalších. Lidstvo některé, přirozeně se vyskytující, celulární materiály využívá již velmi dlouho a postupem času bylo vyvinuto i velké množství uměle vytvořených materiálů obdobného charakteru. Jedná se například o různé polymerní pěny využívané k tepelné izolaci a polstrování, pórobetonové tvárnice používané ve stavebnictví, ale i pěny vytvořené z kovu či skla. Většina dnes běžně používaných celulárních materiálů se vyznačuje stochastickou, tedy náhodnou strukturou. Aditivní technologie spolu s vývojem v oblasti CAD softwaru nám však umožnily snadnou výrobu téměř libovolných mřížek. V této kapitole je uveden přehled celulárních materiálů a některé způsoby jejich dělení. [15][16][17]



Obr. 6 (a) SEM snímek cedrového dřeva [18], (b) struktura korku [19], (c) včelí plástev [20], (d) křídla vážky, (e) příčný řez jelením parohem, (f) pemza

Velmi dlouho používané dělení celulárních materiálů je založeno na pracích Lorny J. Gibsonové a Michaela F. Ashbyho, kteří ve své knize *Cellular solids: Structure and properties* rozlišují dvě skupiny materiálů. První skupinou jsou takzvané voštiny, nebo plástve (z angl. honeycombs) vzniklé přidáním třetího rozměru, výšky, plošnému uspořádání mnohoúhelníků. Druhou skupinou jsou pěny (z angl. foams), které jsou tvořeny prostorovým uspořádáním mnohostěnů. Pěny dále dělíme na otevřené a uzavřené v závislosti na propojenosti jednotlivých buněk. Toto dělení bylo dostačující pro klasifikaci materiálů vyráběných klasickými metodami jako například pěněním a lehčením u tuhých pěn nebo skládáním a lepením, popřípadě extruzí voštin. Aditivní výroba však rozšířila i možnosti v návrhu celulárních materiálů a je proto nutné rozšířit i jejich klasifikaci. [15] [21]

3.1 1. způsob dělení

Jednou z možností je přidání dalších kategorií tak, aby byly obsaženy i typy celulárních materiálů jako mřížkové struktury. Následující dělení je založeno na geometrii základní buňky a pravidelnosti jejich uspořádání.

1) 2,5D struktury

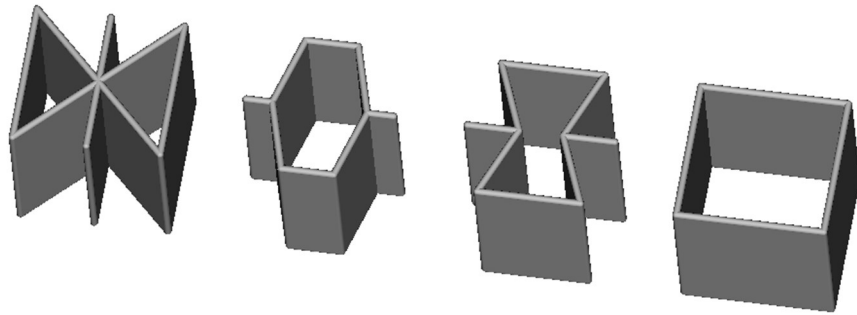
Do této skupiny patří již dříve zmíněné voštiny, jejichž geometrie je určena uspořádáním rovinných obrazců, které jsou následně vytaženy do prostoru. [15] Uspořádání obrazců v rovině může být:

a) Stochastické (náhodné)

Uspořádání vzniklé aplikací nějaké základní funkce, která obsahuje prvek nahodilosti. Velmi známým stochastickým dělením jsou tzv. Voroného diagramy. Ty ve své nejjednodušší podobě vznikají z náhodné množiny bodů (zárodků) v rovině, kolem kterých jsou generovány buňky. Buňka vznikne ze zárodku tak, aby všechny vnitřní body buňky ležely blíže ke svému zárodku než k zárodkům ostatním. Hranice buněk jsou pak ekvidistantní ke dvěma zárodkům. [21]

b) Pravidelné

Vzniká pravidelně se opakujícím rozdělením roviny jedním či více obrazci. Asi nejznámější pravidelným uspořádáním je vyplnění roviny šestiúhelníky. [21]



Obr. 7 Přehled pravidelných voštin z programu nTopology. Zleva trojúhelníková, šestiúhelníková, Re-entrant a čtvercová

2) 3D struktury

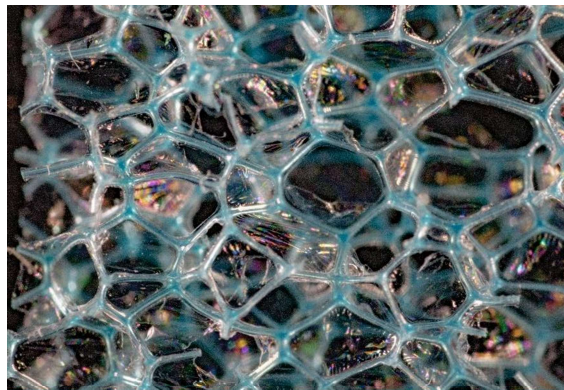
Do této skupiny můžeme zařadit celulární materiály jejichž základní buňky mají tvar mnohostěňů. Stejně jako v případě voštin lze i tyto struktury rozdělit na stochastické a pravidelné.

a) Stochastické

Materiály s náhodným uspořádáním a velikostí buněk můžeme označit za pěny. Jak bylo zmíněno v úvodu této kapitoly pěny dále dělíme na:

- **Otevřené (angl. open celled)**

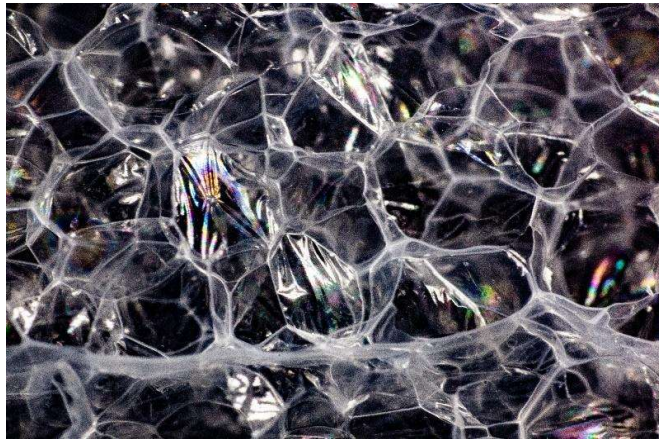
Jednotlivé buňky otevřených pěn jsou navzájem propojené a umožňují například nasákání vody. Příkladem otevřené pěny je molitan, nebo houbička na nádobí. [15]



Obr. 8 Makro fotografie otevřené pěny (houbička na nádobí)

- **Uzavřené (angl. closed celled)**

Struktura uzavřených pěn je tvořena navzájem oddělenými kapsami vyplněnými plynem nebo kapalinou. Uzavřené pěny nenasákají vodu. Příkladem aplikace polymerní uzavřené pěny jsou klasické karimatky. [15]



Obr. 9 Makro fotografie uzavřené pěny (balicí materiál)

b) Pravidelné

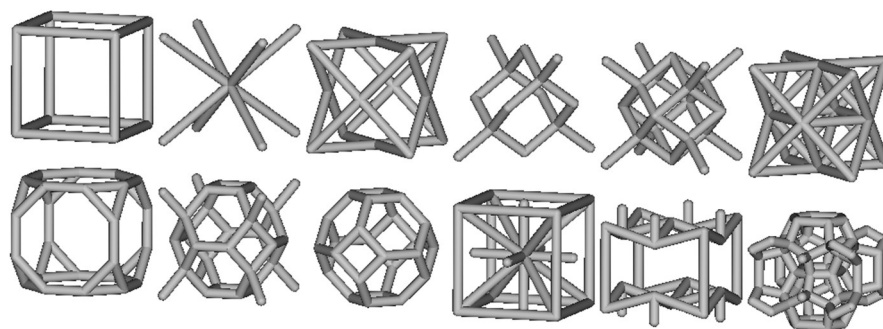
Za pravidelné celulární materiály považujeme takové, které jsou tvořeny periodickým opakováním základní buňky. Podle typu základní buňky je můžeme rozdělit na tři hlavní podskupiny. [3]

- **Příhradové struktury**

Tyto struktury jsou složeny z navzájem propojených prutů, nejčastěji kruhového průřezu a svým vzhledem připomínají příhradové konstrukce používané ve stavitelství. Příhradové struktury jsou relativně jednoduché a lze je, v omezené míře, modelovat i bez specializovaného softwaru. Stejně jako u klasických příhradových konstrukcí můžeme i u příhradových struktur vypočítat tvarovou určitost. Pro trojrozměrnou strukturu:

$$M = p - 3s + 6$$

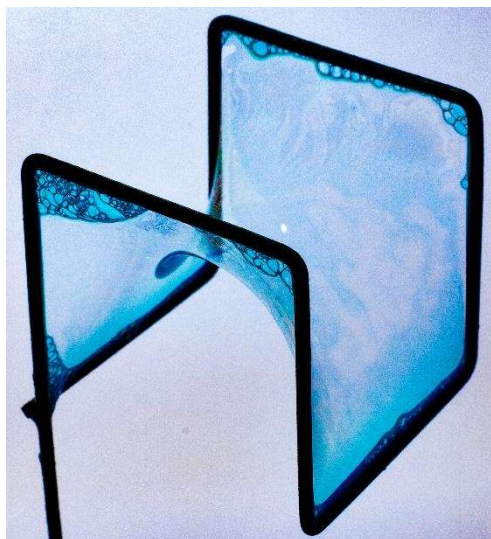
; kde p je počet prutů, s je počet styčnicků. Pokud $M < 0$, pak je struktura tvarově neurčitá a nedokáže vyrovnávat vnější zatížení bez vzniku ohybových napětí v prutech. Takové struktury jsou tvárné, deformují se rovnoměrněji a označujeme je za struktury s převládajícím ohybem (z angl. Bending-dominated). Na druhou stranu struktury s $M \geq 0$ jsou tvarově určité až přeúřčité. U těchto struktur je vnější zatížení vyrovnáno tahovým a tlakovým napětím v prutech. Z toho důvodu je označujeme za struktury s převládajícím tahem (z angl. stretch-dominated). Vyznačují se vysokou tuhostí a pevností vzhledem ke své hmotnosti. Zda se jedná o strukturu s převládajícím ohybem nebo tahem lze určit i u ostatních typů mřížek, ale samotné určení charakteru mřížky není tak přímočaré jako u příhradových struktur. [1] [3] [21]



Obr. 10 Přehled základních buněk některých příhradových struktur z programu nTopology. Horní řada zleva: Jednoduchá kubická, BCC, FCC, Diamond, Fluorite a Octet. Dolní řada zleva: Truncated cube, Truncated octahedron, Kelvin cell, IsoTruss, Re-entrant a Weaire-Phelan

- **Trojnásobně periodické minimální plochy (angl. Triply periodic minimal surfaces, TPMS)**

Základními buňkami těchto struktur jsou minimální plochy, které lze periodicky opakovat ve všech třech hlavních směrech tak, aby na sebe navazovaly. Jsou tedy trojnásobně periodické. Termín minimální plocha pochází z diferenciální geometrie a je to plocha, která je přiřazena prostorové uzavřené křivce tak, aby křivku obsahovala a měla minimální plochu. Minimální plochy jsou například vytvářeny mýdlovými bublinami na drátových rámech, které představují prostorové křivky. [3] [21] [22]

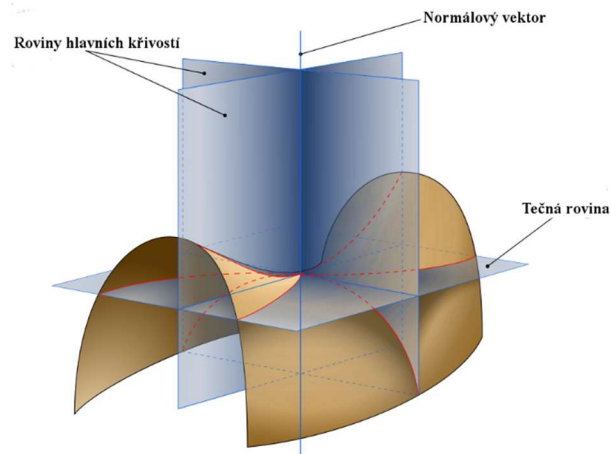


Obr. 11 Minimální plocha vytvořená mýdlovou bublinou na drátovém rámu. Jedná se o Sherkovu dvojité periodickou plochu

Z geometrického hlediska je plocha považována za minimální, pokud má ve všech bodech střední křivost rovnou nule. Střední křivost H je definována jako aritmetický průměr hlavních křivostí plochy v daném bodě.

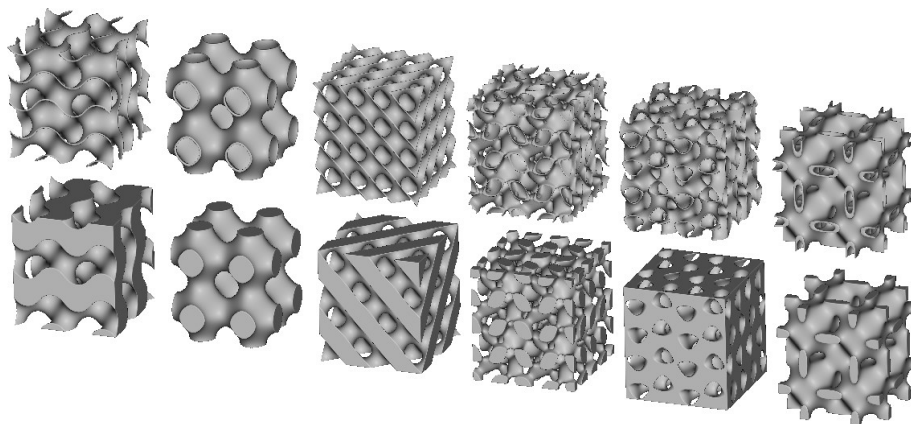
$$H = \frac{nk_{min} + nk_{max}}{2}$$

; kde nk_{min} a nk_{max} jsou normálové křivosti v hlavních směrech plochy.



Obr. 12 Schéma hlavních křivostí [24]

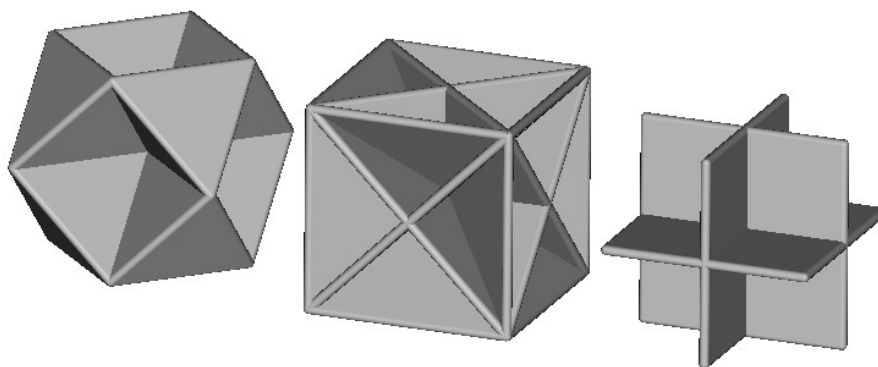
Na Obr. 12 je plocha s vyznačenými rovinami hlavních křivostí v sedlovém bodě. Normálové hlavní křivosti jsou v tomto bodě plochy stejně velké, ale opačné, takže střední křivost je zde rovna nule ($H = 0$). Pokud je tato podmínka splněna u všech bodů plochy, jedná se o plochu minimální. Použití struktur na základě TPMS by mohlo být výhodné například u implantátů vzhledem k jejich podobnosti se strukturou kosti. Příkladem trojnásobně periodických minimálních ploch jsou Gyroid, Schwarz P, Lidinoid nebo Neovius. [3] [21] [22]



Obr. 13 Přehled struktur odvozených z minimálních ploch v programu nTopology. Zleva Gyroid, Schwarz P, Schwarz diamond, Lidinoid, Split P a Neovius. Horní řada minimální plocha s přiřazenou tloušťkou. V dolní řadě je minimální plocha použita jako hranice

- **Deskové struktury (z angl. Plate-lattices)**

Struktura těchto mřížek je složena z desek nikoliv prutů. To sebou přináší problémy při výrobě některými aditivními technologiemi z důvodu uzavírání nespečeného prášku nebo nevytvrzeného polymeru uvnitř struktury. Tento problém lze vyřešit přidáním otvorů do jednotlivých desek. Deskové struktury jsou velmi slibné z hlediska tuhosti a pevnosti. Jejich tuhost může být až třikrát vyšší než u nejpevnějších příhradových struktur a blíží se teoretickému limitu pro isotropické porézní materiály. [3] [23]



Obr. 14 Přehled plátových struktur z programu nTopology. Zleva FCC foam, BCC foam a Simple cubic foam

3.2 2. způsob dělení

Toto dělení je založeno na klasifikaci mřížkových struktur ve třech krocích a klade si za cíl obsáhnout všechny možnosti, které jsou nyní k dispozici při výběru struktury pro konkrétní aplikaci. Těmito kroky jsou teselace prostoru, volba elementu struktury a konektivita jednotlivých elementů. Kombinace voleb z těchto tří kroků poté definuje konkrétní mřížku. [21]

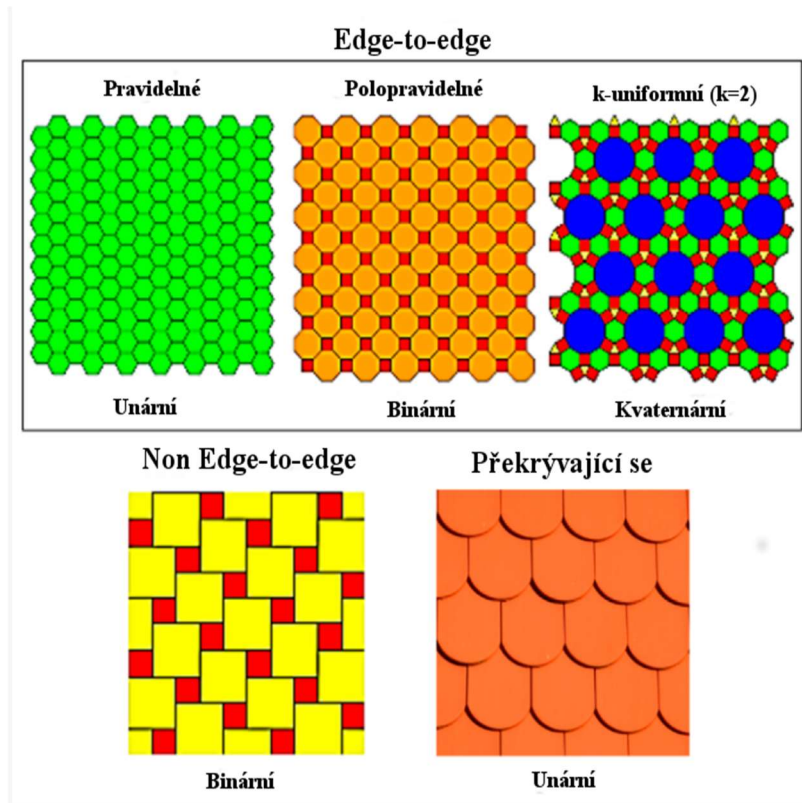
1) Teselace (z angl. **Tesellation**)

Mřížkové struktury dělí daný prostor na jednotlivé buňky. V prvním kroku je tedy nutné určit, jakým způsobem je prostor dělen. Tímto krokem je teselace, česky mozaikování. Pojem teselace v matematice označuje dělení roviny, prostoru a obecně i vyšších dimenzí bez mezer. [21]

Rovina, prostor mohou být děleny:

a) **Periodicky**

Periodické dělení spočívá ve výběru jednoho či více mnohoúhelníků v rovině nebo mnohostěně v prostoru a určení jejich vztahu. Podle počtu geometrických útvarů tvořících, opakující se, základní buňku rozlišujeme teselaci unární, binární, ternární atd. Vztah poté definuje, jak jsou tyto útvary propojené mezi sebou. Nejčastěji používaným uspořádáním je edge-to-edge, při kterém útvary sdílí celé hrany/stěny, pokud se dotýkají ve více než jednom bodě. Opakem tohoto uspořádání je non edge-to-edge. Teselace také může být pravidelná (všechny útvary jsou identické) nebo polopravidelná (více než jeden druh). Z hlediska uzlů (body, kde se setkávají tři nebo více útvarů) můžeme hovořit o k-uniformních teselacích, kde k je počet unikátních uzlů. Uzel je definován typem a pořadím útvarů kolem sebe. Jako příklad vezměme 1 - uniformní teselaci, která má pouze jeden typ uzlu. To znamená, že pokud vybereme dva libovolné uzly je vždymožné je přesunutím, otočením a/nebo převrácením dokonale překrýt přes sebe. Jako poslední lze uvést překrývání, které není čistě součástí teselace, ale může nastat. Příkladem překrývání jsou například střešní tašky nebo šupiny. [21] [25]



Obr. 15 Výběr teselací [21]. Schémata převzata z [26]

b) Stochasticky

Stochastické dělení bylo již zmíněno v předchozím způsobu dělení. I zde se jedná o náhodné rozdělení roviny, prostoru. Mezi taková dělení patří výše uvedené Voroného dělení, Poissonův proces nebo modely růstu krystalů. [21]

c) Hierarchicky

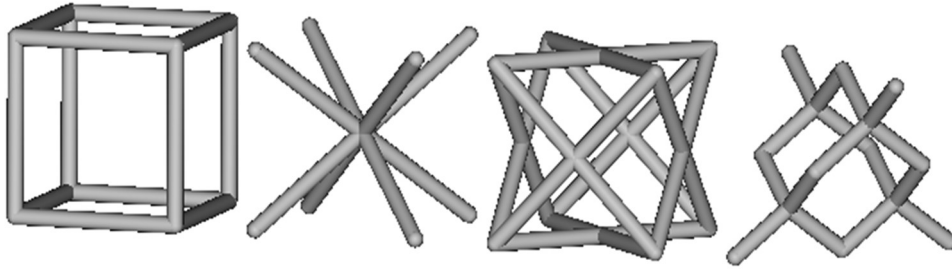
Hierarchické uspořádání struktur je velmi běžné v přírodě a jedním z příkladů je větvení, které lze pozorovat například u struktury již zmíněných křídel vážky, nebo listů, kde se hlavní žilky postupně rozbíhají na tenčí, ty na ještě tenčí atd. [21]

2) Element

Elementy tvořící základní buňky jsou pruty nebo plochy. Pruty mohou být libovolného průřezu, s konstantní nebo proměnnou tloušťkou, rovné nebo zakřivené. Plochy mohou být roviny, jak tomu je v případě deskových struktur, nebo zakřivené. Významnou skupinou zakřivených ploch jsou plochy minimální, především TPMS. [21]

3) Konektivita

Na závěr je specifikováno, jakým způsobem jsou elementy v rozděleném prostoru propojeny. Toho je například u příhradových struktur dosaženo určením polohy styčniců a definováním jejich propojení. Příklady rozdílné konektivity u kubické pravidelné teselace a prutového elementu s kruhovým konstantním průřezem jsou vidět na Obr. 16. [21]



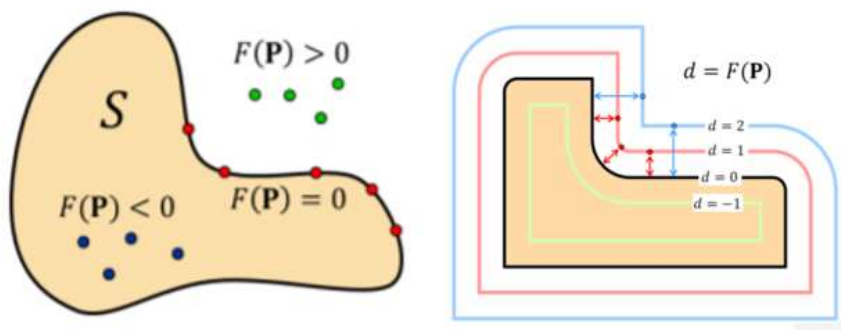
Obr. 16 Příklady rozdílné konektivity. Kubická teselace, element prut

4 Software nTopology

Tvorba modelů mřížkových struktur v klasických CAD softwarech (Inventor, Solid Edge, Catia atd.) je velmi složitá. Použití těchto programů, pro praktické aplikace mřížkových struktur, je z toho důvodu, téměř nemožné a omezené pouze na velmi jednoduché případy. Pro návrh zkušebních těles a tvorbu mřížkových struktur byl proto použit specializovaný software nTop verze 2.12.5 od společnosti nTopology Inc. poskytnutý pod akademickou licenci v rámci programu nTopEd. [27]

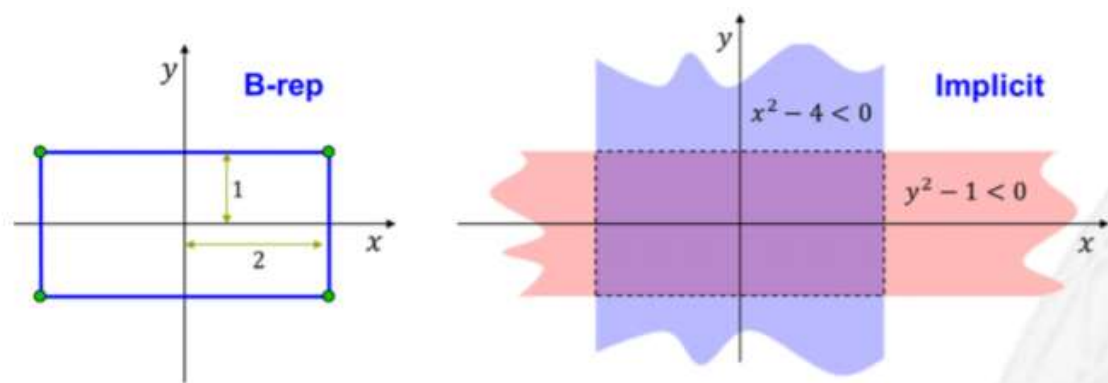
4.1 Srovnání hraniční reprezentace s implicitním modelováním

Software nTop je platforma spojující v sobě návrh, simulaci, optimalizaci a přípravu dílů pro tisk. Kromě svého zaměření na aplikaci mřížkových struktur a aditivní výrobu se od klasických CAD softwarů liší především způsobem jakým jsou v nTop definované objekty. Všechny hlavní CAD programy využívají pro reprezentaci objektů jejich hranici (vnější obálku). Takový způsob se nazývá hraniční reprezentace (z angl. *Boundary representations*, B-reps). Hranicemi objektu mohou být například roviny, plochy, hrany, které společně s informací o jejich vzájemné konektivitě definují dané těleso. Tento systém modelování je však nevhodný pro složité geometrie s velkým množstvím prvků, jakými jsou právě mřížkové struktury. nTop je proto založena na implicitním modelování, které k popisu těles využívá implicitních funkcí. Implicitní funkce objektu je matematická funkce, která přiřadí každému bodu v prostoru hodnotu. Hlavní vlastností takové funkce je, že přiřazená hodnota je záporná pro body ležící uvnitř objektu a kladná pro body ležící vně. Pro body ležící na hranici objektu je hodnota implicitní funkce rovna nule. Znaménko výsledku implicitní funkce v daném bodě, tak určuje, zda bod leží uvnitř nebo vně tělesa a velikost výsledné hodnoty poskytuje informaci o jeho vzdálenosti od hranice tělesa. [27]



Obr. 17 Ilustrace vlastností implicitní funkce $F(P)$ [27]

Rozdíl mezi B-reps modelováním a implicitním modelováním lze ilustrovat na jednoduchém příkladu obdélníku v rovině viz Obr. 18

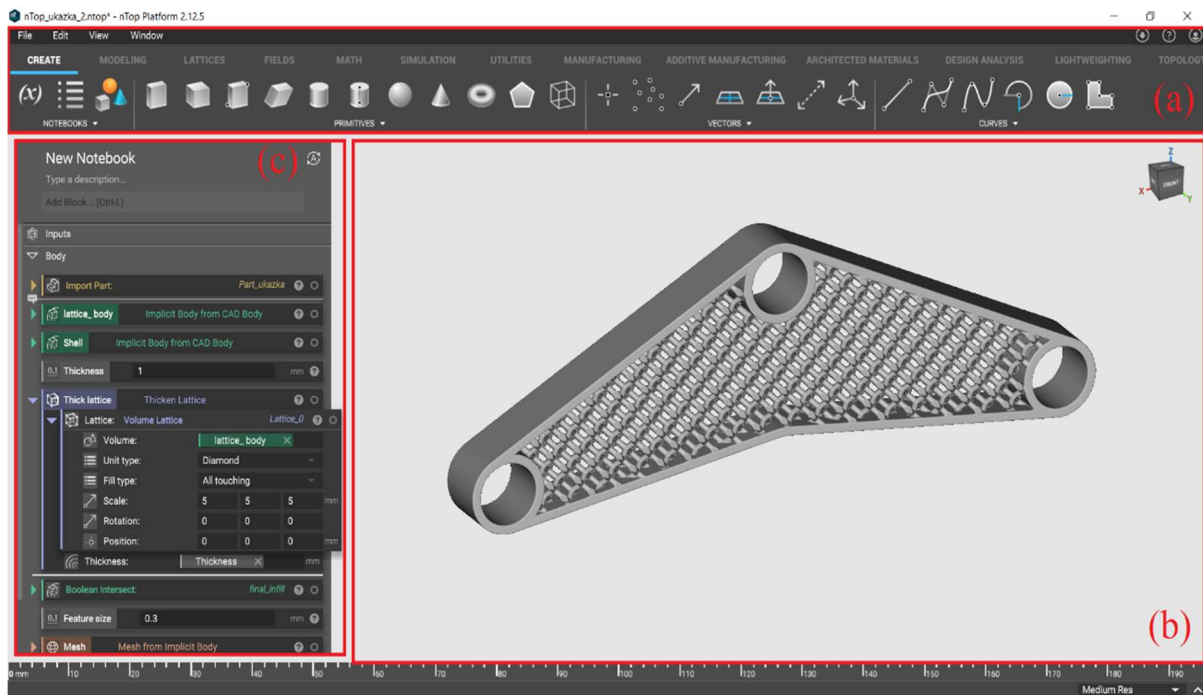


Obr. 18 Porovnání b-reps a implicitního popisu [27]

V případě B-reps modelování by byl obdélník definován čtyřmi úsečkami a jejich vzájemnou konektivitou. Pro implicitní popis obdélníku musíme najít implicitní funkci. Bod $[x,y]$, který leží uvnitř obdélníku musí ležet zároveň v modré i růžové oblasti, a tudíž musí zároveň splňovat obě podmínky $x^2-4 < 0$ a $y^2-1 < 0$. Pokud splňuje obě podmínky pak platí, že $\max\{x^2-4; y^2-1\} < 0$. Jednou z možných implicitních funkcí pro popis zadaného obdélníku je pak $F(x,y) = \max\{x^2-4; y^2-1\}$. Tato funkce nabývá záporných hodnot uvnitř obdélníku, nulových na hranici a kladných vně obdélníku. Mezi výhody implicitního modelování patří například snadnější provedení booleovských operací, výpočet zaoblení, snadnější škálování a menší velikosti souborů pro složité modely. [27]

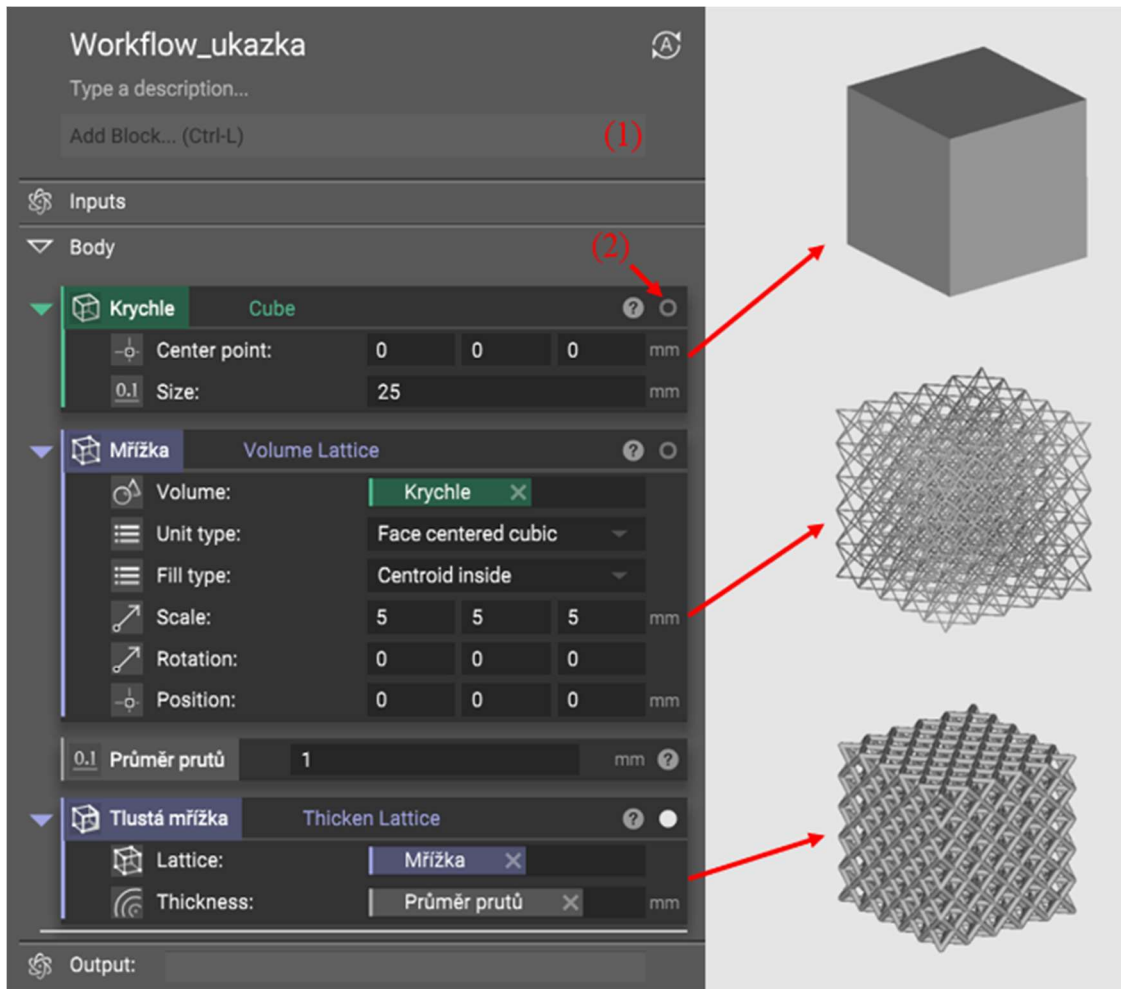
4.2 Prostředí nTop

Uživatelské rozhraní programu nTop se skládá ze tří základních částí, jak je patrné na Obr. 19. V horní části (a) okna se zobrazují jednotlivé nástroje rozdělené do záložek. V pracovním prostoru (b) je zobrazen aktuální model. Na rozdíl od ostatních CAD programů není tento prostor využíván k modelování, ale jeho hlavní funkcí je vizualizace a podpůrné činnosti jako výběr částí modelu. Nejdůležitější částí rozhraní je část (c) ve které se pomocí jednotlivých bloků sestavuje tzv. workflow. Workflow je ve své podstatě programový skript, který obsahuje jednotlivé úkony prováděné softwarem. Při změně jakéhokoliv parametru, nTop přepočítá všechny bloky ovlivněné touto změnou. Tyto workflow lze přenášet, modifikovat, nebo spojovat dohromady. To umožňuje aplikaci již hotových workflow na analogické díly a snadnou spolupráci mezi více osobami. Pokud například pozměníme vstupní model, není nutné vše modelovat znovu, ale stačí pouze importovat nový model a workflow v případě nutnosti pouze upravit.



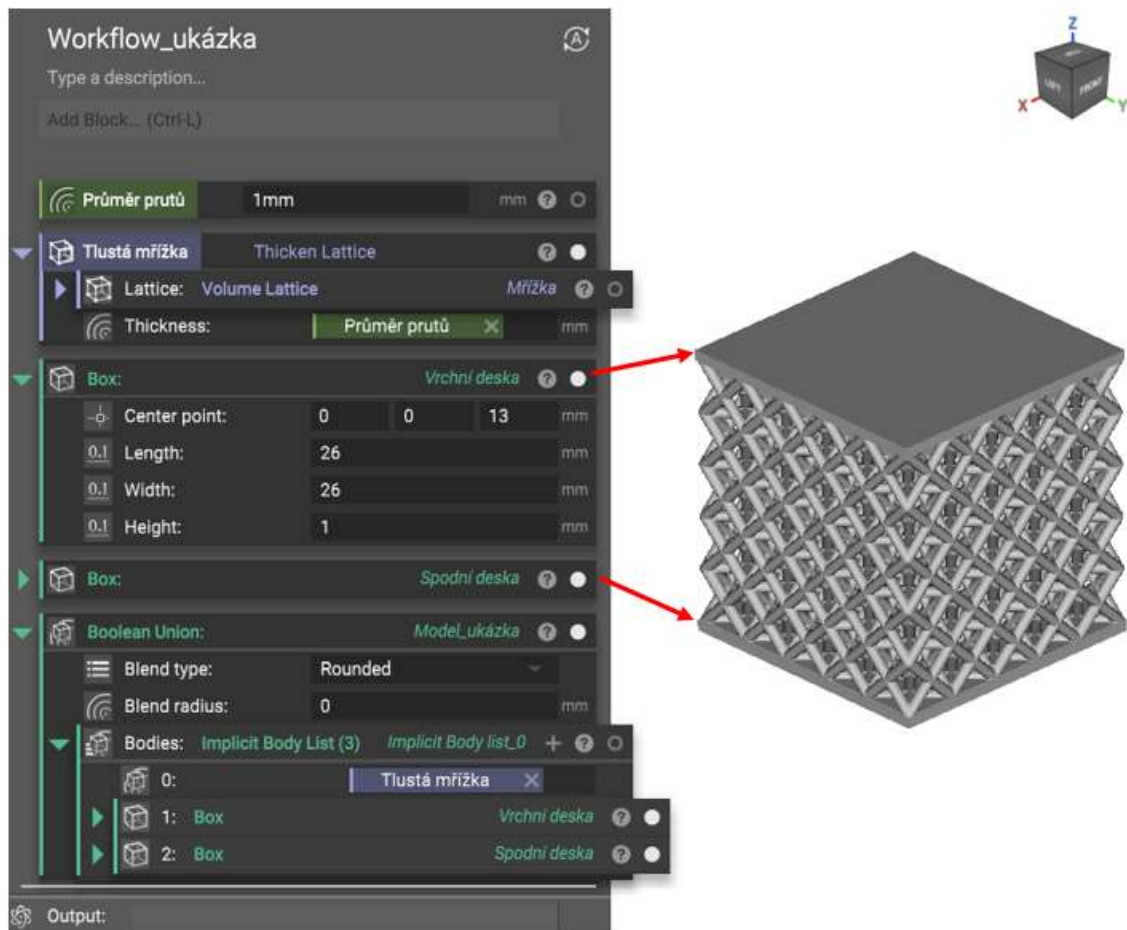
Obr. 19 Rozvržení uživatelského prostředí softwaru nTop

Práce s workflow bude ilustrována na jednoduchém příkladu (Obr. 20 až 23). V tomto příkladě je vytvořen model analogický k tělísku na tlakovou zkoušku. Základem je krychle vyplněná kubickou plošně středěnou mřížkou. Prvním blokem *Krychle* je vytvořena krychle o hraně 25 mm se středem v počátku. Následuje blok *Mřížka*, který v zadaném objemu vygeneruje mřížkovou strukturu o zvolené základní buňce, dané velikosti a orientaci. V bloku *Thustá mřížka* je vygenerované mřížce přiřazena tloušťka prutů o velikosti 1 mm. Průměr prutů nicméně není zadán přímo do bloku, ale byla z tohoto parametru vytvořena proměnná, která se objeví v samostatném bloku. Protože jednotlivé bloky lze libovolně přesouvat usnadňuje tvorba proměnných změnu parametrů a přispívá k přehlednosti. Na Obr. 20 je také číslem (1) označeno okno vyhledávání, které lze použít k přidávání jednotlivých bloků místo nabídky na horním okraji okna. Číslem (2) je pak označeno tlačítko viditelnosti výsledku příslušného bloku. V našem příkladě je tedy viditelná pouze finální struktura vytvořená blokem *Thustá mřížka*.



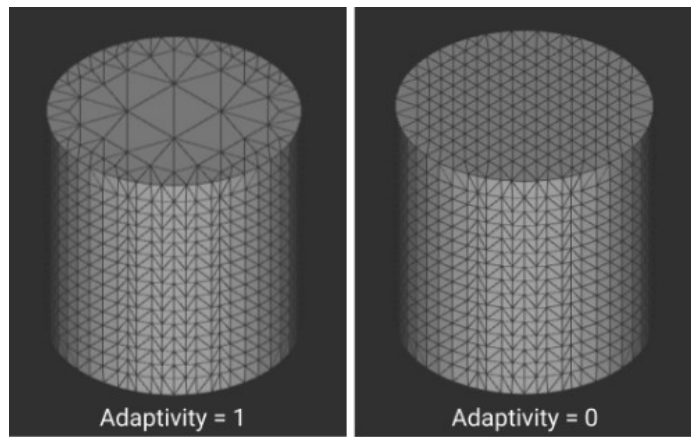
Obr. 20 Ukázka workflow I

V dalším kroku jsou vytvořeny krajní desky, dosedací plochy, pomocí bloku *Box*, pro který jsou vstupními parametry rozměry kvádra a poloha jeho středu. Posledním krokem v tvorbě implicitního modelu je booleovské sjednocení tlusté mřížky, spodní a vrchní desky. Tím získáme jedno těleso, které můžeme dále zpracovat pro export.



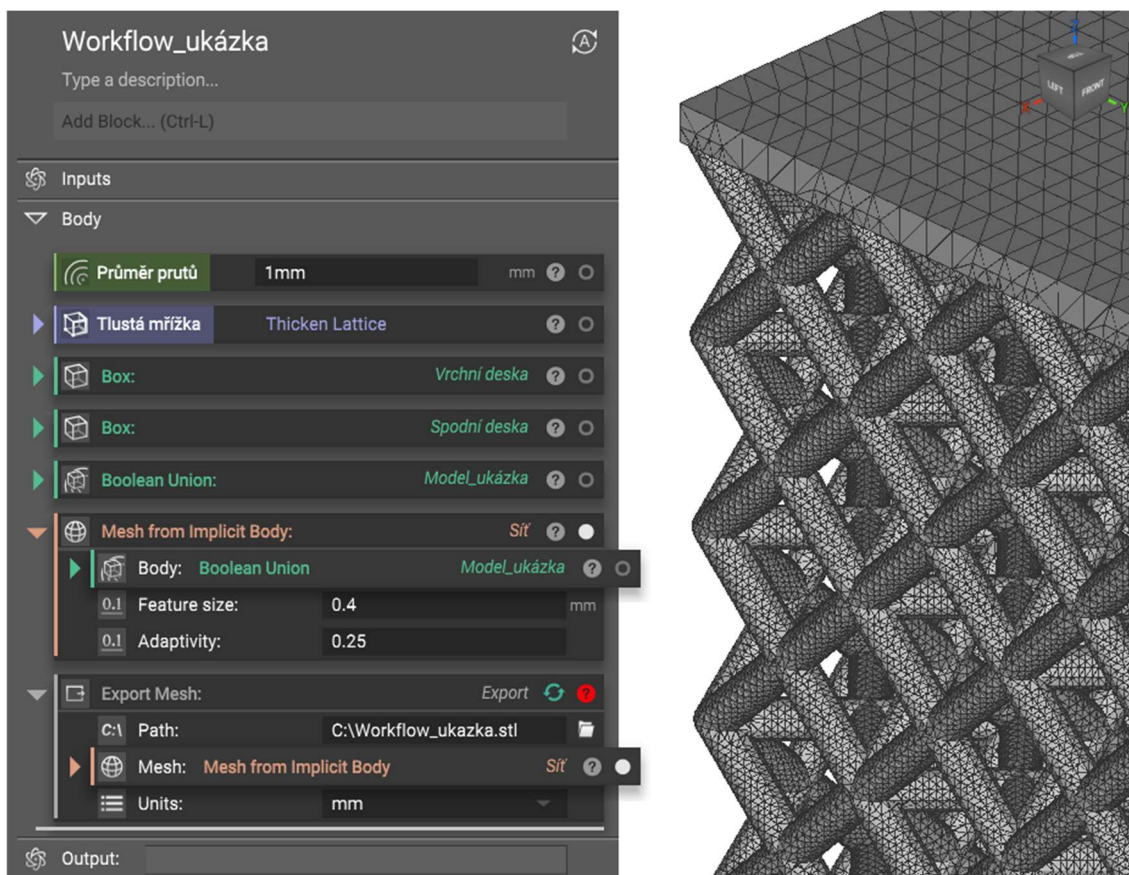
Obr. 21 Ukázka workflow II

Export modelu začneme vytvořením sítě z implicitního modelu pomocí bloku *Mesh from implicit body*, jehož vstupem je těleso, které chceme zesíťovat a parametry *Feature size* a *Adaptivity*. *Feature size*, neboli velikost elementů určuje hrubost generované sítě a má největší vliv na velikost výsledného souboru. Zadává se v milimetrech a její velikost by měla být menší, než je nejmenší detail modelu, který chceme sítí reprodukovat. *Adaptivity* je parametr, jehož hodnota je větší než 0 a ovlivňuje, zda se elementy generované sítě budou zvětšovat na plochých částech modelu či nikoli. Při hodnotě *adaptivity* rovné nule nedojde k žádnému hrubnutí sítě a výsledkem bude homogennější a přesnější síť. Příklad vlivu *adaptivity* na generovanou síť je vidět na Obr. 22.



Obr. 22 Vliv adaptivity na výslednou síť [31]

Po vygenerování sítě zbývá pouze export modelu v požadovaném formátu. Toho docílíme blokem *Export Mesh*. V tomto bloku zadáme síť, kterou si přejeme exportovat, cestu, kam se má výsledný soubor uložit a jednotky ve kterých bude výsledný soubor. Pro export nabízí nTop následující formáty: STL, OBJ, PLY a 3MF.



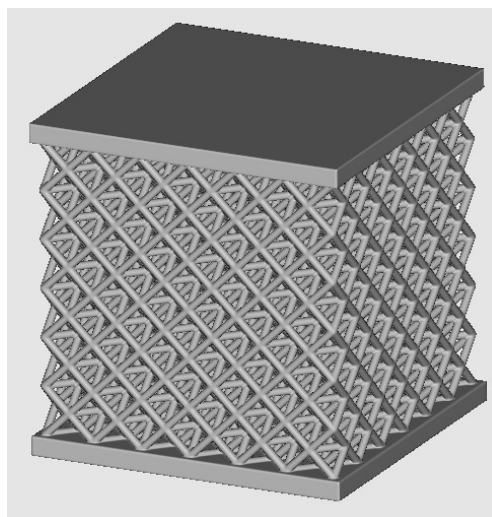
Obr. 23 Ukázka workflow III

5 Návrh zkušebních tělísek

Za účelem provedení mechanických zkoušek mřížkových struktur byla navržena zkušební tělíska pro zkoušku tlakem, tahem a ohybem. Z důvodu minimalizace nákladů a doby tisku byla zvolena co nejmenší velikost tělísek s ohledem na dosažitelné rozlišení tisku. Rozměry základní buňky vycházely z minimální tloušťky stěny, kterou lze na použité tiskárně vytvořit s dostatečnou přesností, aby byla zajištěna dobrá shoda rozměrů modelu s vytištěným tělískem. Tato minimální tloušťka stěny byla stanovena na 0,4 mm. Od tloušťky stěny/průměru prutů byla poté odvozena velikost základní buňky tak, aby nedocházelo ke ztrátě geometrie mřížkové struktury vlivem kombinace příliš silné stěny a malé základní buňky. Z těchto omezení byla stanovena velikost základní buňky na 2,5 mm, což je v souladu s velikostí buněk objevujících se v literatuře. [3] Tyto parametry jsou stejné pro všechny typy zkušebních tělísek. Rozměry zkušebních tělísek jsou poté založeny na několikanásobném zopakování základní buňky a na požadavcích pro konkrétní zkoušku.

5.1 Zkouška tlakem

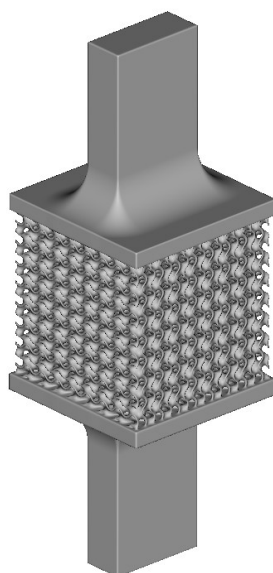
Pro provedení tlakových zkoušek mřížkových struktur bylo navrženo zkušební tělísko sestávající se z krychle o hraně 15 mm zakončené na spodní a vrchní straně deskou z plného materiálu o tloušťce 1 mm. Tyto desky mají za úkol zakončení volných konců struktury a definici dosedacích ploch při přechování. Základní buňka je ve všech směrech zopakována 6krát. Bylo zvažováno i zkušební tělísko o výšce 25 mm, kde by se ve směru zatížení základní buňka opakovala 10krát, ale z důvodu zkrácení času tisku a úspory materiálu byl tento návrh opuštěn.



Obr. 24 Model tělíska pro zkoušku tlakem

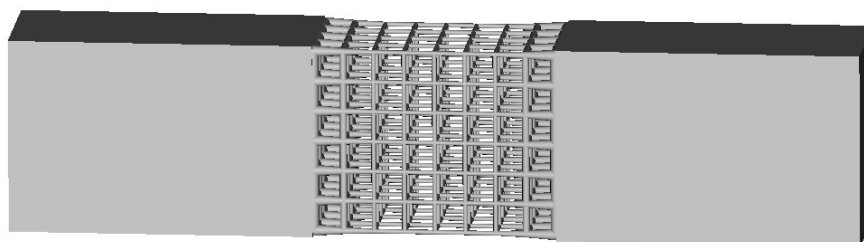
5.2 Zkouška tahem

Prvotní návrh zkušebního tělíska je vidět na Obr. 25. Tento návrh vycházel z tělíska pro zkoušku tlakem a byl opuštěn z několika důvodů. Zaprvé neumožňuje tisk zkušebního tělíska v různých orientacích bez přidání podpor. Zadruhé nelze jednoduše zaručit, že nebude docházet k deformaci v upínací části vzorku z důvodu menší plochy příčného průřezu, než je plocha mřížkové struktury a zatřetí by s velkou pravděpodobností docházelo k průhybu tenkých desek na spodním a vrchním okraji struktury.



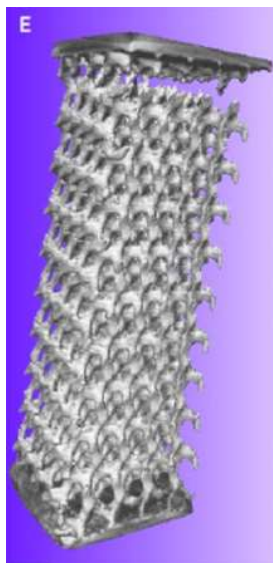
Obr. 25 Prvotní návrh tělíska pro zkoušku tahem

Finální tělíska pro zkoušku tahem bylo navrženo kolem oblasti vyplněné mřížkovou strukturou ve tvaru kvádrů se základními rozměry 15 x 10 x 20 mm. Po obou stranách mřížkové struktury jsou upínací části o délce 25 mm. Celková délka zkušebního tělíska je tak 70 mm. I zde byla snaha o minimalizaci rozměrů tělíska, a to především celkové délky. Celková délka má velký vliv na čas tisku, protože vzorky byly tištěny na výšku. Délka upínacích částí byla stanovena na základě požadavků bezpečného upnutí v klínových čelistech trhacího stroje a dále viditelnosti zkoušené oblasti mřížkové struktury. Namáhaná struktura by mohla být, při nedostatečné délce upínacích částí zakryta čelistmi trhacího stroje a nebylo by možné pozorovat průběh a charakter deformace.



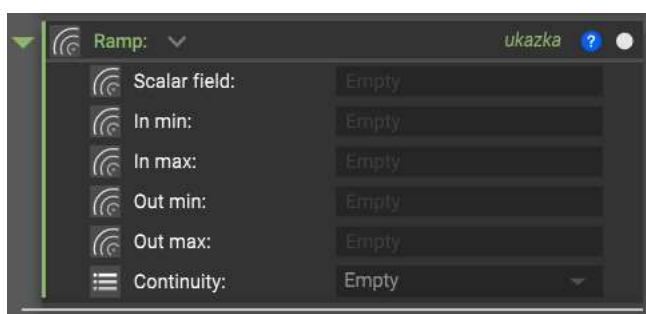
Obr. 26 Model tělíska pro zkoušku tahem

Zkouška tahem mřížkových struktur je v literatuře méně obvyklá než zkouška tlakem z důvodu složitější interakce mezi tělískem a zkušebním strojem. Při tahových zkouškách například dochází často k praskání vzorků v oblasti přechodu struktury do upínací části. V této oblasti je skoková změna vlastností, která vede ke koncentraci napětí. [3] [28]



Obr. 27 CT sken vzorku tahové zkoušky u kterého došlo k porušení v oblasti přechodu do upínací části [28]

Při návrhu zkušebního tělíska byla podniknuta snaha o omezení tohoto efektu vytvořením plynulejšího přechodu mezi mřížkovou strukturou a upínacími částmi. Tento přechod byl vytvořen pomocí bloku *Ramp* v programu nTop. Blok *Ramp* umožňuje plynulou změnu průměru prutů nebo tloušťky stěny struktury. Pro definici bloku *Ramp* je nutné zadat několik parametrů, jak je vidět na Obr. 28.



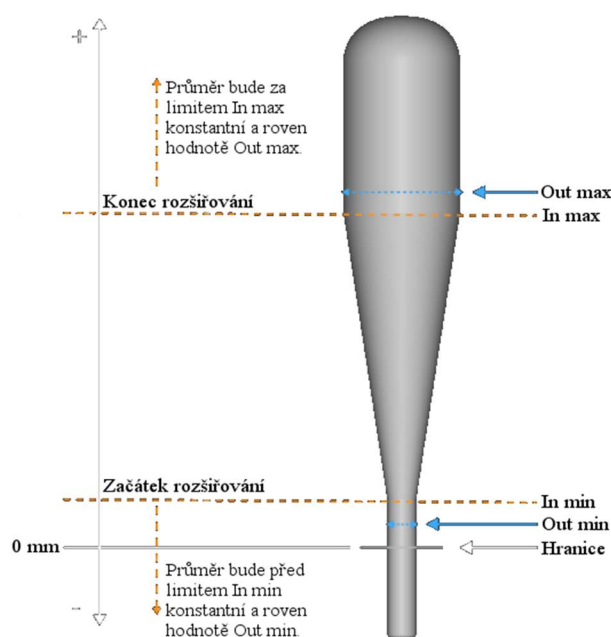
Obr. 28 Blok ramp funkce

Scalar field definuje hranici a nulový bod od kterého se odvíjí následující parametry. Hranicí může být například těleso, bod, rovina atd. Hodnota *In min* definuje, v jaké vzdálenosti od hranice začne změna například průměru prutu. *In max* určuje v jaké vzdálenosti od hranice změna končí. *Out min* je výstupní hodnota, kterou bude funkce nabývat do limitu *In min* a *Out max* je hodnota, kterou funkce nabývá za limitem *In max*. *Spojitosť (Continuity)* určuje jakým způsobem dochází ke změně

výstupu v mezích *In min* až *In max*. Spojitost může být poziční G0 (Geometric), tečná G1 (Tangent) a křivostní G2 (Curvature). Rozdíly mezi typy spojitosti jsou patrné na Obr. 29 a grafické znázornění ramp funkce na Obr. 30.

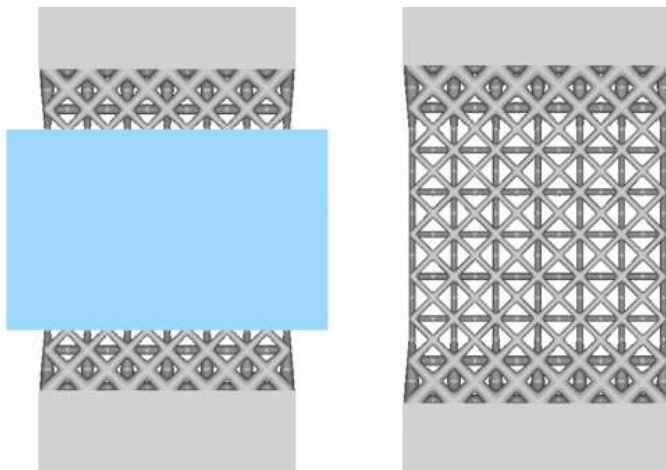


Obr. 29 Ukázky spojitostí [29]



Obr. 30 Grafické znázornění ramp funkce [29]

V případě navrhovaného zkušebního tělíska byl jako hranice zvolen kvádr o výšce 12,5 mm znázorněný na Obr. 31 modře. Hodnoty $In\ min = 0\ mm$, rozšiřování tedy začíná hned na hranici definované modrým kvádrem a $In\ max = 3,5\ mm$. $Out\ min$ je rovno základnímu průměru prutu/tloušťce stěny tj. 0,4 mm a $Out\ max = 1\ mm$. Spojitost byla zvolena poziční G0 (Geometric). Z těchto parametrů vyplývá, že zkoušená oblast obsahuje ve směru zatížení 5 buněk se základním průměrem prutů a na obou stranách přechodovou oblast o výšce 3,75 mm tj. 1,5 buňky. Dalším důsledkem zvětšení průměru prutů až na 1 mm byla nutnost zvětšení příčného průřezu upínací části na 11 x 16 mm.

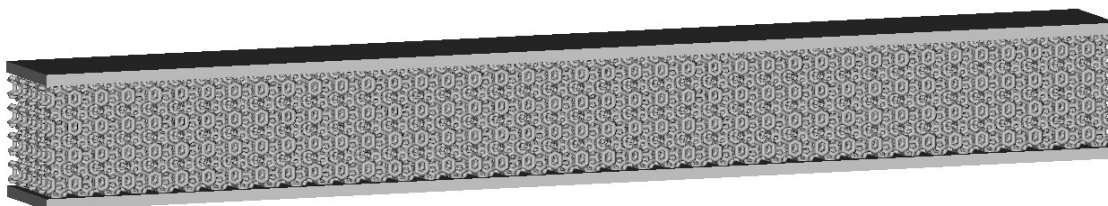


Obr. 31 Modře vyznačená hranice ramp funkce (vlevo) definuje prostor, kde nedojde k modifikaci mřížkové struktury. Vpravo je vidět vliv ramp funkce na zkušební tělísko tahové zkoušky

Takto navržené tělísko pro zkoušku tahem je možné tisknout ve více orientacích což umožňuje například zkoumání vlivu orientace při tisku na mechanické vlastnosti struktur. Dále je z jeho geometrie zaručeno, že upínací část bude mít vždy větší plochu příčného řezu než zkoumaná struktura. Funkčnost navrženého tělíska a vliv vytvoření plynulého přechodu mezi mřížkovou strukturou a upínacími částmi bude ověřen v praktické části této práce.

5.3 Zkouška ohybem

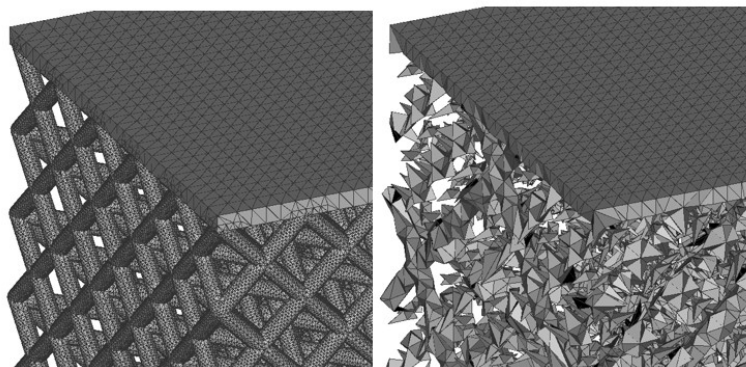
Zkušební tělísko a podmínky zkoušení vychází z normy ČSN EN ISO 7438 Kovové materiály – zkouška ohybem. Po prvotní analýze byl tvar vzorku i podmínky zkoušení modifikovány s ohledem na mřížkové struktury. Pro zkoušku ohybem bylo navrženo tělísko, které se skládá z oblasti vyplněné mřížkovou strukturou o rozměrech 10 x 10 x 100 mm, která je na spodní a vrchní straně zakončena deskami z plného materiálu o tloušťce 1 mm. Tyto desky budou do určité míry ovlivňovat výsledné mechanické vlastnosti vzorku, ale jsou nezbytné pro zakončení volných konců struktury a snahu o eliminaci vnikání válečků zkušebního stroje do vzorku. Při porovnávání jednotlivých struktur mezi sebou lze vliv desek zanedbat. Zkušební tělísko s deskami z plného materiálu je také blíže aplikacím mřížkových struktur v reálných dílech, kde je na povrchu ponechána tenká skořepina a jádro dílu je odlehčeno mřížkovou strukturou.



Obr. 32 Model tělíska pro zkoušku ohybem

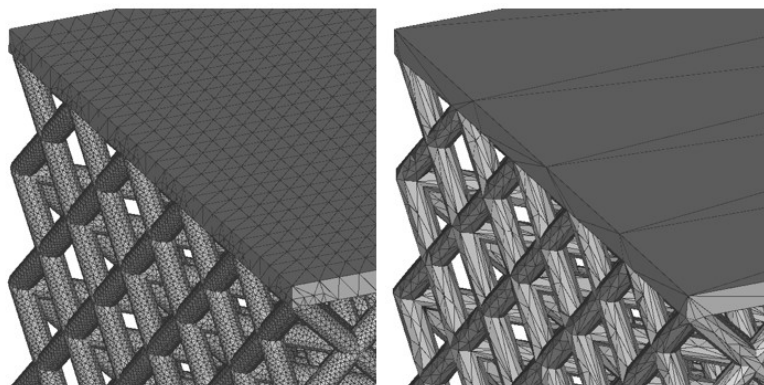
5.4 Zjednodušování generovaných sítí

Modely generované SW nTop obsahují velké množství elementů což má za důsledek větší velikosti souborů. Velikost souborů poté komplikuje například další zpracování modelů pro tisk. Jedním z hlavních parametrů, který ovlivňuje složitost generované sítě a tím i velikost souborů je velikost elementů (angl. Feature size) viz blok *Mesh from Implicit Body* na Obr. 23. Vhodná výchozí velikost elementů se uvádí jako 1/3 nejmenšího detailu nebo nejmenšího průměru díry, který chceme výslednou sítí zachytit. Při generování sítí modelů mřížkových struktur však lze velikost elementů zvětšovat jen do určité hodnoty, než dojde k vygenerování nepoužitelného výsledku. [32]



Obr. 33 Příklad vygenerování nepoužitelné sítě mřížkové struktury s průměrem prutů 1 mm. Vlevo velikost elementů sítě 0,3 mm a vpravo 0,9 mm

Kromě zvětšování velikosti elementů lze velikost výsledného souboru zmenšit pomocí bloků *Simplify Mesh by Amount* a *Simplify Mesh by Threshold*, které zjednoduší vybranou síť, snížením počtu elementů, na základě zadané hodnoty. V případě bloku *Simplify Mesh by Amount* se zadává vstupní hodnota v intervalu 0 až 1, která vyjadřuje procentuální snížení počtu elementů. V případě bloku *Simplify Mesh by Threshold* se zadává hodnota v mm, která simuluje výrobní toleranci. Na Obr. 34 je vidět příklad zjednodušené sítě pomocí bloku *Simplify Mesh by Amount* se vstupní hodnotou 0,9. Velikost exportovaného STL souboru před zjednodušením byla 40 925 kB a po zjednodušení 4 082 kB.

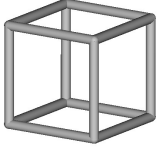
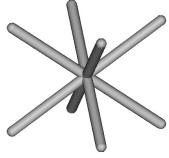
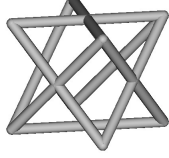
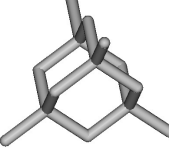
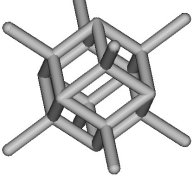
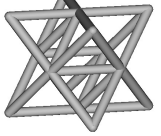
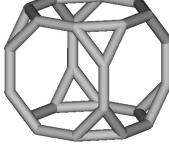


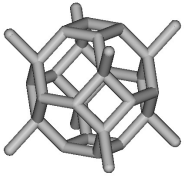
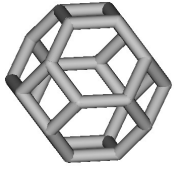
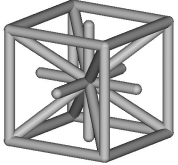
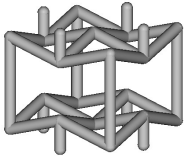
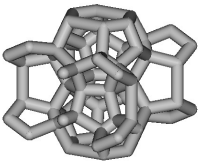
Obr. 34 Příklad STL sítě před zjednodušením (vlevo) a po zjednodušení (vpravo)

6 Vybrané mřížkové struktury

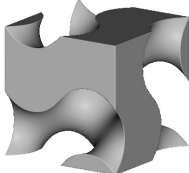
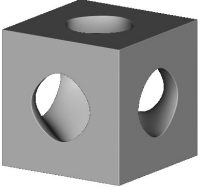
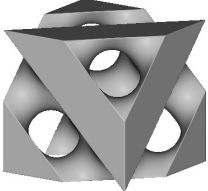
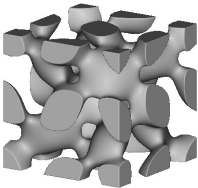
Dle návrhu zkušebních těles byly vytvořeny modely vzorků pro vybrané mřížkové struktury dostupné v platformě nTop. Struktury byly z dostupných možností vybrány na základě vyrobiteľnosti metodu SLM a funkčnosti jejich geometrie při kombinaci zvolené velikosti základní buňky s tloušťkou stěny, respektive průměrem prutů. Níže je uveden přehled základních buněk mřížkových struktur, pro které byly vygenerovány modely zkušebních těles. Názvy struktur jsou uvedeny v angličtině a odpovídají označení v platformě nTop.

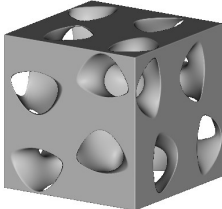
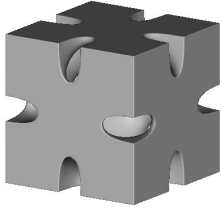
6.1 Příhradové struktury

Simple cubic	
Body centered cubic (BCC)	
Face centered cubic (FCC)	
Diamond	
Fluorite	
Octet	
Truncated cube	

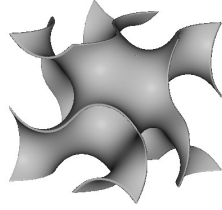
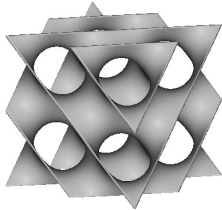
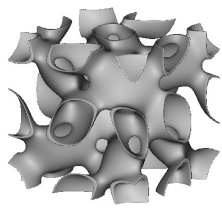
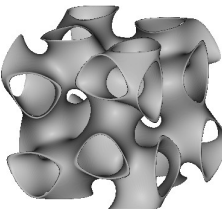
Truncated Octahedron	
Kelvin cell	
IsoTruss	
Re-entrant	
Weaire-Phelan	

6.2 Trojnásobně periodické minimální plochy jako hranice (TPMS)

Gyroid	
Schwarz	
Diamond	
Lidinoid	

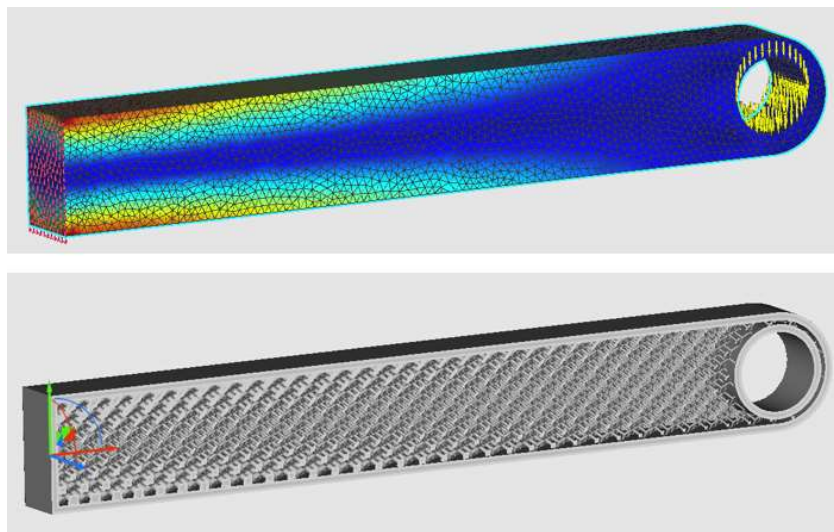
<p style="text-align: center;">SplitP</p>	
<p style="text-align: center;">Neovius</p>	

6.3 Trojnásobně periodické minimální plochy s přiřazenou tloušťkou (Walled TPMS)

<p style="text-align: center;">Gyroid</p>	
<p style="text-align: center;">Diamond</p>	
<p style="text-align: center;">Lidinoid</p>	
<p style="text-align: center;">SplitP</p>	

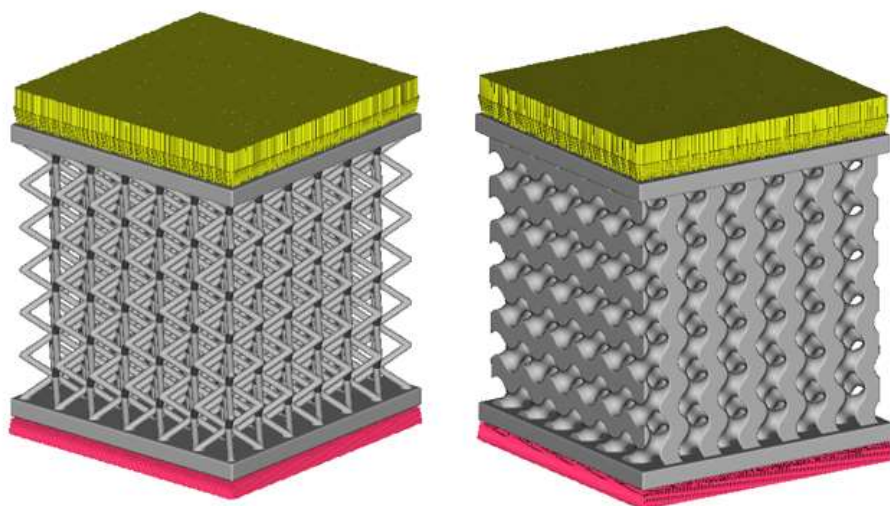
7 Simulace a Field-Driven design

Platforma nTop umožňuje i provedení simulace metodou konečných prvků. V současné době obsahuje statickou analýzu, frekvenční analýzu, simulaci vzpěru a tepelnou analýzu. Simulace neslouží jen k ověření aktuálního návrhu součásti, ale jejich výstup lze přímo využít k úpravě parametrů modelu. Výstupem jsou, v závislosti na typu simulace, napěťová, deformační, teplotní a jiná pole, která lze ze simulace exportovat a použít je například jako modifikátor vlastností mřížkové struktury (průměr prutu, hustota, velikost buněk atd.) Tento přístup je označován jako polem řízený návrh (z angl. Field-Driven Design). Na Obr. 35 je uveden příklad polem řízeného návrhu, kdy bylo napěťové pole ze statické analýzy vetknutého nosníku použito pro ovlivnění průměru prutů mřížkové struktury.



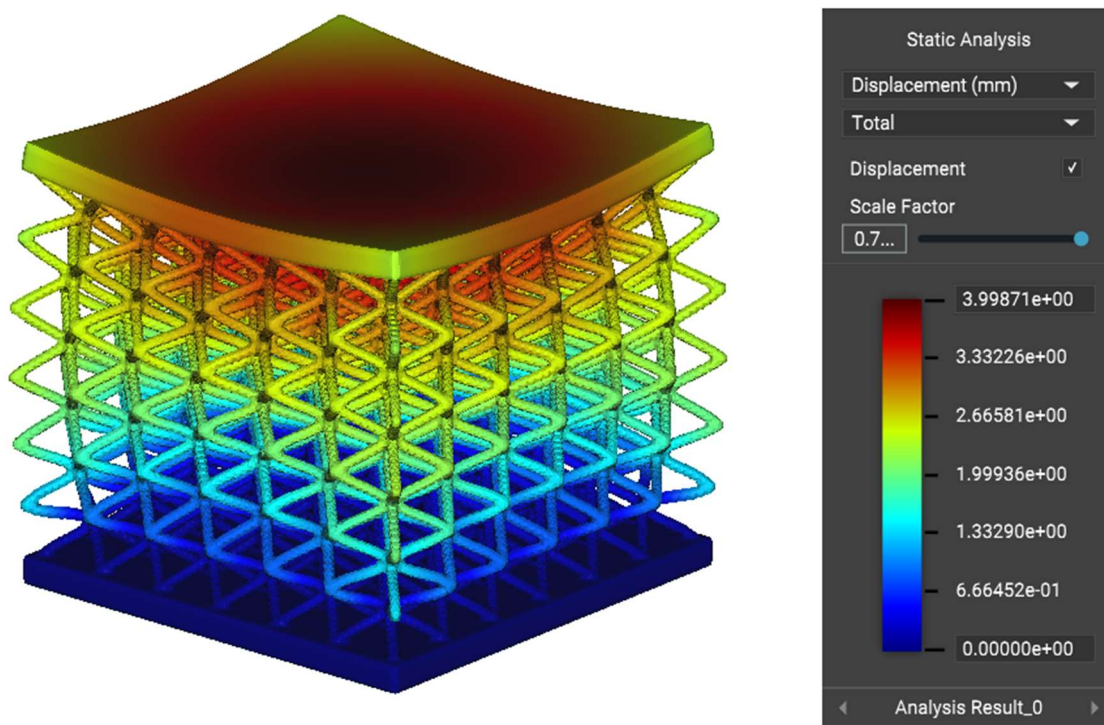
Obr. 35 Field-Driven design

V rámci testování možností platformy nTop byla provedena statická analýza dvou vzorků pro zkoušku tlakem. Prvním vzorkem byla kubická tělesně středěná mřížková struktura BCC a druhým vzorkem byla TPMS struktura gyroid. V obou případech bylo zvoleno zatížení 50 kN a materiálový model pro AISI 316L dostupný v platformě nTopology ($\rho = 8,0 \text{ g/cm}^3$; $E = 193 \text{ GPa}$; $\mu = 0,28$). Na Obr. 36 jsou znázorněné okrajové podmínky simulace. Žlutě je vyznačeno spojitě zatížení 50 kN a růžově pevná podpěra.

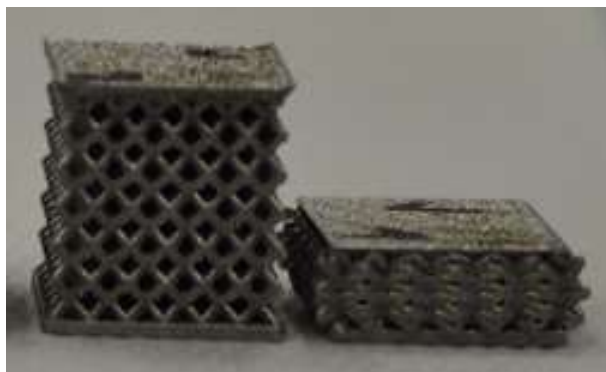


Obr. 36 Okrajové podmínky simulace

7.1 Výsledky simulace:

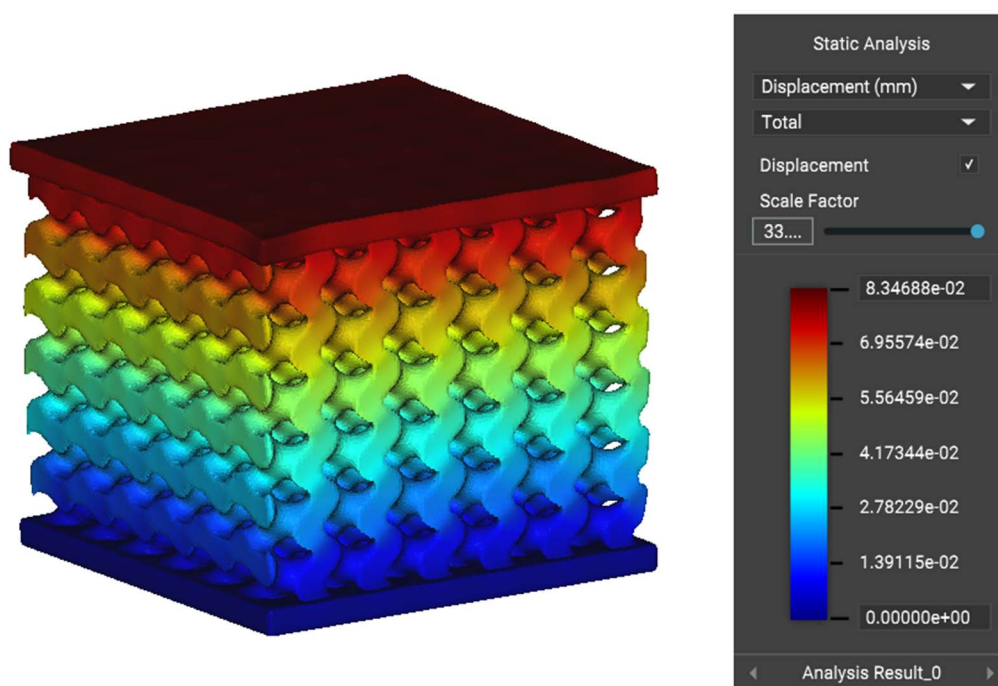


Obr. 37 Simulace vzorku s BCC mřížkovou strukturou – posunutí (průhyb vrchní desky)

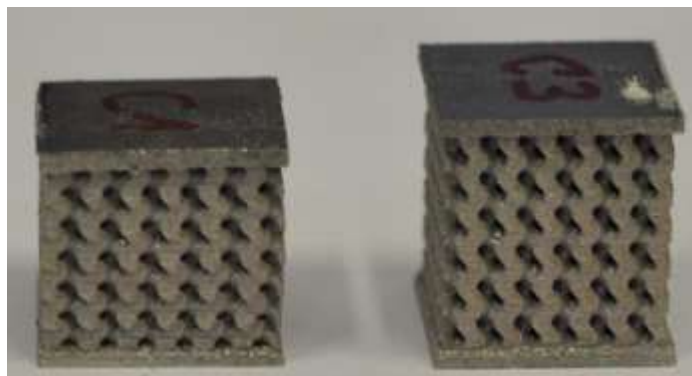


Obr. 38 Vytištěný vzorek BCC struktury před a po zkoušce tlakem

U vzorku s BCC mřížkovou strukturou došlo v simulaci k průhybu vrchní desky odpovídající spíše zatížení osamělou silou než spojitým zatížením. Celkové zmačknutí vzorku bylo dle simulace 4 mm. Výsledky simulace můžeme porovnat s výsledky reálné zkoušky. Z Obr. 38 je patrné, že při reálné zkoušce k žádnému průhybu vrchní desky nedochází. Deformace vzorku byla při zatížení 50 kN 9,6 mm.



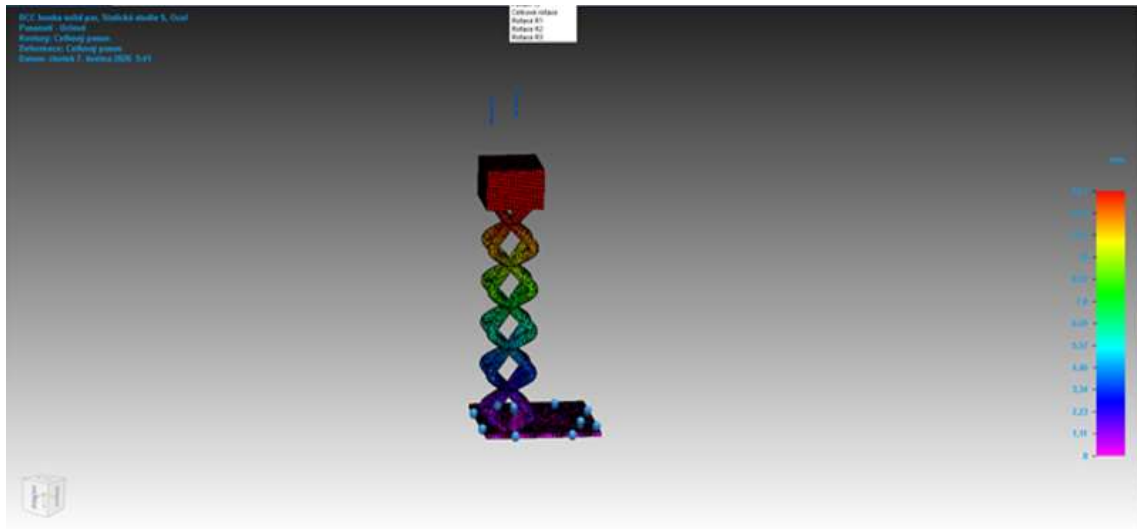
Obr. 39 Výsledky simulace pro strukturu typu Gyroid - posunutí



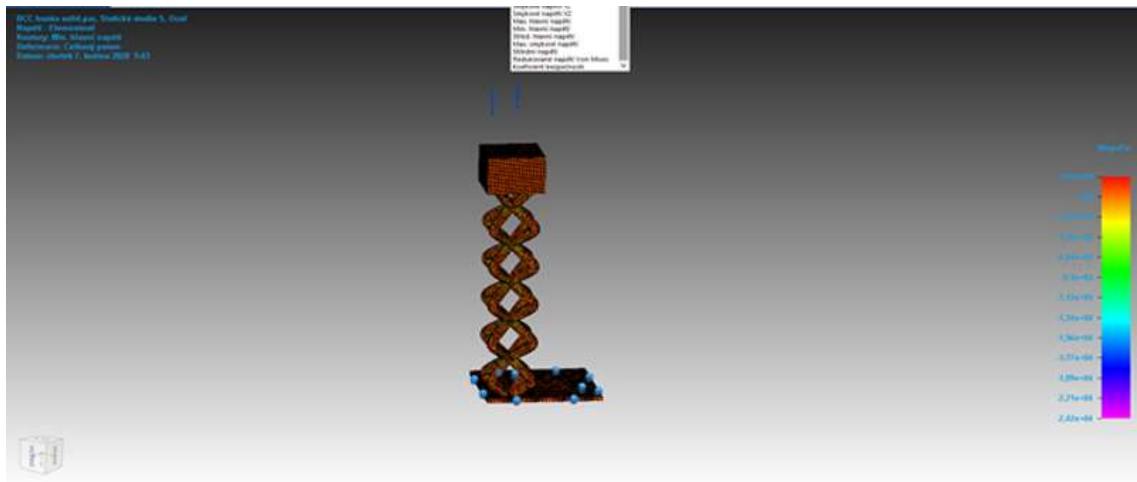
Obr. 40 Vytištěný vzorek struktury typu Gyroid před a po zkoušce tlakem

U vzorku s mřížkovou strukturou typu Gyroid k průhybu vrchní desky nedošlo, nicméně celkové zmáčknutí vzorku bylo při zatížení 50 kN pouze 0,083 mm, což neodpovídá reálným zkouškám, při kterých byla dráha při zatížení 50 kN 3 až 4 mm.

Pro ověření simulací z nTop a ověření dalších možností simulovat zatížení mřížkových struktur byly podniknuty pokusy o provedení analogických simulací v jiných SW. Program pro simulaci tvářecích operací SimufactForming nebyl schopen importovat STL model s tak velkým množstvím elementů, a tudíž ani provést simulaci. Dále byla snaha o provedení simulace tlakové zkoušky v cloudovém SW SimScale, který ovšem nepřijímá formát STL pro simulace mechanického zatěžování. Konverze takto složitých STL modelů do jiného CAD formátu nebyla úspěšná v rámci nTop ani Fusion 360. Dalšími SW, které byl testovány jsou CAD modelovací softwary Solid Edge a SolidWorks, které umožňují i provedení základních simulací mechanického namáhání. Tyto simulace ovšem dokáží řešit pouze na modelech vytvořených v příslušném CAD modeláři. Jedinou možností, jak tedy provést simulaci v těchto programech by bylo vymodelovat příslušnou strukturu, což je nejen nepraktické, ale i téměř nemožné u složitějších základních buněk. Níže je ukázka simulace zjednodušené struktury typu BCC vymodelované v Solid Edge.



Obr. 41 Simulace v Solid Edge - posunutí



Obr. 42 Simulace v Solid Edge - napětí

Z těchto pokusů vyplývá, že provedení simulací, modelů mřížkových struktur, mimo platformu nTopology není snadné. K dispozici je však více simulačních SW, než zde bylo popsáno. Například velmi rozšířený simulační software Abaqus obsahuje plug-in pro import souborů ve formátu STL. Nicméně tento plugin převádí STL soubory do jiných CAD formátů, což je u takto komplexních modelů složité, a jak bylo zmíněno výše. Obdobné funkce v SW nTop a Fusion 360 tento převod nezvládly. Simulace mřížkových struktur a dalších komplexních geometrií, výrobitelných aditivními technologiemi, je tak oblast, kterou bude potřeba dále rozvíjet.

8 Metodika zkoušení

Návrh metodiky zkoušení má za cíl umožnit srovnávání mřížkových struktur s různými základními buňkami a parametry z hlediska mechanických vlastností a jejich chování při základních typech namáhání (tah, tlak, ohyb). Takové srovnání mřížkových struktur může následně sloužit jako podklad pro volbu vhodné struktury pro danou aplikaci.

8.1 Příprava zkušebních těles

1) Definování mřížkové struktury

V první řadě je nutné definovat mřížkovou strukturu, pro kterou chceme zkoušku provést. Mřížková struktura je definována typem základní buňky (teselace prostoru, typ elementů a jejich konektivita), parametry elementů (např: průměr prutů, tloušťka stěn) a rozměry buňky.

2) Tvorba 3D modelu zkušebního tělesa

Zvolená mřížková struktura je aplikována na šablonu zkušebního tělesa pro příslušný typ zkoušky a je vytvořen 3D model požadovaného zkušebního tělesa pro konkrétní mřížkovou strukturu. Vygenerovaný model je exportován a připraven pro tisk.

3) Tisk zkušebních těles

Zkušební tělesa jsou vytištěna z požadovaného materiálu danou technologií. Pro srovnávání jednotlivých struktur je nutné uvažovat vliv parametrů tisku a orientaci zkušebních tělísek při tisku. Tiskové parametry a orientace by měly být identické pro všechny srovnávané vzorky. Počet zkoušek lze rozšířit i o tělesa, která budou z hlediska struktury stejná, ale tisk bude realizován s odlišnými tiskovými parametry, nebo s rozdílnou orientací vzorků na tiskové platformě.

4) Ověření zkušebního tělesa

Pro ověření mechanických vlastností struktury je třeba provést kontrolu hmotnosti vážením. Pro určení hmotnosti je třeba vážit s přesností 0,1 g.

5) Velikost zkušební tělesa

a) zkouška tlakem

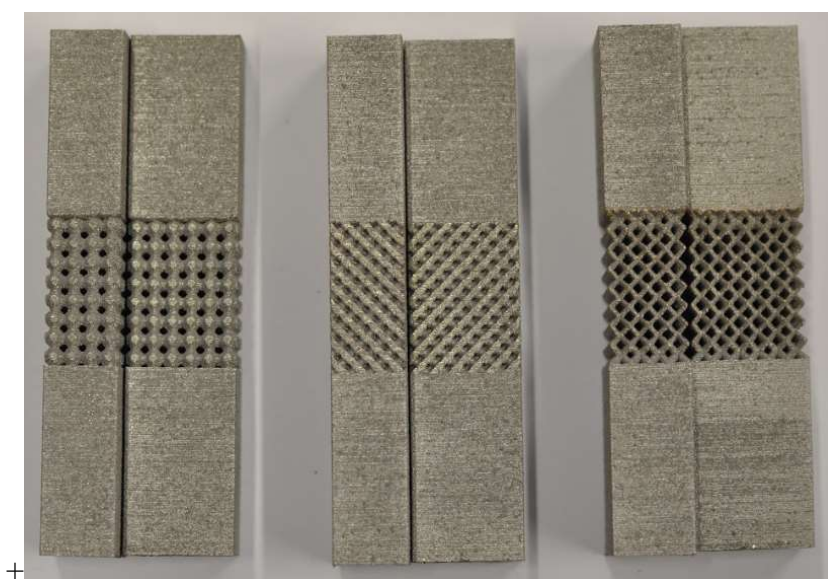
Pro velikost buňky 2,5 mm je zkušební těleso ve tvaru krychle o hraně 15 mm. Plochy, na které bude vyvozován tlak, jsou vyztuženy plným materiálem o výšce min. 1 mm.



Obr. 43 Vytištěné vzorky pro zkoušku tlakem

b) zkouška tahem

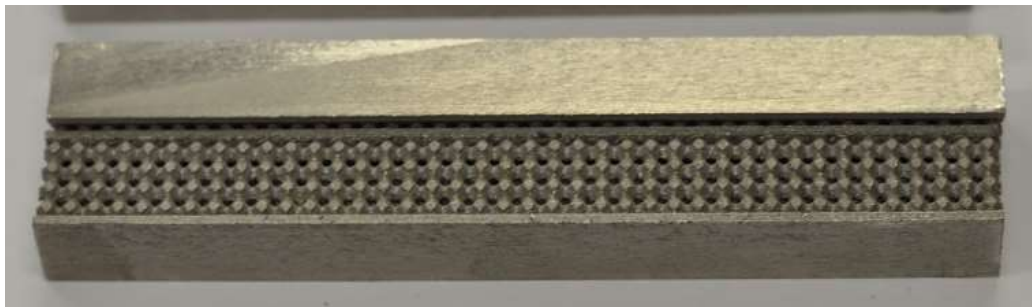
Oblast pro analýzu struktury má pro velikost buňky 2,5 mm průřez 10 x 15 mm, výška analyzované struktury je minimálně trojnásobek velikosti buňky. Upínací konce mají stejný průřez, jako je průřez analyzované oblasti. Mezi analyzovanou oblastí a upínací částí může být přechodová vrstva, v níž se průřez prutů nebo tloušťka stěny směrem k upínací částí plynule zvětšuje, aby se eliminovala koncentrace napětí v přechodové oblasti.



Obr. 44 Vytištěné vzorky pro zkoušku tahem

c) zkouška ohybem

Zkušební těleso má pro velikost buňky 2,5 mm výšku 10 mm a šířku 10 mm. Délka zkušební tělesa je minimálně 100 mm. Dosedací plochy jsou vybaveny souvislou plochou z plného materiálu o tloušťce 1 mm.



Obr. 45 Vytištěný vzorek pro zkoušku ohybem

8.2 Parametry nastavení zkušebního stroje

1) zkouška tlakem

Pro zkoušku tlakem jsou použity ploché tlačné desky pro zkoušku tlakem. Rychlost pohybu nástroje je zvolena 2 mm/min. Ukončení zkoušky je dáno dosažením 80 % jmenovité síly stroje LabTest model 5.100SP1, který má jmenovitou sílu 100 kN, popřípadě dosažením poloviny výchozí výšky zkušebního tělesa. Při zkoušce je registrována síla v závislosti na poloze příčnicku.

2) zkouška tahem

Zkušební vzorek je upnutý do čelistí pro zkoušku tahem. Rychlost posuvu příčnicku je 2 mm/min. Ukončení zkoušky je dáno poklesem síly o 50 %. Při zkoušce je registrována síla v závislosti na poloze příčnicku.

3) zkouška ohybem

Zkušební těleso je vloženo do přípravku pro tříbodý ohyb. Průměr podpěr je 20 mm a průměr ohýbacího trnu je 10 mm, vzdálenost podpor je 80 mm. Zkouška probíhá do dosažení síly 70 kN, poklesu síly o 75 % popř. do posunutí trnu o vzdálenost 28 mm. Tato vzdálenost je dána uspořádáním ohýbacího přípravku, aby nedošlo ke kontaktu zkušebního tělesa s upínacím držákem. Při zkoušce je registrována síla v závislosti na poloze příčnicku.

8.3 Způsoby vyhodnocování výsledků

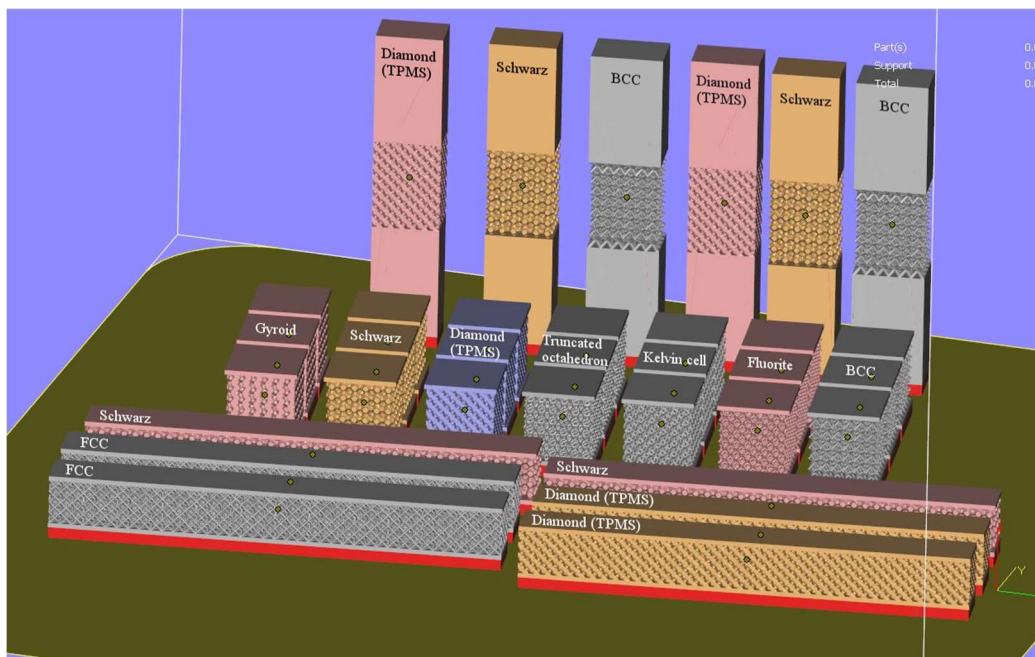
Vyhodnocení chování tělesa se provádí na základě kladeného odporu (prezentovaný působící silou) a v závislosti na deformaci struktury (prezentována posunutím příčnicku). Dále je průběh zkoušky analyzována pomocí kamery, která pořizuje obrazovou sekvenci průběhu zkoušky. Obrazová sekvence je následně vyhodnocována z hlediska popisu způsobu deformace a charakteru porušení struktury. Dále je vyhodnocována schopnost struktury přenášet daný typ zatížení v závislosti na její relativní hustotě.

8.4 Analýza výsledků

Na základě naměřených výsledků a pořízených záznamů je popsáno chování zvolené mřížkové struktury při příslušném typu namáhání.

9 Praktická část

Pro experimentální část této práce bylo k tisku připraveno celkem 66 modelů (22 struktur). Z těchto modelů se však z důvodu značné velikosti některých souborů podařilo vytisknout pouze část. Pro zkoušku tlakem byly vytištěny vzorky následujících struktur: Gyroid, Schwarz, TPMS Diamond, Truncated octahedron, Kelvin cell, Fluorite a BCC. Z těchto sedmi struktur byly vybrány tři (Schwarz, TPMS diamond a BCC), pro které byla vytištěna zkušební tělíska i pro zkoušku tahem. Pro zkoušku ohybem byla vytištěna zkušební tělíska struktur Schwarz, TPMS Diamond a FCC. Na Obr. 46 je vidět umístění tělísek na stavební platformě 3D tiskárny.

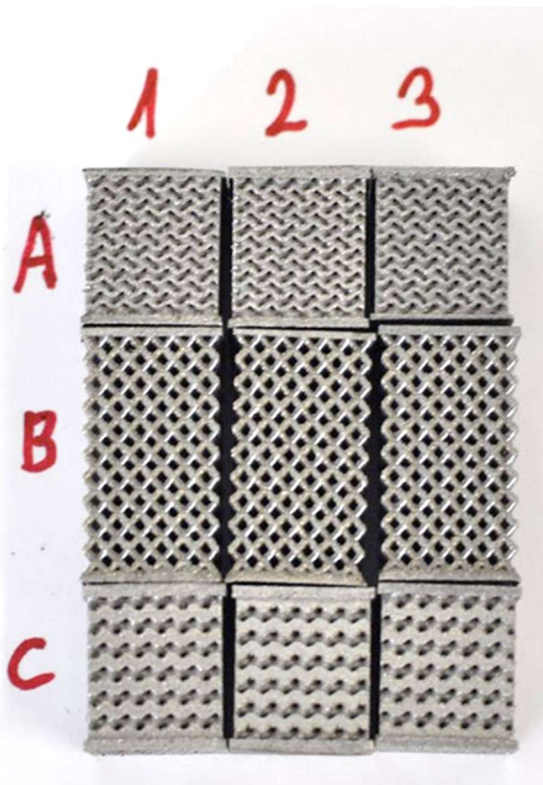


Obr. 46 Rozložení vzorků na tiskové platformě

9.1 Zkouška tlakem

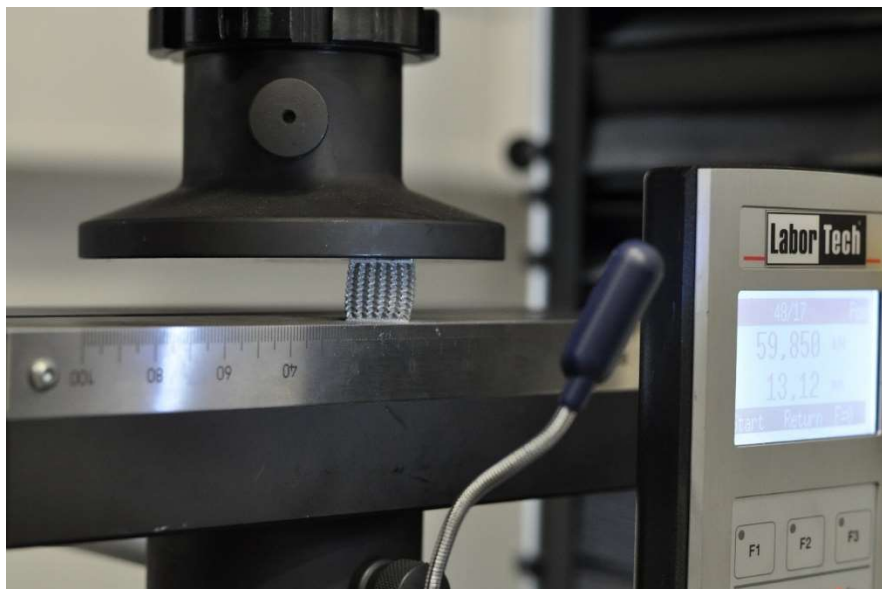
9.1.1 Předběžné tlakové zkoušky

Před provedením hlavních zkoušek byla vytištěna předsérie devíti vzorků s třemi různými strukturami. Tyto struktury byly zástupci hlavních skupin mřížkových struktur z platformy nTop tj. příhradové struktury, TPMS použité jako hranice a TPMS s přiřazenou tloušťkou. Zkušební vzorky byly označeny písmeny A, B, C a pořadovým číslem 1-3. Vzorky A a C jsou krychlového tvaru, 2 protilehlé plochy (paralelní s tiskovou platformou) jsou opatřeny plnou dosedací plochou o tloušťce 1 mm. Hrana tělesa je 15 mm. Vzorky A obsahují strukturu Walled Gyroid a vzorky C Gyroid. Vzorky B obsahují mřížku typu BCC a jejich výška byla zvětšena na 25 mm.

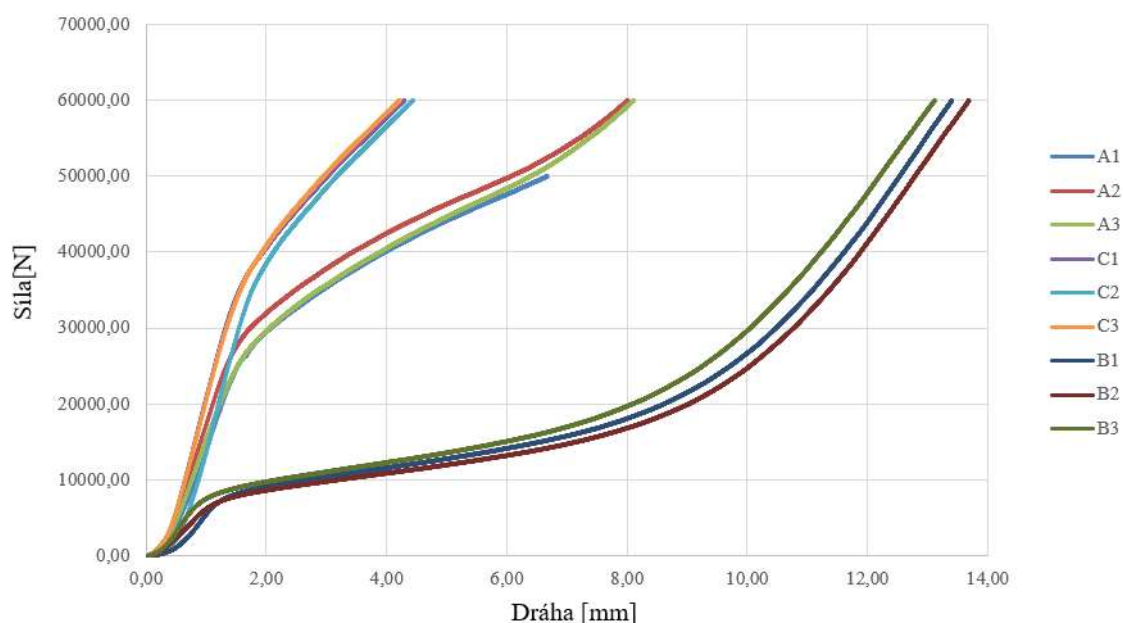


Obr. 47 Vzorky pro předběžné zkoušky tlakem

Cílem těchto předběžných zkoušek bylo ověřit navržené podmínky zkoušení mřížkových struktur, sledovat chování rozdílných struktur při zkoušce a určení vhodné velikosti zkušebního tělesa. Dalším cílem těchto předběžných zkoušek bylo ověření funkčnosti tisku těchto struktur. Z hlediska podmínek zkoušení se řešila rychlost pohybu nástroje a parametr, kterým bude definováno ukončení zkoušky. Rychlost pohybu nástroje byla nakonec zvolena 2 mm/min. Pro definici ukončení zkoušky nabízí vyhodnocovací systém několik možností, mezi které patří dosažená síla, čas, posunutí nástroje. Na základě úvahy o možném chování vzorků, bezpečnosti a jmenovité síle zkušebního zařízení (100 kN) bylo rozhodnuto o omezení těchto zkoušek dosaženou silou 60 kN. Později jsme se rozhodli o navýšení této hranice na 80 kN. Průběh zkoušky byl snímán kamerou, která zabírala jak vzorek, tak zobrazované hodnoty síly a posunutí nástroje.



Obr. 48 Zorné pole kamery při prvotních zkouškách tlakem



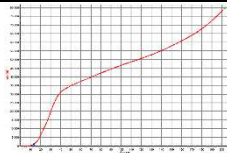
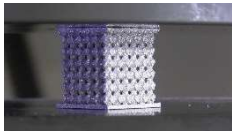
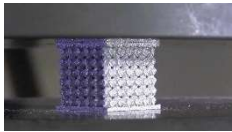
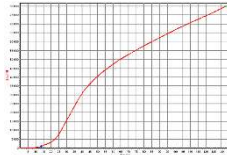

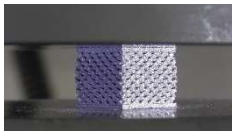

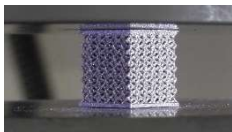
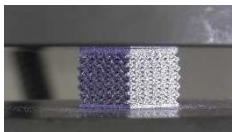


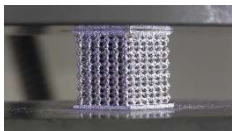
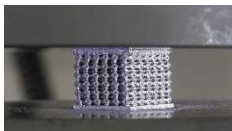

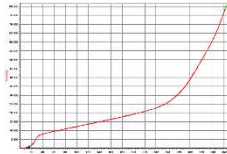
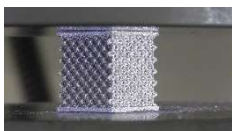



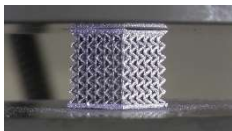
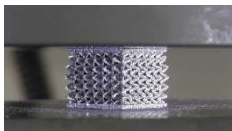

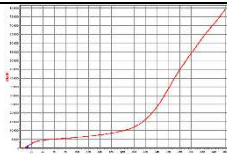


Obr. 49 Diagram předběžných tlakových zkoušek

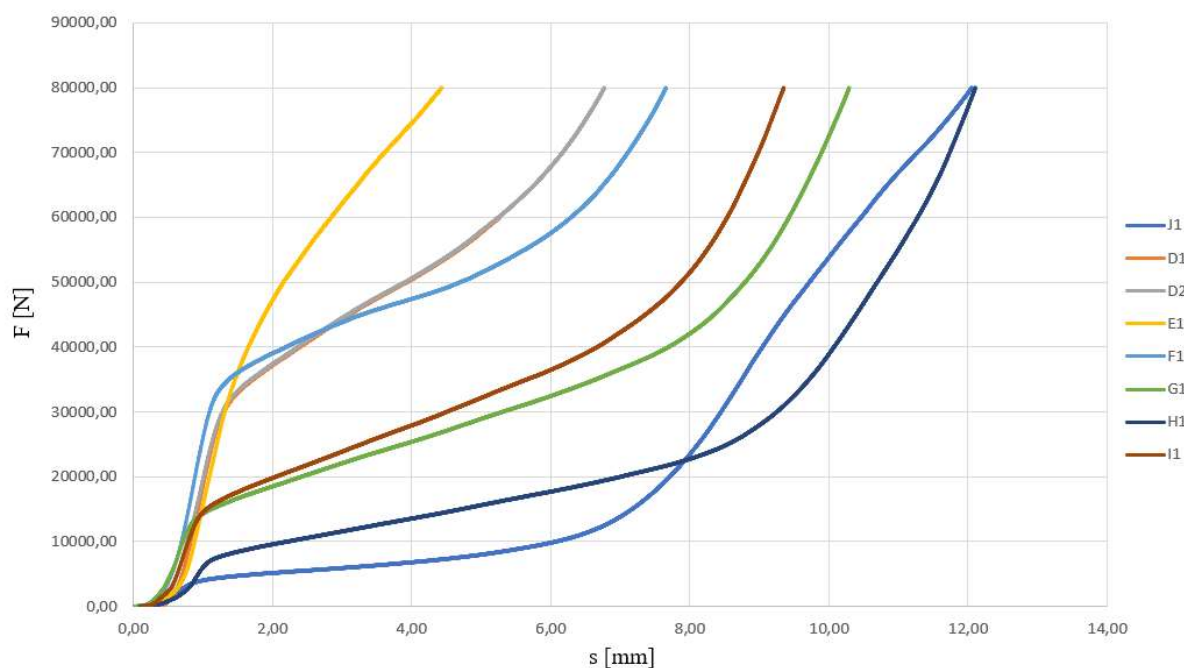
Na základě provedených zkoušek byla výška vzorků pro tlakovou zkoušku zvolena 15 mm. Výška 25 mm je spojena s vyššími tiskovými náklady a z hlediska pozorování struktury nepřináší hodnotnější informace. Video záznam z důvodu snahy o zachycení vzorku i průběhu hodnot neposkytuje detailní pohled na chování struktur při zatížení, a proto bude pro finální zkoušky pořízen detailnější záběr namáhaných vzorků. Z diagramu závislosti síly na posunutí je patrný minimální rozptyl výsledků pro jednotlivé vzorky stejné struktury.

9.1.2 Měření finálních vzorků

Pro analýzu byly, z navržených možností, připraveny následující struktury: D-Gyroid, E-Schwarz, F-Diamond (TPMS), G-Truncated octahedron, H-Kelvin cell, I-Fluorite, J-BCC. Výběr struktur byl do velké míry ovlivněn velikostí souborů, respektive možností načtení do SW, který slouží k přípravě dílů na tiskovou platformu. Z důvodu značné složitosti modelů docházelo k chybám při načítání a celý proces byl velmi časově náročný.

	0 mm	4,5 mm	9 mm		X
D2					6,7 mm
E1					4,5 mm
F1					7,7 mm
G1					10,3 mm
H1					12 mm
I1					9,4 mm
J1					12 mm

Obr. 50 Kaskády snímků tlakové zkoušky mřížkových struktur

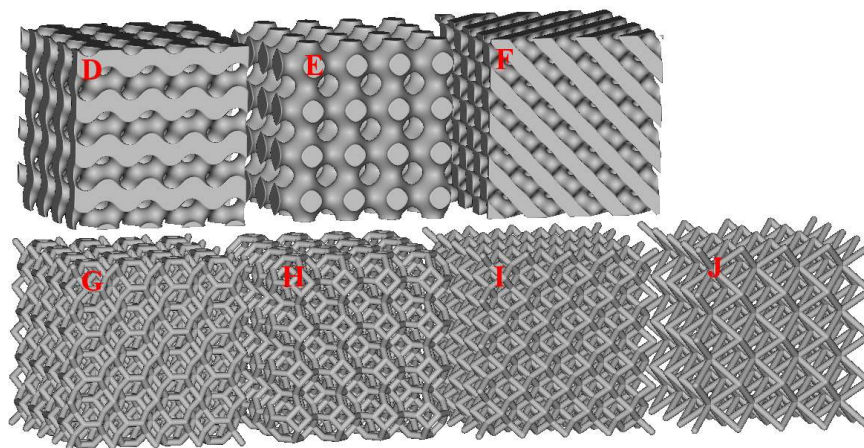


Obr. 51 Srovnání diagramů zkoušky tlakem všech vzorků

Na Obr. 50 je přehled analyzovaných vzorků zkouškou tlakem. První snímek v řádku prezentuje stav zkušebního tělesa na počátku zkoušky, druhý po posunutí příčnicku 4,5 mm a třetí po posunutí 9 mm. Následuje graf průběhu síly při zkoušce a v posledním sloupci informace o jakou hodnotu byla výška snížena v okamžiku dosažení limitní síly 80 kN. Obr. 51 poté ukazuje srovnání průběhů síly na posunutí pro všechny zkoušené vzorky.

Z hlediska průběhu síly při zatěžování lze rozdělit zkoušené struktury do dvou skupin. První skupinou jsou vzorky D, E, F (Gyroid, Schwarz, Diamond), které vykazují značný odpor proti deformaci projevující se strmějším nárůstem síly od počátku deformace tělesa. To je způsobeno dostatečnou pevností struktury a nedostatkem prostoru uvnitř struktury pro posun elementů mřížky. Všechny tři mřížkové struktury těles D, E, F jsou ze skupiny TPMS struktur. Vzorky D, E, F dosahují, oproti druhé skupině struktur (G, H, I, J), zlomu v nárůstu síly při nižších hodnotách posunutí. To je způsobeno vyšší zdánlivou hustotou těchto struktur. Struktura obsahuje méně volných prostorů, což má za následek dřívější dosedání jednotlivých částí struktury na sebe. Tato denzifikace, zhroucení struktury poté způsobuje velmi strmý nárůst síly. Do druhé skupiny lze zařadit vzorky G, H, I, J, které jsou charakterizovány pozvolným nárůstem síly. Nižší zdánlivá hustota těchto struktur umožňuje deformaci jednotlivých elementů bez vzájemného ovlivňování ve větším rozsahu posunutí. Po uzavření volných prostorů mezi elementy dochází i zde k dosednutí elementů, denzifikaci, která se projeví zlomem v průběhu síly. V rámci této skupiny struktur lze ještě provést další rozdělení, kdy vzorky H a J byly schopné přenést jen malé zatížení a od začátku

zkoušky u nich docházelo k výrazné deformaci, zatímco vzorky G a I dokázaly přenést zatížení vyšší, nicméně charakter průběhu síly na posunutí byl u všech čtyř obdobný. Z těchto pozorování můžeme konstatovat, že první skupina vzorků (D, E, F) je vhodná k přenášení tlakového zatížení, zatímco druhá skupina (především vzorky H a J) lze použít například jako tlumící nebo deformační prvek.



Obr. 52 Modely mřížkových struktur vzorků D až J ilustrující rozdíly ve zdánlivé hustotě

Ze srovnání průběhu síly při zatěžování s tvarem mřížkové struktury je jasné, že velký vliv na schopnost vzorku přenášet tlakové namáhání má množství materiálu tvořící strukturu, tedy jakási zdánlivá hustota struktury. Tuto zdánlivou hustotu označujeme ρ^* a byla vypočtena z hmotnosti vzorků a jejich vnějších rozměrů. Výpočet může být lehce zkrácen přítomností opěrných desek na dosedacích plochách vzorků, ale vzhledem k jejich malé tloušťce a přítomnosti těchto desek na všech vzorcích byl jejich vliv zanedbán. Pro lepší porovnání mřížkových struktur s plným materiálem se uvádí hodnota relativní hustoty, což je poměr mezi zdánlivou hustotou mřížky a hustotou plného materiálu ρ^*/ρ_m uváděný v procentech. Hustota tisknuté korozivzdorné oceli AISI 316L byla pro výpočet uvažována 8 g/cm^3 .

Tab. 1 Zdánlivé a relativní hustoty vzorků

	m [g]	h [mm]	a [mm]	b [mm]	V [mm ³]	ρ^* [g/cm ³]	ρ^*/ρ_m [%]
D1	17,9	17,1	15,15	15,15	3924,8	4,6	57,0
D2	17,9	17	15,15	15,15	3901,9	4,6	57,3
E1	17	17	15	15	3825,0	4,4	55,6
F1	18	17	15,1	15,1	3876,2	4,6	58,0
G1	11,9	16,95	15,5	15,5	4072,2	2,9	36,5
H1	9,7	16,95	15,5	15,5	4072,2	2,4	29,8
I1	13,3	17,1	15,4	15,4	4055,4	3,3	41,0
J1	9	17,1	15,4	15,4	4055,4	2,2	27,7

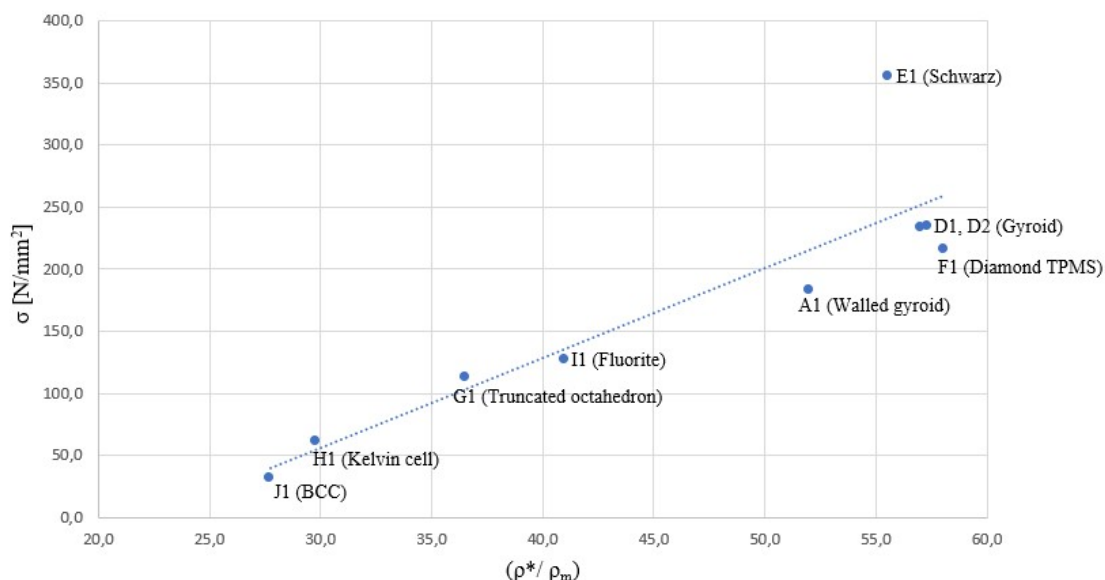
Porovnání jednotlivých struktur bylo provedeno pro stav, kdy došlo ke snížení výšky vzorku o 4,5 mm. Pro tuto hodnotu posunutí byla odečtena síla odpovídající jednotlivým vzorkům. Ze znalosti síly a příčné plochy vzorků bylo vypočteno napětí přenášené strukturami. Přenášené napětí poté bylo vyděleno relativní hustotou odpovídající struktury. Tím byl získán parametr určující vhodnost dané mřížkové struktury pro přenos tlakového namáhání vzhledem k relativní hustotě.

Tab. 2 Napětí ve vztahu k relativní hustotě vzorků

	$F_{4,5}$ [N]	a [mm]	b [mm]	S [mm ²]	σ [N/mm ²]	$\sigma/(\rho^*/\rho_m)$
D1	53715,6	15,15	15,15	229,5	234,0	4,1
D2	53900,9	15,15	15,15	229,5	234,8	4,1
E1	80017,2	15	15	225	355,6	6,4
F1	49137,2	15,1	15,1	228,0	215,5	3,7
G1	27097,5	15,5	15,5	240,3	112,8	3,1
H1	14551,5	15,5	15,5	240,3	60,6	2,0
I1	29992,0	15,4	15,4	237,2	126,5	3,1
J1	7334,8	15,4	15,4	237,2	30,9	1,1

Výsledky potvrzují původní předpoklad, že nejvhodnějšími strukturami pro přenášení tlaku jsou vzorky: E-Schwarz, D-Gyroid a F-Diamond (TPMS).

Vztah relativní hustoty struktury a přenášeného napětí je patrný na Obr. 53. Z grafu je jasně vidět lineární závislost napětí na relativní hustotě. Této závislosti se vymyká pouze struktura typu Schwarz, která již podle přechozích výsledků vykazuje velkou odolnost vůči tlakovému namáhání. Odchylka struktury Schwarz může však být způsobena i volbou okamžiku vyhodnocování. Při posunutí příčnicku 4,5 mm už mohlo dojít k dosednutí částí struktury na sebe. U této závislosti by bylo velmi zajímavé doplnit data i o zbývajících strukturách a vzorek z plného materiálu o relativní hustotě 100 %.



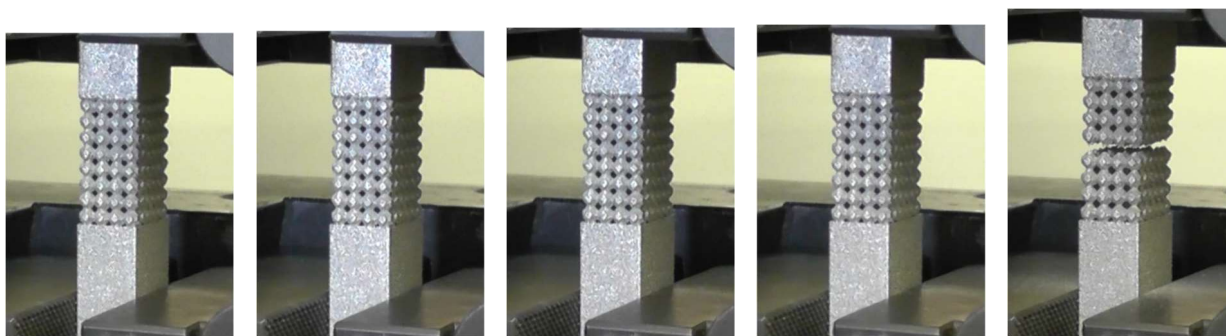
Obr. 53 Závislost přenášeného tlakového napětí na relativní hustotě vzorků

Po provedení zkoušky tlakem byla ověřena závislost odolnosti vůči tlakovému namáhání na relativní hustotě mřížkové struktury. Z důvodu rozdílného chování mezi vzorky struktur ze skupiny TPMS a příhradových struktur je složité najít společné parametry pro vyhodnocování. Z tohoto důvodu je možné uvažovat o rozdělení vyhodnocování na jednotlivé rodiny mřížkových struktur. Dále byl zkouškou tlakem ověřen návrh geometrie zkušební tělíska, která se jeví jako vhodná. Všechna zkušební tělesa vykazují dostatečnou soudržnost, v žádném tělese nedošlo k porušení. Pro zjištění chování mřížkových struktur uvnitř tělesa a způsobu skládání struktury by bylo vhodné provést metalografické řezy pro různá stadia napěchování, popřípadě provést vyhodnocení počítačovou tomografií. Pro struktury, u kterých dochází ke snadné deformaci by mohlo být zajímavé provést dynamické zkoušky a analyzovat například jejich schopnost pohlcovat energii nárazu.

9.2 Zkouška tahem

Pro zkoušku tahem byly připraveny vzorky tří mřížkových struktur označeny písmeny A, B a C. Vzorky typu A obsahují strukturu typu Schwarz, Vzorky B strukturu TPMS Diamond a vzorky C strukturu BCC. Rychlost zkoušky byla zvolena 2 mm/min. Pro jednotlivé struktury byly vytvořeny kaskády snímků z průběhu zkoušky s uvedeným posunutím a zatěžující silou. První snímek ukazuje stav vzorku na počátku zkoušky a poslední snímek stav při ukončení zkoušky. Zbývající snímky jsou rovnoměrně rozděleny v průběhu zkoušky. Mezi zvolenými strukturami byl značný rozdíl a jejich chování při tahovém namáhání bude rozebráno níže.

9.2.1 Vzorek A - Schwarz



0 mm; 0 kN

1 mm; 6 kN

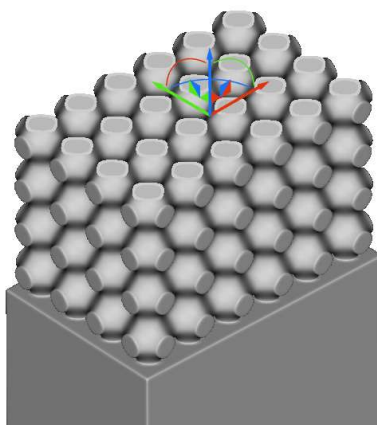
2 mm; 14,5 kN

3 mm; 22 kN

4 mm; 21 kN

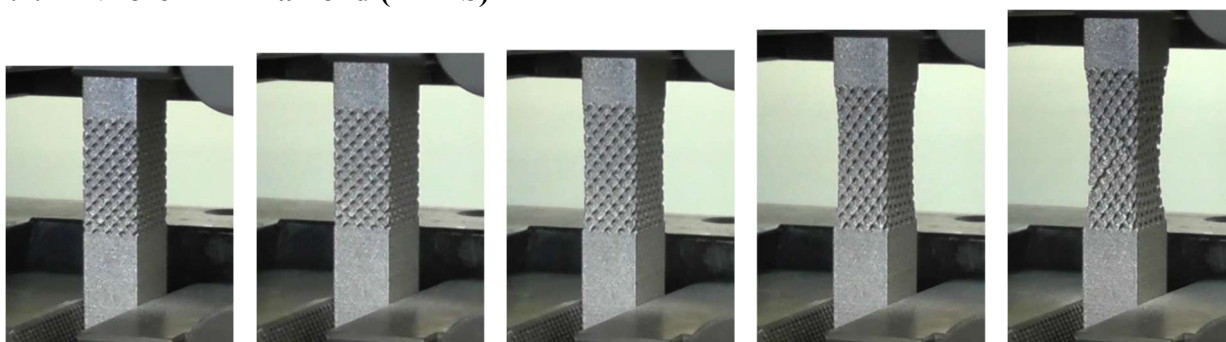
Obr. 54 Kaskáda snímků z tahové zkoušky vzorek A1 (Schwarz)

U mřížky typu Schwarz došlo pouze k minimálnímu prodloužení, které bylo v okamžiku porušení 3,84 mm. K lomu došlo v rovině kolmé na směr zatěžování, ve které má tato mřížková struktura nejmenší plochu. Porušení vzorku bylo náhlé a odpovídalo charakterem spíše křehkému lomu.



Obr. 55 Řez modelem vzorku A rovinou, ve které došlo k lomu

9.2.2 Vzorek B - Diamond (TPMS)



0 mm; 0 kN

2,9 mm; 20 kN

5,7 mm; 28 kN

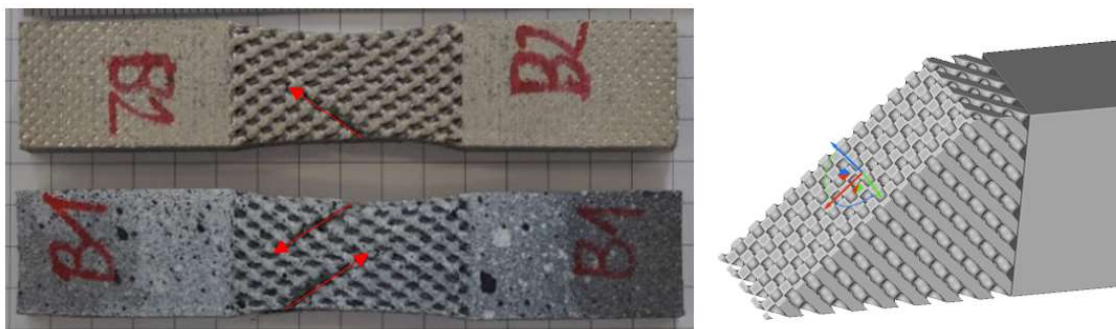
8,5 mm; 32 kN

11,1 mm; 17 kN

Obr. 56 Kaskáda snímků z tahové zkoušky vzorek B1 (Diamond, TPMS)

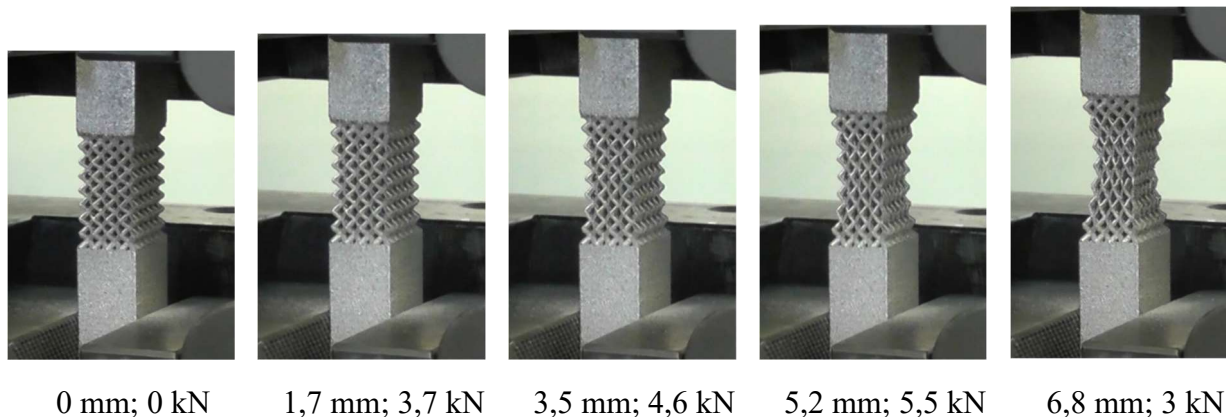
Mřížka typu TPMS Diamond vykazovala při zkoušce tahem velmi dobrou kombinaci pevnosti a tažnosti. K porušení došlo u obou vzorků při síle nad 33 kN a protažení kolem 10 mm. Lom probíhal postupně v diskretních krocích pod úhlem 45°, který je vlastní i geometrii této mřížky.

Postupné šíření trhlin v krocích je patrné i z tahového diagramu, kde po překročení meze pevnosti dochází k poklesu síly ve stupních. Trhliny probíhaly v několika rovnoběžných rovinách, z nichž nakonec jedna převládla. Na Obr. 57 jsou zobrazeny vzorky B1 a B2 po ukončení zkoušky s vyznačeným směrem šíření trhlin a řez modelem tahového tělíska rovinou, ve které docházelo k porušení.



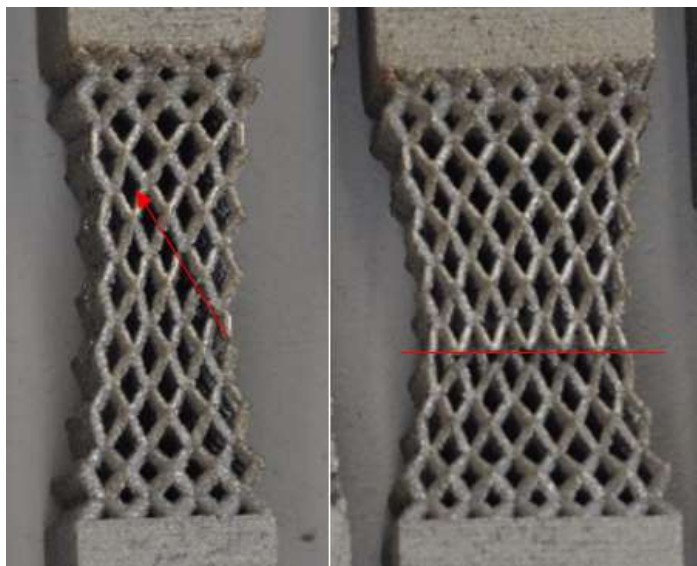
Obr. 57 Poloha a směr šíření trhlin ve vzorcích B, řez modelem rovinou, ve které docházelo k lomu

9.2.3 Vzorek C - BCC



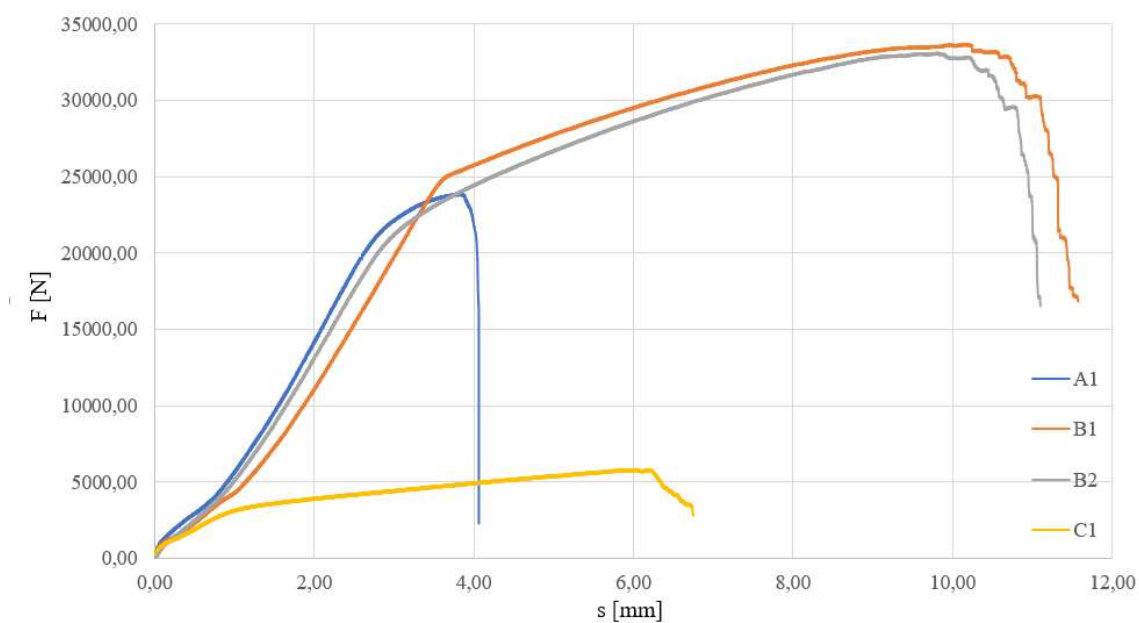
Obr. 58 Kaskáda snímků z tahové zkoušky vzorek C1 (BCC)

Kubická prostorově středěná mřížková struktura (BCC) se od začátku zkoušky intenzivně deformovala a docházelo k protahování základních buněk. Deformace probíhala při téměř konstantním zatížení až do překročení pevnosti při síle 5766 N a posunutí 5,9 mm. K lomu došlo napříč vrstvami buněk přibližně uprostřed zkušebního tělíska, jak je patrné z Obr. 59. Z faktu, že k lomu došlo v oblasti buněk se základním průměrem prutů 0,4 mm lze usuzovat, že přechodová vrstva mezi zkoušenou oblastí a upínacími částmi splnila svůj účel.



Obr. 59 Poloha a směr šíření trhliny ve vzorku C1

Na Obr. 60 jsou tahové diagramy jednotlivých vzorků, na kterých lze pozorovat odlišné chování při tahové zkoušce popsané výše. U tahové zkoušky byla dále vyhodnocena pevnost jednotlivých struktur vypočtená z maximální zatěžující síly a nominálního příčného průřezu vzorků 10 x 15 mm. Dále byl vypočten poměr pevnosti ku relativní hustotě. Relativní hustota zkoušených struktur byla převzata ze zkoušky tlakem.

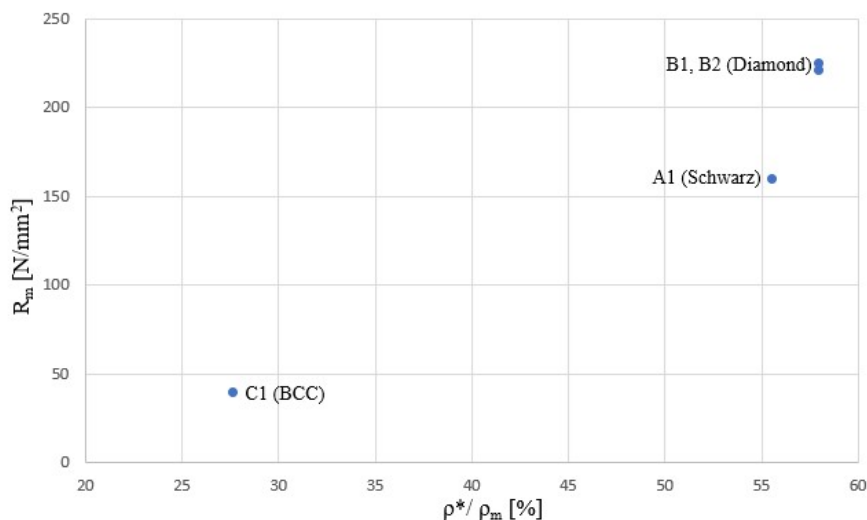


Obr. 60 Srovnání tahových diagramů všech vzorků

Tab. 3 Mez pevnosti vztažená na relativní hustotu vzorků

	F_m [N]	R_m [N/mm ²]	ρ^*/ρ_m [%]	$R_m/(\rho^*/\rho_m)$
A1	23850	159	55,6	2,9
B1	33663	224,4	58	3,9
B1	33081	220,5	58	3,8
C1	5766	38,4	27,7	1,4

Z hlediska pevnosti i poměru mezi pevností a relativní hustotou vychází nejlépe vzorky B, tedy struktura Diamond (TPMS). Stejně jako u zkoušky tlakem byla i zde vynesena závislost relativní hustoty na pevnosti, ale z důvodu malého počtu zkoušených struktur není možné usuzovat o nějaké závislosti. Pokud bychom předpokládali obdobnou lineární závislost mezi pevností a relativní hustotou jako u namáhání tlakem vymezenou vzorky A a C pak by vzorky typu B ležely nad touto spojnicí trendu, což by naznačovalo lepší vlastnosti v tahu. Nicméně k ověření této hypotézy je nutné provést další zkoušky pro větší množství struktur s odlišnými relativními hustotami.



Obr. 61 Závislost meze pevnosti v tahu na relativní hustotě vzorků

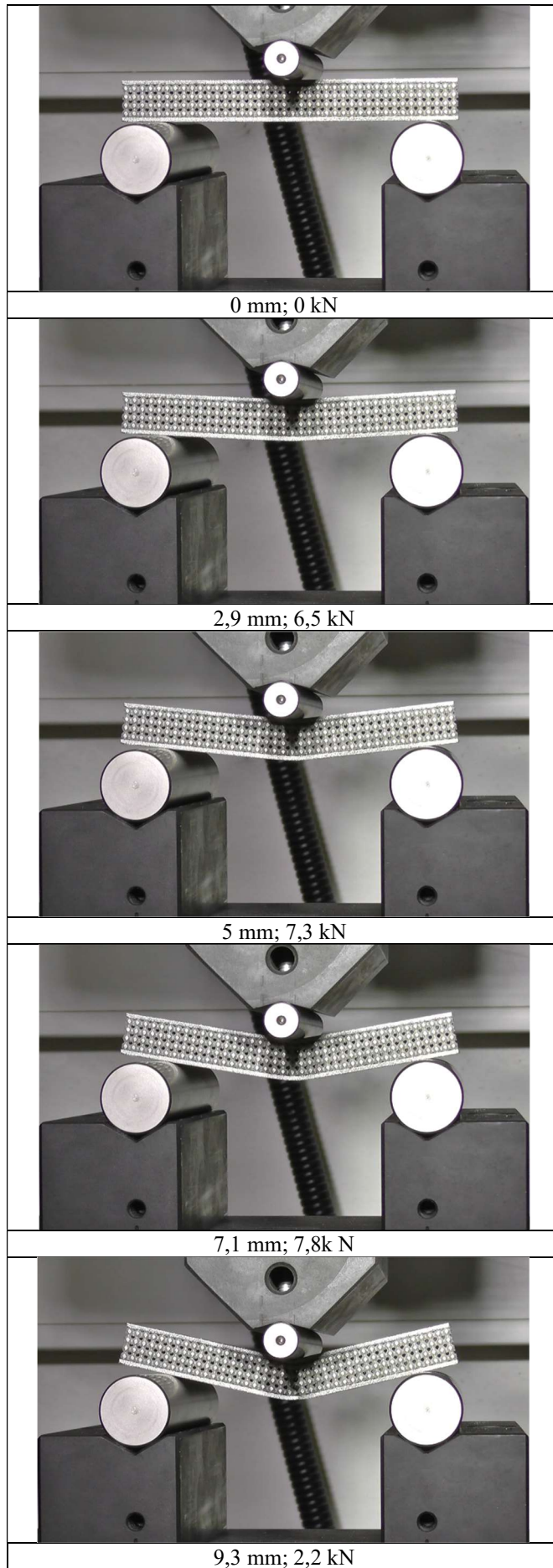
Provedením tahových zkoušek byl také ověřen návrh geometrie zkušebního tělíska. U všech vzorků došlo k porušení v oblasti zkoumané struktury a při zkoušení se nevyskytly žádné problémy, které by vedly k úpravě návrhu zkušebních tělísek. Pro další zkoumání lze stejně jako u zkoušky tlakem navrhnout analýzu vzorků metalografickým řezem nebo počítačovou tomografií v různých stupních protažení a podrobné prozkoumání rovin ve kterých dochází k lomu. U struktur lze také pozorovat změnu vlastností, nejen v závislosti na velikosti základní buňky a průměru prutů/tloušťky stěny, ale také na orientaci mřížky ve vztahu ke směru zatěžování. Změna orientace by mohla mít velký vliv například u struktury typu Schwarz, kdyby nebyla rovina s nejmenší plochou struktury kolmá na směr zatěžování.

9.3 Zkouška ohybem

Pro zkoušku ohybem byly také připraveny vzorky tří mřížkových struktur, které jsou označeny písmeny A, B a C. Vzorky typu A obsahují strukturu typu Schwarz, vzorky B strukturu FCC a vzorky C strukturu Diamond (TPMS). Rychlost zatěžování byla z důvodu urychlení zkoušek zvolena 5 mm/min. Vzdálenost podpěr byla na základě požadavku co největšího průhybu zvolena 80 mm. Průměr válcových podpěr byl zvolen 20 mm, aby nedocházelo k dosedání vzorku na upevnění podpěr a průměr zatěžujícího trnu byl zvolen 10 mm. Pro jednotlivé struktury byly vytvořeny kaskády snímků z průběhu zkoušky s uvedeným posunutím a zatěžující silou. První snímek ukazuje stav vzorku na počátku zkoušky a poslední snímek stav při ukončení zkoušky. Zbývající snímky jsou rovnoměrně rozděleny v průběhu zkoušky.

9.3.1 Vzorek A - Schwarz

Předchozí zkoušky nám poskytují přehled o chování této struktury při přenášení tlakového a tahového napětí. Mřížková struktura typu Schwarz velmi dobře odolávala tlaku, ale poměrně špatně snášela namáhání tahem. To se potvrdilo i u zkoušky ohybem. K selhání mřížkové struktury došlo v tahu ještě před porušením opěrných desek z plného materiálu. Jak je znázorněno na Obr. 63, trhлина byla iniciována na spodním okraji struktury a šířila se směrem k vrchnímu vláknu stejnou rovinou jako při tahové zkoušce. Porušení struktury je na diagramu reprezentováno poklesem síly po překročení meze pevnosti, po kterém je síla konstantní po cca 1 mm dráhy nástroje, než dojde k porušení i spodní opěrné desky.



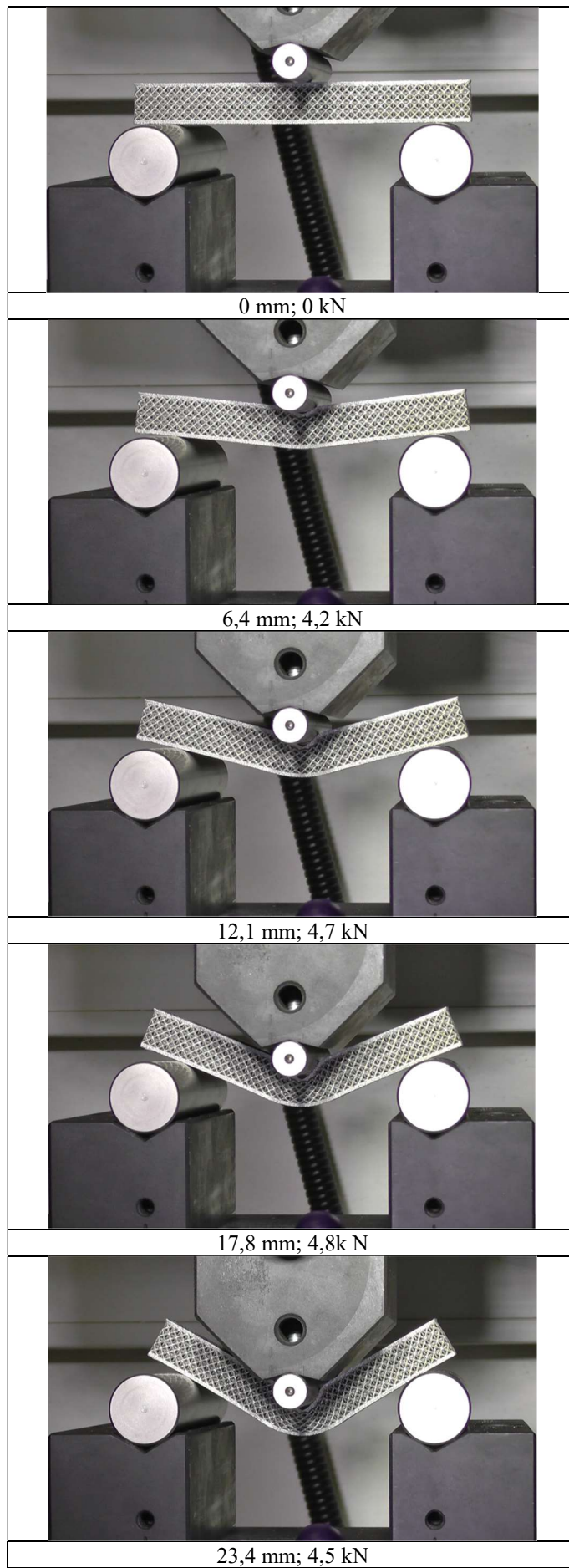
Obr. 62 Kaskáda snímků zkoušky ohybem vzorku A1 (Schwarz)



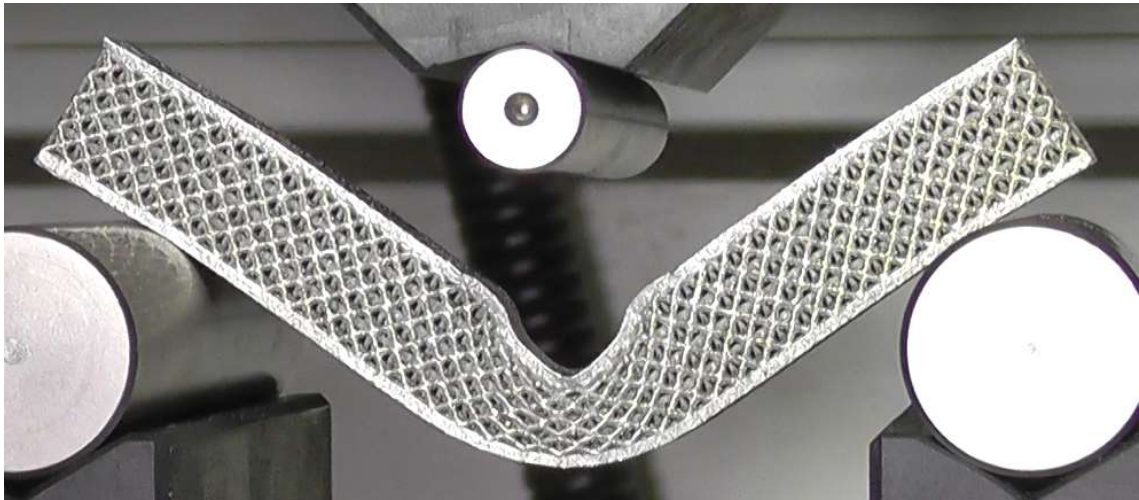
Obr. 63 Poloha a směr šíření trhliny ve vzorku A1

9.3.2 Vzorek B - FCC

Mřížková struktura založená na kubické plošně středěné mřížce FCC nebyla zahrnuta v předchozích zkouškách, ale na základě její značné podobnosti se strukturou BCC můžeme předpokládat, že u ní bude docházet k velké a snadné deformaci jak v tlaku, tak tahu. Tato malá odolnost vůči, především tlakovému, namáhání se projevila borcením struktury pod zatěžujícím trnem. Opěrná deska v tomto případě nebyla dostatečně tuhá pro zamezení vnikání trnu do struktury. Zborcená struktura po odlehčení je viditelná na Obr. 65. Nárůst síly ke konci zkoušky, patrný z ohybového diagramu, je způsobený opřením vzorku o upínací část zatěžujícího trnu.



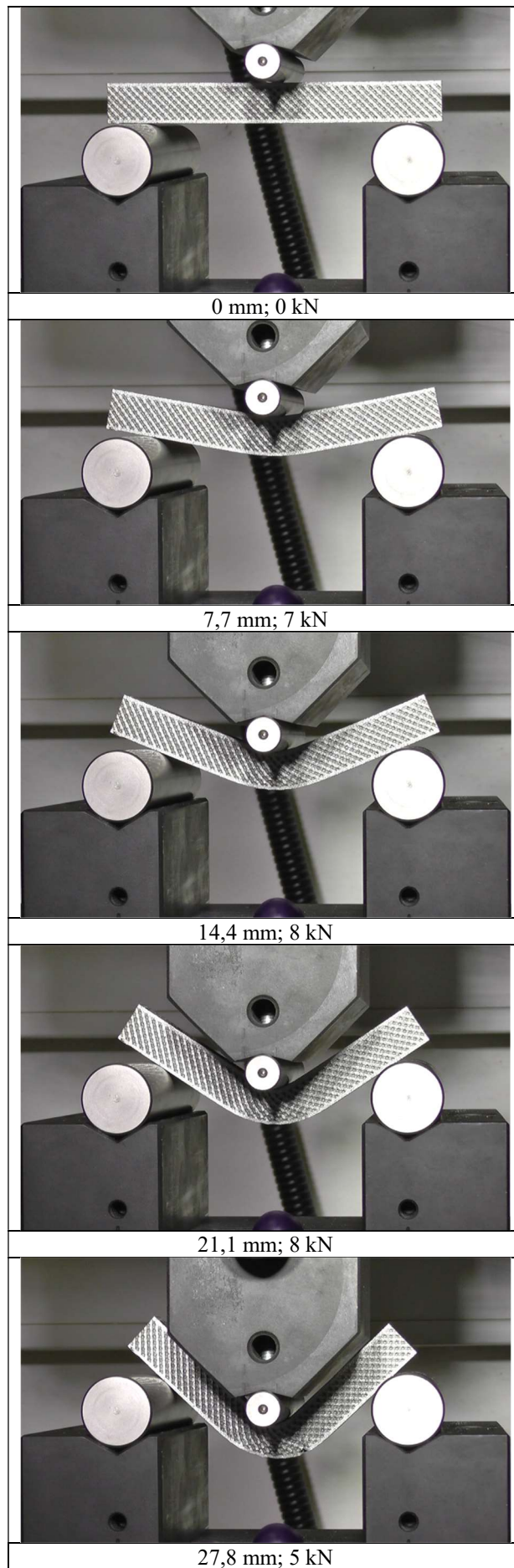
Obr. 64 Kaskáda snímků zkoušky ohybem vzorku B1 (FCC)



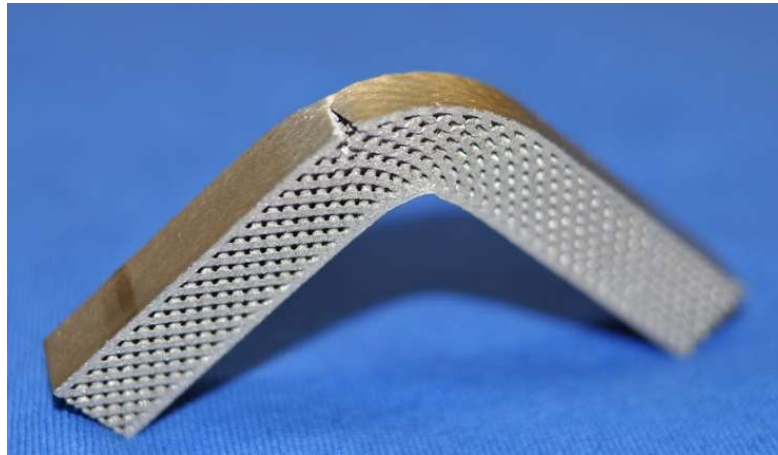
Obr. 65 Zborcení FCC struktury při zkoušce ohybem

9.3.3 Vzorek C - Diamond (TPMS)

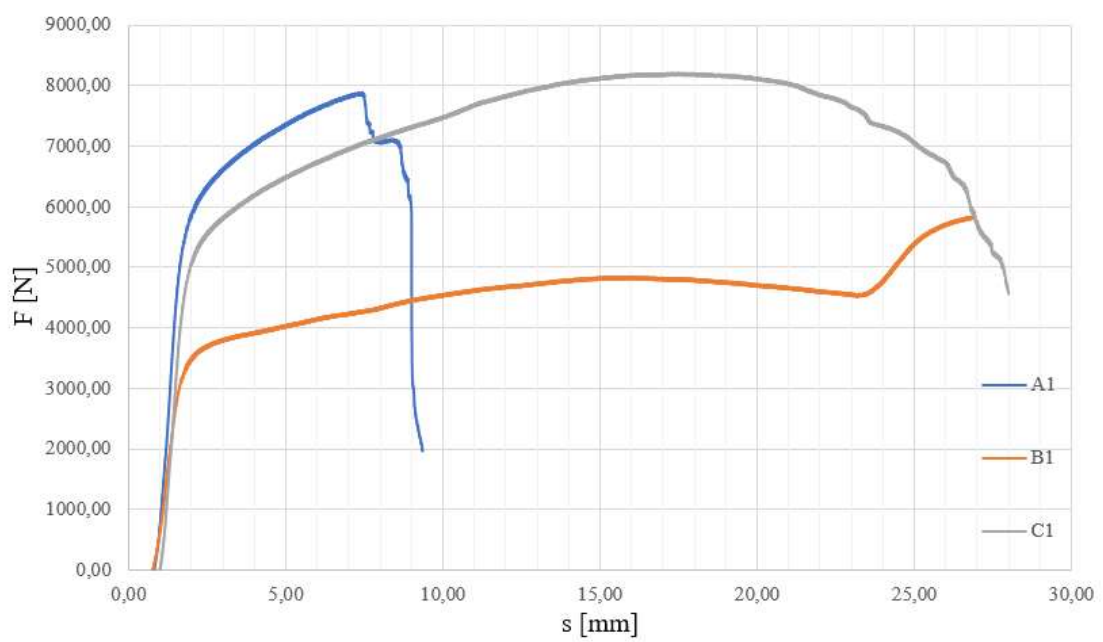
Struktura typu Diamond vykazovala v předchozích zkouškách poměrně dobrou odolnost vůči namáhání tlakem i tahem. Díky dobré tlakové odolnosti nedošlo k zaboření ohýbacího trnu do vzorku. V průběhu zkoušky došlo k intenzivní deformaci mřížky, ale klíčové pro konečné selhání vzorku byla nízká tahová odolnost opěrné vrstvy, ve které došlo k iniciaci jediné viditelné trhliny. Trhlina se ovšem nijak zásadně nešířila do samotné mřížkové struktury, jak je vidět na Obr. 67. Vzhledem k pozvolnému poklesu síly a jeho zvlněnému charakteru, patrném z ohybového diagramu, lze však předpokládat vznik drobných trhlin a porušení struktury v oblasti intenzivně namáhané tahem ještě před rozšířením trhliny v opěrné vrstvě.



Obr. 66 Kaskáda snímků zkoušky ohybem vzorku C1 (Diamond, TPMS)



Obr. 67 Trhlina v opěrné vrstvě vzorku C1



Obr. 68 Srovnání diagramů všech vzorků ze zkoušky ohybem

10 Závěr

Metody aditivní výroby mají oproti konvenčním technologiím značné výhody v možnostech dosažitelné tvarové složitosti a komplexity dílů. 3D tisk však má i celou řadu nevýhod, především z hlediska výrobních nákladů a produktivity.

V této práci se zabývám chováním dutých, 3D tištěných struktur, které jsou jinými technologiemi vyrobitelné jen obtížně nebo vůbec. Jedna z motivací pro zkoumání a následnou aplikaci mřížkových struktur vychází z analýzy namáhání a rozložení napětí v dílech. Při namáhání dílů je často největší napětí přenášeno materiálem nejbližší k povrchu a jádro dílu především zvyšuje hmotnost. Pokud by bylo jádro nahrazeno vhodnou strukturou, došlo by nejen ke snížení hmotnosti dílu, ale při výrobě i k úspoře materiálu a zrychlení tisku.

V úvodní části této práce popisuji základní principy vybraných metod 3D tisku kovů, které se v souvislosti s výrobou mřížkových struktur objevují v literatuře. Nejrozšířenější technologií pro výrobu mřížkových struktur je v současnosti metoda SLM (Selective Laser Melting), která byla použita i pro tisk vzorků v této práci.

V další části práce jsem se věnoval způsobům dělení a klasifikace celulárních, porézních materiálů, do kterých lze mřížkové struktury zařadit. Byly popsány jednotlivé typy mřížkových struktur, které jsem uvažoval pro tuto práci.

Pro samotnou realizaci práce, tj. návrh zkušebních tělísek a přípravu jejich CAD dat pro tisk, se mi podařilo získat studentskou licenci platformy nTop od společnosti nTopology v rámci jejich programu nTopEd zaměřeném na akademické pracovníky a studenty. Platforma nTop je specializovaný software pro modelování mřížkových struktur a topologickou optimalizaci s možností simulací a zpracování modelů pro tisk. Po seznámení s tímto SW jsem vybral 22 struktur, které jsem se následně pokoušel analyzovat.

V průběhu řešení jsem narazil na řadu problémů souvisejících především s velikostí a komplexitou exportovaných STL dat. Některé modely dosáhly velikosti přes 500 MB, což značně komplikovalo například jejich následné zpracování pro tisk. S tímto souvisí i problematika zjednodušování modelu tak, aby byl zpracovatelný i jinými SW, jako jsou programy pro umístování modelů na tiskovou platformu a přípravu tisku nebo simulační SW. Velká komplexita platformy nTop a teprve se rozvíjející databáze návodů vedla k nalezení možnosti zjednodušování STL modelů přímo v rámci programu nTop až v závěrečných fázích dokončování této práce. Z toho důvodu již nebylo možné ověřit přínosy tohoto zjednodušení pro přípravu tisku nebo simulační SW.

Další problém byl s výstupními formáty dat. Ačkoliv platforma nTop podporuje i přípravu dílů pro tisk a export modelů přímo do formátů různých druhů 3D tiskáren, nebylo možné tuto variantu použít. Důvodem byla snaha o co největší vyplnění pracovního prostoru tiskárny a nastavení ověřených parametrů tisku, k čemuž je dlouhodobě využíván jiný SW umožňující import modelů pouze ve formátu STL. Značná velikost STL modelů znamenala dlouhé časy jejich importu. Pro simulaci vzorků by bylo vhodné mít možnost exportu modelů do některého z široce podporovaných CAD formátů jako např. STEP. Tato možnost byla v průběhu řešení této práce do platformy nTop přidána, ale nebylo možné jí úspěšně aplikovat na komplexní modely obsahující mřížkové struktury.

Společnost nTopology, Inc. uvádí požadavky na hardware pro optimální využití jejich SW. Mezi tyto požadavky patří procesory Intel i7 nebo AMD Ryzen 7 s minimální frekvencí 3 GHz, minimálně 16 GB RAM, ale pro komplexní simulace nebo výpočty sítí je doporučováno více než 64 GB. Grafické karty jsou doporučovány s minimem 4 GB VRAM například NVIDIA Quadro, AMD FirePro, nebo AMD Radeon Pro WX. Já byl schopen poměrně úspěšně používat nTop na notebooku s procesorem Intel i7-4510U, 2 GHz, 8 GB RAM a grafickou kartou Nvidia GeForce GT 750M. Nicméně je velmi pravděpodobné, že by některé problémy způsobené velkými STL soubory odpadly při použití výkonnějšího HW.

Platforma nTop umožňuje simulace vytvořených modelů metodou konečných prvků. V současné době obsahuje statickou analýzu, frekvenční analýzu, simulaci vzpěru a tepelnou analýzu. Analýza statického namáhání je relevantní pro tuto práci, a proto jsem provedl několik simulací vzorků pro zkoušku tlakem. Přes zkoušení různých parametrů nastavení se simulace nechovala ve shodě s očekáváním a u některých vzorků docházelo např. k průhybu horní opěrné desky viz. Obr. 37. Výsledky simulací jsem porovnal s výsledky tlakové zkoušky z čehož byla patrná jejich malá shoda s realitou. Na základě těchto výsledků byla snaha o provedení obdobných simulací v jiných softwarech, ale v žádném ze zkoušených SW (Solid Edge, SolidWorks, SimufactForming a SimScale) nebylo možné simulaci provést. Solid Edge a SolidWorks umožňují simulace pevnostního chování dílu pouze na modelech vytvořených v příslušném SW, SimufactForming nedokázal načíst takto složitý STL soubor z důvodu obrovského počtu elementů sítě (přes 1 milion) a SimScale nepodporuje formát STL pro analýzy mechanického namáhání.

Po provedení studia dostupné literatury zabývající se zkoušením mechanických vlastností mřížkových struktur a analýze použitých zkušebních těles jsem dospěl k závěru, že obsahují určité nedostatky (například praskání při přechodu do upínací části viz Obr. 27). Proto jsem se rozhodl pro vytvoření vlastního návrhu tvaru zkušebních těles. Dalším důvodem pro návrh vlastních zkušebních těles byl nedostatek článků zabývajících se zkouškami tahem a ohybem. Dále jsem

vytvořil metodiku, podle které je možné připravovat zkušební tělesa, realizovat vlastní zkoušky a provádět vyhodnocování analyzovaných výsledků.

V rámci praktické části jsem pro 22 vybraných struktur vytvořil modely zkušebních tělísek na tlakovou, tahovou a ohybovou zkoušku, které byly exportovány ve formátu STL a připraveny pro tisk. Z těchto 22 struktur byly, s ohledem na problémy při načítání modelů, vybrány struktury, pro které byla vytištěna zkušební tělesa. Tato tělesa jsem analyzoval zkouškou tahem, zkouškou tlakem a zkouškou ohybem.

Vlastní vyhodnocení analyzovaných vzorků je uvedeno v kap. 9. Ze zkoušky tlakem bylo patrné rozdělení struktur do dvou skupin. Do první skupiny lze zařadit struktury, které mají vyšší relativní hustoty a odolávají tak dobře zatížení tlakem. Ve druhé skupině byly struktury s nižšími relativními hustotami, u nichž docházelo velmi snadno k deformaci. Z naměřených dat byla sestavena závislost přenášeného tlakového napětí na relativní hustotě, podle které lze očekávat, že se zvětšující se relativní hustotou bude struktura lépe odolávat tlaku. U zkoušky tahem lze očekávat obdobnou závislost, ale charakter zatěžování lépe odhalil rozdíly v chování jednotlivých struktur. Například vzorky A (Schwarz) a B (Diamond) mají téměř srovnatelné relativní hustoty, ale jejich chování při tahovém namáhání bylo velmi rozdílné. Při zkoušce ohybem se kombinuje odezva struktur na tah a na tlak. U struktury typu FCC došlo při ohybu ke zborcení vzorku pod zatěžujícím trnem. Z tohoto důvodu bude pravděpodobně nutné nalézt lepší podmínky zkoušení, nebo upravit tvar zkušebního tělíska pro tyto tvárné příhradové struktury.

Na základě provedených analýz doporučuji pro další práci zabývat se možnostmi zjednodušení modelů a jejich optimalizací z hlediska počtu elementů, vlivem míry zjednodušení na kvalitu výsledného vzorku, popřípadě vlivem na jeho mechanické vlastnosti. Zjednodušení modelů by také mohlo umožnit tisk více modelů i při stávajícím vybavení a rozšířit tak provedenou analýzu i o další struktury. Dále doporučuji sledovat chování struktury v průběhu zdvihu například počítačovou tomografií, aby byl odhalen charakter deformace a chování uvnitř struktury. Alternativou k počítačové tomografii je metalografické vyhodnocování, které by ovšem, jakožto destruktivní metoda, značně navyšovalo počet potřebných vzorků. Dále doporučuji zabývat se vlivem tiskových parametrů, orientace vzorku při tisku, velikosti základních buněk a průměrů prutů na mechanické vlastnosti struktur a jejich chování při zatěžování. Dále doporučuji zkoumat vliv tloušťky opěrných desek při namáhání ohybem a pokusit se o nalezení optimálního vztahu mezi parametry mřížkové struktury a tloušťkou skořepiny případného dílu. Dále doporučuji analýzu vlastností rozšířit o chování struktur při namáhání krutem nebo o cyklické zatěžování a únavové chování. U vybraných struktur lze také provést dynamické zatěžování a posoudit například jejich schopnost pohlcovat energii nárazu.

V neposlední řadě by bylo prospěšné provést diskuzi s výrobcem platformy nTop ohledně problémů a úskalí, se kterými jsem se potýkal v rámci řešení této práce. Cílem by mělo být identifikovat jejich příčiny a navrhnout řešení, která by umožnila snadnější pokračování ve zkoumání této problematiky.

Problematika mřížkových struktur je velmi rozsáhlá a zajímavá nejen z hlediska mechanických vlastností. Proto doufám, že tato práce poslouží jako základ pro další bádání v této oblasti a nebude jen ojedinělým exkurzem do světa celulárních materiálů na této škole.

11 Literatura

- [1] ASHBY, M.F. The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2005, **364**(1838), 15-30. DOI: 10.1098/rsta.2005.1678. ISSN 1364-503X. Dostupné také z: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2005.1678>
- [2] HAO, L, D RAYMONT, C YAN, A HUSSEIN a P YOUNG. Design and additive manufacturing of cellular lattice structures. *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*. CRC Press, 2011, 2011-09-16, 249-254. DOI: 10.1201/b11341-40. ISBN 978-0-415-68418-7. Dostupné také z: <http://www.crcnetbase.com/doi/10.1201/b11341-40>
- [3] MACONACHIE, Tobias, Martin LEARY, Bill LOZANOVSKI, Xuezhong ZHANG, Ma QIAN, Omar FARUQUE a Milan BRANDT. *SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges*. 2019, **183**. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108137. ISSN 02641275. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127519305751>
- [4] ZHANG, X.Z., M. LEARY, H.P. TANG, T. SONG a M. QIAN. Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding challenges. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2018, **22**(3), 75-99. DOI: 10.1016/j.cossms.2018.05.002. ISSN 13590286. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359028617301870>
- [5] POHLOVÁ, Kateřina. Ocelový příhradový nýtovaný most přes řeku Moravu. In: *Databáze mostů a tunelů ČR* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <http://www.mosty-tunely.cz/objekty/detail/litovel-stare-mesto/>
- [6] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN a David RAYMONT. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012, **62**, 32-38. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.06.002. ISSN 08906955. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695512001095>
- [7] TANG, Y., Y. ZHOU, T. HOFF, M. GARON a Y. F. ZHAO. Elastic modulus of 316 stainless steel lattice structure fabricated via binder jetting process. *Materials Science and Technology*. 2015, **32**(7), 648-656. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000084. ISSN 0267-0836. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743284715Y.0000000084>
- [8] SINGH, Riya, Akash GUPTA, Ojestez TRIPATHI, et al. Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview. *Materials Today: Proceedings*. 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.635. ISSN 22147853. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785320313900>
- [9] HERZOG, Dirk, Vanessa SEYDA, Eric WYCISK a Claus EMMELMANN. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 2016, **117**, 371-392. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019. ISSN 13596454. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645416305158>
- [10] GOKULDOSS, Prashanth Konda, Sri KOLLA a Jürgen ECKERT. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials*. 2017, **10**(6). DOI: 10.3390/ma10060672. ISSN 1996-1944. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/10/6/672>

- [11] ZIAEE, Mohsen a Nathan B. CRANE. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*. 2019, **28**, 781-801. DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.031. ISSN 22148604. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860418310078>
- [12] Selective Laser Sintering. In: *CUSTOMPART.net* [online]. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
- [13] MURR, L.E., S.M. GAYTAN, A. CEYLAN, et al. Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting. *Acta Materialia*. 2010, **58**(5), 1887-1894. DOI: 10.1016/j.actamat.2009.11.032. ISSN 13596454. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645409008118>
- [14] Binder Jetting: 3D Printing Technology. In: *Threeding: 3D printing marketplace* [online]. 23. 10. 2016 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://www.threeding.com/blog/%E2%80%8Bbinder-jetting-3d-printing-technology>
- [15] GIBSON, Lorna J. a M. F. ASHBY. *Cellular solids: structure and properties*. 2nd ed. (1st pbk ed. with corr.). Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999. Cambridge solid state science series. ISBN 05-214-9911-9.
- [16] Kolektiv autorů. *Malý encyklopedický slovník A-Ž*. Praha: Academia, 1972. ISBN 21-082-72.
- [17] BHATE, Dhruv, Clint PENICK, Lara FERRY a Christine LEE. Classification and Selection of Cellular Materials in Mechanical Design: Engineering and Biomimetic Approaches. *Designs*. 2019, **3**(1). DOI: 10.3390/designs3010019. ISSN 2411-9660. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/2411-9660/3/1/19>
- [18] GIBSON, Lorna J., M. F. ASHBY a Brendan A. HARLEY. *Cellular materials in nature and medicine*. New York: Cambridge University Press, 2010. ISBN 05-211-9544-6.
- [19] Cork. In: *Gallery of Images from the UCMP ESEM* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://ucmp.berkeley.edu/esem/gallery.html>
- [20] WAUGSBERG. *Bienenwabe mit Eiern und Brut 5.jpg* [online]. In: 22. dubna 2007 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Bienenwabe_mit_Eiern_und_Brut_5.jpg#filelinks. Oříznuto. Tento soubor podléhá licenci Creative Commons.
- [21] BHATE, Dhruv, Clint PENICK, Lara FERRY a Christine LEE. Classification and Selection of Cellular Materials in Mechanical Design: Engineering and Biomimetic Approaches. *Designs*. 2019, **3**(1). DOI: 10.3390/designs3010019. ISSN 2411-9660. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/2411-9660/3/1/19>
- [22] JEŽEK, František. *Diferenciální geometrie: Pomocný učební text – díl II* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, červen 2005 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: https://www.fd.cvut.cz/personal/voracsar/GeometriePG/PGR020/DG_Jezek02.pdf
- [23] TANCOGNE-DEJEAN, Thomas, Marianna DIAMANTOPOULOU, Maysam B. GORJI, Colin BONATTI a Dirk MOHR. 3D Plate-Lattices: An Emerging Class of Low-Density Metamaterial Exhibiting Optimal Isotropic Stiffness. *Advanced Materials*. 2018, **30** (45). DOI: 10.1002/adma.201803334. ISSN 09359648. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.201803334>

- [24] GABA, Eric. *Minimal surface curvature planes-fr.svg* [online]. In: 1 June 2006 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Sting/Profile#/media/File:Minimal_surface_curvature_planes-fr.svg. Přeloženo. Tento soubor podléhá licenci Creative Commons.
- [25] GALEBACH, Brian. *Collection of n-uniform tilings* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.probabilitysports.com/tilings.html>
- [26] TOMRUEN. *Uniform tiling of Euclidean tiling* [online]. In: 2 June 2015 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Euclidean_tilings_by_convex_regular_polygons. Přeloženo. Tyto soubory podléhají licenci Creative Commons.
- [27] ALLEN, George. *NTopology Modeling Technology [online]* [cit. 2020-06-23] Dostupné z: <https://ntopology.com/resources/whitepaper-ntopology-modeling-technology/>.
- [28] ALSALLA, Hamza, Liang HAO a Christopher SMITH. Fracture toughness and tensile strength of 316L stainless steel cellular lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *Materials Science and Engineering: A*. 2016, **669**, 1-6. DOI: 10.1016/j.msea.2016.05.075. ISSN 09215093. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509316305925>
- [29] GRAHAM, John. *Introduction to the Ramp Block* [online]. In: 28. květen 2020 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://support.ntopology.com/hc/en-us/articles/360041676813-Introduction-to-the-Ramp-Block>
- [30] ŘEZNÍČEK, CSC., doc. Ing. Jan. *Kombinované namáhání: Základní typy namáhání* [online]. In: [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/14996517/>
- [31] JOHNSON, Blake. *Creating Surface Meshes from Implicit Bodies* [online]. In: 28. květen 2020 [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <https://support.ntopology.com/hc/en-us/articles/360047925553-Creating-Surface-Meshes-from-Implicit-Bodies>
- [32] MECKES, Alex. *Meshing Techniques: Common Workflows* [online]. In: 30. červen 2020 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://support.ntopology.com/hc/en-us/articles/360050217294-Meshing-Techniques-Common-Workflows>

Seznam obrázků

Obr. 1 Průběhy napětí při namáhání ohybem a krutem [30].....	8
Obr. 2 Nýtovaný ocelový příhradový most přes řeku Moravu [5] a jedna FCC buňka v programu nTopology	9
Obr. 3 Schéma metody SLM [12]	11
Obr. 4 Schéma metody EBM [13].....	12
Obr. 5 Schéma metody BJ [14]	13
Obr. 6 (a) SEM snímek cedrového dřeva [18], (b) struktura korku [19], (c) včelí plástev [20], (d) křídla vážky, (e) příčný řez jelením parohem, (f) pemza	14
Obr. 7 Přehled pravidelných voštin z programu nTopology. Zleva trojúhelníková, šestiúhelníková, Re-entrant a čtvercová.....	16
Obr. 8 Makro fotografie otevřené pěny (houbička na nádobi).....	16
Obr. 9 Makro fotografie uzavřené pěny (balící materiál)	17
Obr. 10 Přehled základních buněk některých příhradových struktur z programu nTopology. Horní řada zleva: Jednoduchá kubická, BCC, FCC, Diamond, Fluorite a Octet. Dolní řada zleva: Truncated cube, Truncated octahedron, Kelvin cell, IsoTruss, Re-entrant a Weaire-Phelan	18
Obr. 11 Minimální plocha vytvořená mýdlovou bublinou na drátovém rámu. Jedná se o Sherkovu dvojitě periodickou plochu.....	18
Obr. 12 Schéma hlavních křivostí [24]	19
Obr. 13 Přehled struktur odvozených z minimálních ploch v programu nTopology. Zleva Gyroid, Schwarz P, Schwarz diamond, Lidinoid, Split P a Neovius. Horní řada minimální plocha s přiřazenou tloušťkou. V dolní řadě je minimální plocha použita jako hranice	20
Obr. 14 Přehled plátových struktur z programu nTopology. Zleva FCC foam, BCC foam a Simple cubic foam.....	20
Obr. 15 Výběr teselací [21]. Schémata převzata z [26].....	22
Obr. 16 Příklady rozdílné konektivity. Kubická teselace, element prut.....	23
Obr. 17 Ilustrace vlastností implicitní funkce $F(P)$ [27]	24
Obr. 18 Porovnání b-reps a implicitního popisu [27].....	25
Obr. 19 Rozvržení uživatelského prostředí softwaru nTop.....	26
Obr. 20 Ukázka workflow I.....	27
Obr. 21 Ukázka workflow II	28
Obr. 22 Vliv adaptivity na výslednou síť [31]	29
Obr. 23 Ukázka workflow III.....	29
Obr. 24 Model tělíska pro zkoušku tlakem	30
Obr. 25 Prvotní návrh tělíska pro zkoušku tahem.....	31
Obr. 26 Model tělíska pro zkoušku tahem	31
Obr. 27 CT sken vzorku tahové zkoušky u kterého došlo k porušení v oblasti přechodu do upínací části [28].....	32
Obr. 28 Blok ramp funkce.....	32
Obr. 29 Ukázky spojitostí [29]	33
Obr. 30 Grafické znázornění ramp funkce [29]	33
Obr. 31 Modře vyznačená hranice ramp funkce (vlevo) definuje prostor, kde nedojde k modifikaci mřížkové struktury. Vpravo je vidět vliv ramp funkce na zkušební tělísko tahové zkoušky.....	34
Obr. 32 Model tělíska pro zkoušku ohybem	34
Obr. 33 Příklad vygenerování nepoužitelné sítě mřížkové struktury s průměrem prutů 1 mm. Vlevo velikost elementů sítě 0,3 mm a vpravo 0,9 mm.....	35

Obr. 34 Příklad STL sítě před zjednodušením (vlevo) a po zjednodušení (vpravo).....	35
Obr. 35 Field-Driven design.....	39
Obr. 36 Okrajové podmínky simulace	40
Obr. 37 Simulace vzorku s BCC mřížkovou strukturou – posunutí (průhyb vrchní desky)	40
Obr. 38 Vytisknutý vzorek BCC struktury před a po zkoušce tlakem	41
Obr. 39 Výsledky simulace pro strukturu typu Gyroid - posunutí.....	41
Obr. 40 Vytisknutý vzorek struktury typu Gyroid před a po zkoušce tlakem.....	42
Obr. 41 Simulace v Solid Edge - posunutí	43
Obr. 42 Simulace v Solid Edge - napětí	43
Obr. 43 Vytisknuté vzorky pro zkoušku tlakem.....	45
Obr. 44 Vytisknuté vzorky pro zkoušku tahem.....	45
Obr. 45 Vytisknutý vzorek pro zkoušku ohybem.....	46
Obr. 46 Rozložení vzorků na tiskové platformě	48
Obr. 47 Vzorky pro předběžné zkoušky tlakem.....	49
Obr. 48 Zorné pole kamery při prvotních zkouškách tlakem.....	50
Obr. 49 Diagram předběžných tlakových zkoušek	50
Obr. 50 Kaskády snímků tlakové zkoušky mřížkových struktur	51
Obr. 51 Srovnání diagramů zkoušky tlakem všech vzorků.....	52
Obr. 52 Modely mřížkových struktur vzorků D až J ilustrující rozdíly ve zdánlivé hustotě	53
Obr. 53 Závislost přenášeného tlakového napětí na relativní hustotě vzorků.....	55
Obr. 54 Kaskáda snímků z tahové zkoušky vzorek A1 (Schwarz)	56
Obr. 55 Řez modelem vzorku A rovinou, ve které došlo k lomu	56
Obr. 56 Kaskáda snímků z tahové zkoušky vzorek B1 (Diamond, TPMS).....	56
Obr. 57 Poloha a směr šíření trhlin ve vzorcích B, řez modelem rovinou, ve které docházelo k lomu.....	57
Obr. 58 Kaskáda snímků z tahové zkoušky vzorek C1 (BCC)	57
Obr. 59 Poloha a směr šíření trhliny ve vzorku C1	58
Obr. 60 Srovnání tahových diagramů všech vzorků	58
Obr. 61 Závislost meze pevnosti v tahu na relativní hustotě vzorků	59
Obr. 62 Kaskáda snímků zkoušky ohybem vzorku A1 (Schwarz).....	61
Obr. 63 Poloha a směr šíření trhliny ve vzorku A1	62
Obr. 64 Kaskáda snímků zkoušky ohybem vzorku B1 (FCC).....	63
Obr. 65 Zborcení FCC struktury při zkoušce ohybem	64
Obr. 66 Kaskáda snímků zkoušky ohybem vzorku C1 (Diamond, TPMS)	65
Obr. 67 Trhlina v opěrné vrstvě vzorku C1	66
Obr. 68 Srovnání diagramů všech vzorků ze zkoušky ohybem	66

Seznam tabulek

Tab. 1 Zdánlivé a relativní hustoty vzorků	53
Tab. 2 Napětí ve vztahu k relativní hustotě vzorků.....	54
Tab. 3 Mez pevnosti vztažená na relativní hustotu vzorků	59