



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

NÁVRH AUXETICKÝCH STRUKTUR PRO 3D TISK

DESIGN OF AUXETIC STRUCTURES FOR THE 3D PRINT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vítězslav Sobol

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Červinek

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Vítězslav Sobol**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Červinek**
Akademický rok: 2021/2022

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh auxetických struktur pro 3D tisk

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vývoj aditivních technologií umožnil výrobu struktur s komplexní geometrií, které mohou dosahovat široké škály užitných vlastností při změně vnitřního uspořádání. Nejnovější aplikace se zaměřují na konfigurace s takzvaným záporným Poissonovým číslem označované jako auxetické struktury. V praxi to znamená, že pokud je materiál tahově zatěžován v jednom směru, roztáhne se i ve směru kolmém. Tato vlastnost může být výhodná například v aplikacích uvažujících průnik cizího tělesa strukturou, kdy dojde k semknutí strukturovaného materiálu v místě průniku a lokálně tím vzroste tuhost struktury.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je navrhnout prostorovou mikro–prutovou strukturu se záporným Poissonovým číslem, kterou bude možné vyrobit pomocí technologie selective laser melting z nerezové oceli 316L.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešeršní studie existujících typů plošných i prostorových auxetických struktur,
- stanovení základních předpokladů pro vnitřní architekturu se záporným Poissonovým číslem,
- návrh mikro–prutové konfigurace se záporným Poissonovým číslem,
- návrh zkušebních těles a jejich výroba technologií selective laser melting.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15–20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

GAO, Qiang, Wei-Hsin LIAO a Emilio P. CALIUS. Energy absorption of thin walled tube filled with gradient auxetic structures-theory and simulation: A Review. International Journal of Mechanical Sciences. 2021, 201(11), 1847-1870. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2021.106475

SAXENA, Krishna Kumar, Raj DAS a Emilio P. CALIUS. Three Decades of Auxetics Research – Materials with Negative Poisson's Ratio: A Review. Advanced Engineering Materials. 2016, 18(11), 1847-1870. ISSN 14381656. Dostupné z: doi:10.1002/adem.201600053

CHEN, Zeyao, Zhe WANG, Shiwei ZHOU, Jianwang SHAO a Xian WU. Novel Negative Poisson's Ratio Lattice Structures with Enhanced Stiffness and Energy Absorption Capacity: A Review. Materials. 2018, 11(7), 1847-1870. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11071095

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Chování, kdy se materiál při tahovém zatížení v jednom směru roztáhne i ve směru kolmém, se nazývá auxetické a je spojováno např. se zvýšenou odolností vůči průniku těles. Auxetické chování je zejména důsledkem typické geometrie vnitřní struktury, proto ho lze dosáhnout jedinečným uspořádáním prutů v mikro-prutové soustavě. Díky aditivním technologiím, jako je např. Selective Laser Melting (SLM), je možné takto komplexní geometrii vyrobit.

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem prostorové mikro-prutové struktury, která bude vykazovat auxetické chování a bude vyrobitelná metodou SLM. Na základě rozsáhlé rešerše týkající se tématu 2D i 3D auxetických struktur byl navržen nový typ auxetické struktury. Vyrobitelnost byla ověřena zhotovením několika vzorků v různých rozměrových konfiguracích. Auxetické chování a mechanické vlastnosti byly následně otestovány prostřednictvím pádového testu. Jeho vyhodnocením bylo možné určit vliv rozměrových parametrů na celkové chování struktury.

KLÍČOVÁ SLOVA

Auxetický, mikro-prutová struktura, aditivní technologie, Selective Laser Melting, ocel 316L

ABSTRACT

Behavior in which the material expands in one direction and in a perpendicular direction under tensile loading is called auxetic and is associated, e. g. with increased indentation resistance. Auxetic behavior is mainly due to the typical geometry of the internal structure. Therefore, it can be achieved by a unique arrangement of inner micro-lattice structure. Through additive technologies such as Selective Laser Melting (SLM), it is possible to manufacture such complex geometry.

This bachelor thesis deals with the design of a spatial micro-lattice structure that will exhibit auxetic behavior and can be made by the SLM method. Based on an extensive research on the topic of 2D and 3D auxetic structures, a new type of auxetic structure was designed. The manufacturability was verified by making several samples in different dimensional configurations. Auxeticity and mechanical properties were subsequently tested using a drop test. By evaluating it, it was possible to determine the influence of dimensional parameters on the overall behavior of the structure.

KEYWORDS

Auxetic, micro-lattice structure, additive technology, Selective Laser Melting, steel 316L

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SOBOL, Vítězslav. *Návrh auxetických struktur pro 3D tisk*. Brno, 2022, 69 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Červinek.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu Ing. Ondřeji Červinkovi za veškeré podněty, které vedly k zdokonalení této práce, za čas, který věnoval konzultacím řešené problematiky, a také za poskytnutí prostředků pro provedení experimentální části práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, která mi byla během celého studia nepostradatelnou oporou.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci *Návrh auxetických struktur pro 3D tisk* jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Ondřeje Červinka. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

V Brně, dne 17. května 2022

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Vývoj auxetických struktur	14
2.2	Vliv Poissonova poměru na chování struktur	16
2.3	Charakteristiky auxetických struktur a jejich využití v praxi	18
2.3.1	Vlastnosti struktur	18
2.3.2	Vlastnosti auxetických struktur	21
2.3.3	Aplikační potenciál	22
2.4	Typy struktur	23
2.4.1	Rovinné auxetické struktury	23
2.4.2	Prostorové auxetické struktury	26
2.5	Návrh auxetických struktur	29
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	31
3.1	Analýza problému	31
3.2	Cíl práce	31
4	MATERIÁL A METODY	32
4.1	Technologie výroby	32
4.2	Návrh 3D mikro-prutové struktury	34
4.3	Experimentální zkouška vyrobených struktur	36
4.3.1	Pádový test	36
4.3.2	Způsob vyhodnocení naměřených dat	37
5	VÝSLEDKY	39
5.1	Analytické modely	39
5.1.1	Nový typ auxetické struktury	39
5.1.2	Relativní hustota	40
5.1.3	Konfigurace vyráběných struktur	42
5.1.4	Závislost velikosti μ na délce ramen	43
5.2	MKP simulace	43
5.3	Experiment	44
5.3.1	Vyrobené struktury	44
5.3.2	Kamerový záznam	47
5.3.3	Záznam tenzometru	49

6	DISKUZE	54
7	ZÁVĚR	57
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	58
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	62
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	65
11	SEZNAM TABULEK	68
12	SEZNAM PŘÍLOH	69

1 ÚVOD

Vlastnosti materiálů je možné přizpůsobit konkrétním potřebám prostřednictvím cílených úprav, například úpravou jejich vnitřní geometrie nebo uspořádání. Takto již vzniklo několik „umělých“ vnitřně strukturovaných materiálů a struktur s neobvyklými vlastnostmi. Příkladem mohou být auxetické materiály a struktury, které jsou jedinečným zástupcem umělých materiálů, konkrétně metamateriálů. Jejich výjimečným rysem je záporné Poissonovo číslo. To je důsledkem zúžení materiálu ve směru kolmém k zatěžování při vnějším tlakovém zatížení. U většiny materiálů je hodnota Poissonova čísla kladná.

Auxetické materiály s sebou přináší výhody v podobě zcela nového způsobu chování, zvýšené absorpce energie, odolnosti vůči průniku těles aj. Materiály s těmito vlastnostmi mají potenciál být využity v automobilovém a sportovním průmyslu, biomedicině či armádním prostředí. Aby mohly být plně využity, je nutné věnovat pozornost studiu jejich charakteru za účelem vývoje auxetických struktur vhodných pro konkrétní aplikace.

Nejčastěji používanými typy struktur jsou struktury typu *re-entrant*, jelikož nabízí snadnou realizaci rovinných i prostorových struktur. Ty jsou navrhovány v podobě mikro-prutových buněčných struktur, kdy se jedinečná geometrie elementárních buněk promítne do chování struktury jako celku. Taková struktura v sobě kombinuje nízkou hmotnost vlastní mikro-prutovým buněčným strukturám spolu s jedinečnými vlastnostmi auxetických materiálů. Pro jejich návrh je vhodné použít analytické a numerické metody a výsledný design otestovat experimentálně. Tímto způsobem byl navržen nový typ auxetické geometrie i v této práci.

Možným způsobem výroby je použití aditivních technologií, které umožňují vyrábět složité prostorové geometrie, jež by jinými výrobními metodami nebylo možné efektivně zhotovit. V případě technologie Selective Laser Melting (SLM) je materiál použit ve formě kovového prášku a následně účinkem výkonného laseru natavován jen v potřebných místech. Takto lze vyrobit i relativně složitou geometrii jako zmíněné mikro-prutové struktury. Díky nim je ze základového materiálu vytvořen nový metamateriál s vhodnou vnitřní architekturou odpovídající požadovaným vlastnostem.

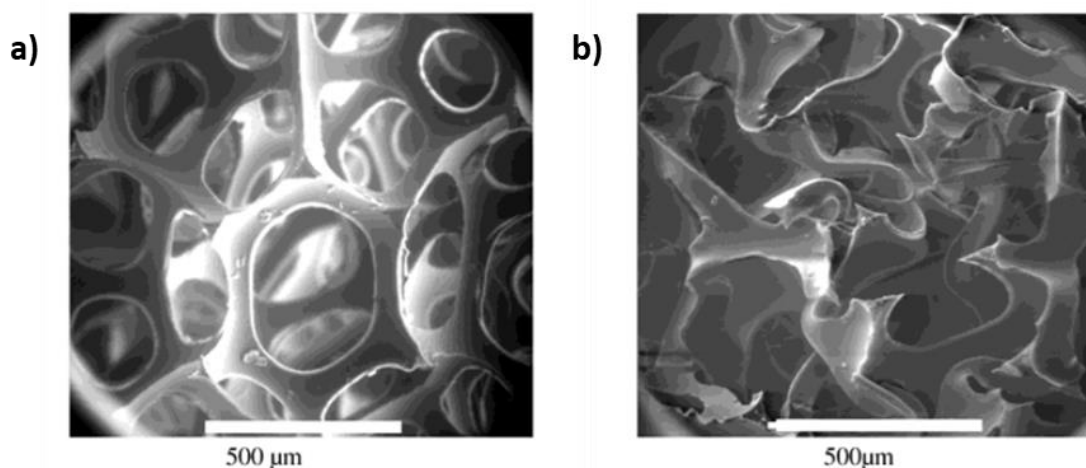
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Za účelem návrhu auxetických struktur je zapotřebí zmapovat informace, které nabízejí současné výzkumy. Následující kapitoly se věnují přehledu nejdůležitějších poznatků, které pomohou pochopit podstatu auxetického chování. Dále zdůrazňují výhody auxetických materiálů a prezentují výsledky studií, které se návrhům nových typů struktur také věnovaly.

2.1 Vývoj auxetických struktur

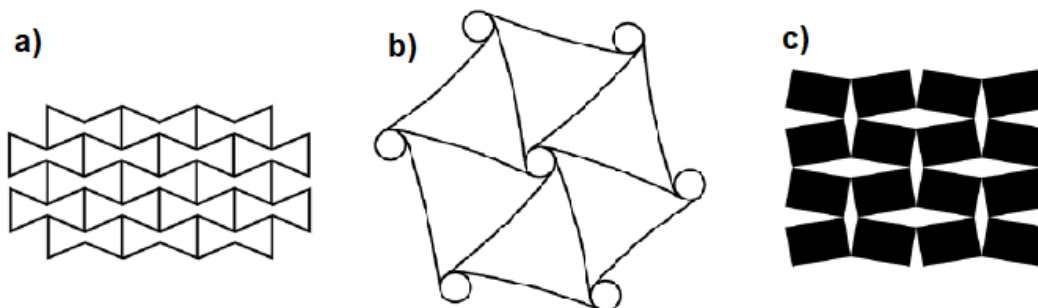
Poissonovo číslo (též Poissonův poměr) je materiálovou charakteristikou popisující závislost příčné změny rozměrů na změně rozměrů v podélném směru. Pojem „auxetický“ zavedl v roce 1991 K. E. Evans. Tento pojem odvodil z řeckého „*auxetikos*“, které poukazuje na „zvětšitelnost, rozšiřitelnost“ – charakteristickou vlastnost tahem namáhaných materiálů se záporným Poissonovým číslem [1].

První uměle vytvořený auxetický materiál navrhl Lakes v roce 1987, kdy popsal úpravu termoplastické pěny prostřednictvím tepelné transformace. V průběhu transformace došlo k přeuspořádání vnitřní struktury, a to tak, že v původní *open-cell* struktuře (ve struktuře se nenachází oblasti zcela oddělené od zbytku prostoru, obr. 2-1a) se objevily *re-entrant* buňky (buňky, jejichž stavba je místy prolomená dovnitř, obr. 2-1b). Takto upravený materiál vykazoval záporný Poissonův poměr. Na základě této vlastnosti, odlišné od netransformovaných polymerních pěn, bylo potřeba sestavit teoretický model vnitřní struktury auxetické pěny, aby bylo možné předpovídat její chování. [1]



Obr. 2-1 Snímek z elektronového mikroskopu: a) běžná; b) auxetická polymerní pěna [2]

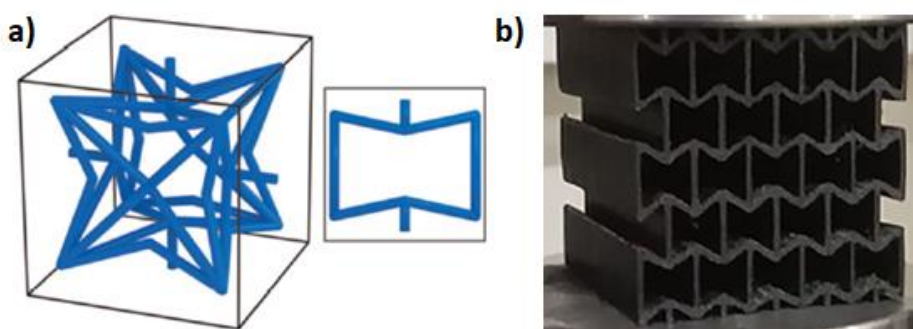
Existují tři hlavní skupiny auxetických struktur (rovinné i prostorové): *re-entrant* struktury, chirální struktury a rotační struktury (viz obr. 2-2) [3]. Jsou to nejdětalněji popsány modely, kterými se vysvětluje chování přírodních auxetických materiálů. V současnosti vznikají stále nové typy auxetických struktur, avšak jedná se většinou o modifikace již existujících základních buněk, které lze zařadit do výše zmíněných skupin.



Obr. 2-2 Příklady hlavních skupin auxetických struktur: a) re-entrant; b) chirální; c) rotační [1]

Jelikož je Poissonův poměr nezávislý na měřítku, lze auxetické materiály navrhovat jak v makroskopických rozměrech, tak i na molekulární úrovni. Proto jsou nové auxetické struktury často navrhovány (zejména typ *re-entrant*) jako prutové struktury (prostorové i rovinné – skořepinové; obr. 2-3). To vede k výraznému zjednodušení z hlediska návrhu, výpočtů i výroby [2].

Prutovou strukturu lze chápat jako uspořádání prutů navzájem propojených ve společných uzlech (styčnicích). Podobně jako mřížkové struktury jsou charakterizovány elementární buňkou. Některé mohou vykazovat i translační symetrii. Mikro-prutová struktura se od prutové struktury liší jen měřítkem. Díky tomu lze auxetickou (mikro-prutovou) strukturu analyzovat i jako metamateriál a srovnávat jej s plnohodnotnými materiály jako takovými [4].



Obr. 2-3 a) Model elementární buňky auxetické mikro-prutové struktury; b) rovinná prutová struktura vytažená do prostoru (skořepinový typ) [5, 6]

2.2 Vliv Poissonova poměru na chování struktur

Hodnota Poissonova poměru mnohé vypovídá o chování daného materiálu, resp. struktur. Jeho hodnotu silně ovlivňuje způsob vnitřního uspořádání – mikrostruktura materiálu nebo geometrie elementární buňky struktury (v případě dostatečně malého měřítka lze geometrii buňky považovat za mikrostrukturu metamateriálu). Poissonovo číslo je poměr mezi příčnou deformací zatěžovaného tělesa vzhledem k jeho podélné deformaci a je bezrozměrné [1].

Poissonův poměr je definován následovně: [7]

$$\mu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (-) \quad (1)$$

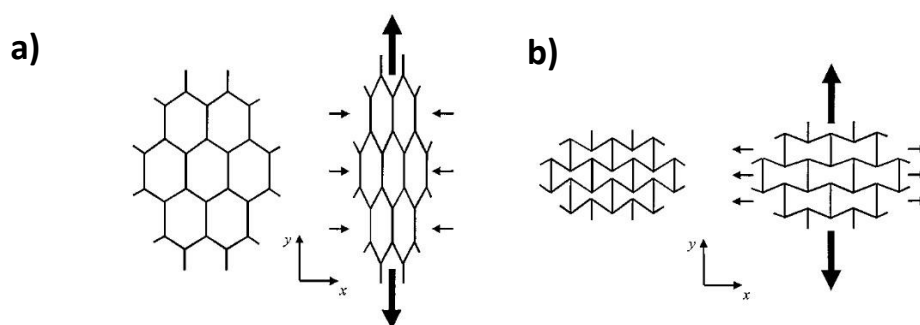
kde ε_1 je poměrná deformace ve směru zatěžování a ε_2 je poměrná deformace ve směru kolmém na směr zatěžování.

Poměrnou deformaci lze určit následovně: [7]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (-) \quad (2)$$

kde ΔL je délková změna v daném směru a L je původní délka.

Je důležité dodržovat znaménkovou konvenci. To znamená, že pokud je po zatížení rozměr v daném směru menší než původní, je člen ΔL záporný. Dojde-li při zatížení ke zvětšení rozměru v daném směru, je člen ΔL kladný. Pro auxetické materiály je číslo μ záporné, jelikož deformace v příčném i podélném směru má stejné znaménko (v obou směrech probíhá zvětšování – tahové zatížení, nebo kontrakce – tlakové zatížení, obr. 2-4b) [7].



Obr. 2-4 a) Běžná hexagonální síť deformující se rotací buněčných stěn (prutů) v místech spojení v důsledku tahového zatížení ve směru y; $\Delta L_y > 0$; $\Delta L_x < 0 \rightarrow \mu > 0$ (neauxetické).

b) Re-entrant hexagonální síť při stejném způsobu zatížení a mechanismu deformace jako (a); $\Delta L_y > 0$; $\Delta L_x > 0 \rightarrow \mu < 0$ (auxetické) [2]

Znaménko a velikost Poissonova poměru jsou u mikro-prutových struktur určeny převážně geometrií vnitřní struktury. U anizotropních struktur také záleží na směru zatěžování [2].

Lineárně elastický izotropní materiál (mající stejné vlastnosti ve všech směrech a lineární závislost napětí na deformaci) lze v rámci lineárních deformací popsat pomocí čtyř materiálových konstant. Jsou jimi Poissonovo číslo (μ), Youngův modul pružnosti v tahu (E), modul pružnosti ve smyku (G) a objemový modul pružnosti (B) [3].

Navzájem jsou propojeny následujícími vztahy: [3]

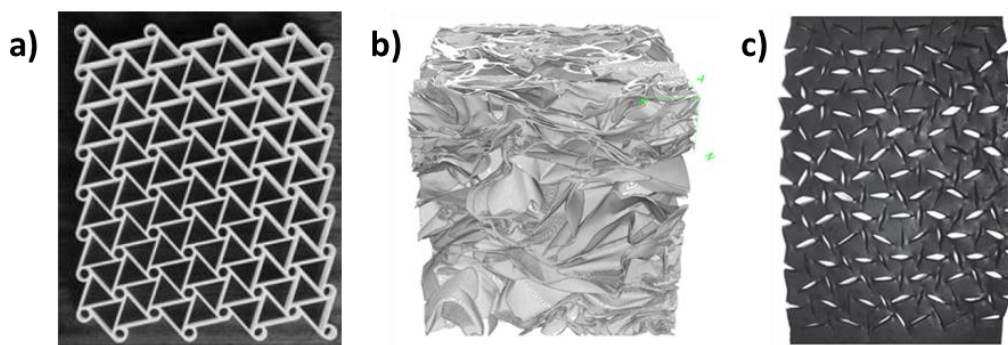
$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (\text{Pa}) \quad (3)$$

$$B = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (\text{Pa}) \quad (4)$$

E , G a B jsou obecně kladná čísla a hodnota μ se pohybuje v rozmezí od -1 do $0,5$.

Analytický předpoklad má omezení, jelikož pro μ blíží se k hodnotě -1 modul pružnosti ve smyku roste do nekonečna. Lze z toho však usoudit, že auxetické struktury snášejí zatížení krutem mnohem lépe než struktury běžné [3]. Materiály s hodnotou $\mu = 0,5$ (např. pryže [8]) nevykazují při zatížení žádnou objemovou změnu.

Zmíněné rovnice (3) a (4) platí také pro izotropní auxetické materiály, kterých je ovšem menšina (např. hexachirální struktura, obr. 2-5a) [9]. *Shan et al.* dále jako izotropní zmiňuje auxetické pěny, zvrásněné archy (fólie), nebo perforované archy (obr. 2-5b, c) [10]. Mimo prostorových auxetických pěn, u kterých je izotropie založena na obdobném principu jako u polykrystalických materiálů, jsou ostatní uvedené příkladem rovinných izotropních auxetických materiálů.



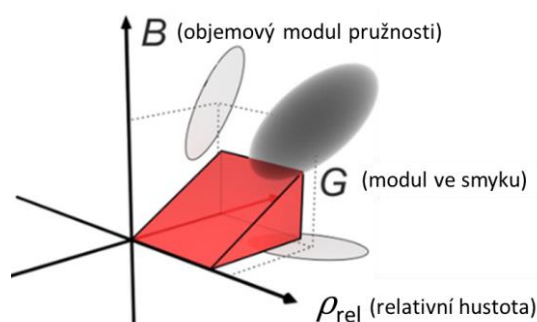
Obr. 2-5 Příklady izotropních auxetických struktur: a) hexachirální [11], b) zvrásněná hliníková fólie [12], c) perforovaný arch [13]

Chování většiny auxetických materiálů je však silně anizotropní, proto uvedené rovnice (3) a (4) nelze použít. Z toho důvodu se pro některé analytické modely zavádí *efektivní Youngův modul* E_{ef} , který je závislý na modulu pružnosti E základního materiálu a geometrii elementární buňky. V důsledku anizotropie tak u auxetických struktur záleží hodnota μ nejen na směru, ve kterém je vyhodnocován, ale i směru zatěžování [2, 3].

2.3 Charakteristiky auxetických struktur a jejich využití v praxi

Auxetické materiály si získaly pozornost díky svým jedinečným vlastnostem, které souvisí s jejich zápornou hodnotou μ . Kombinují totiž vysoký modul ve smyku (G) a schopnost absorbovat energii při nízké relativní hustotě (obr. 2-6) [5].

Podrobnější zkoumání potvrdilo jejich přínos v mnohých odvětvích, např. v medicíně [14], sportovním průmyslu [3], filtračních zařízeních [15], ochranných pomůckách [16] aj. V následující kapitole jsou stručně shrnuty nejdůležitější charakteristiky auxetických struktur.



Obr. 2-6 Milton-Ashby mapa auxetických materiálů (červený klín) zobrazující rozsah ρ_{rel} , G a B ve srovnání s běžnými materiály (šedý mrak) [5]

2.3.1 Vlastnosti struktur

Velkou část v současnosti navrhovaných auxetických struktur lze označit jako prutové struktury, kdy celek je založen na elementární buňce s definovanou geometrií (typicky mikro-prutové struktury). Existují vlastnosti, které jsou společné všem typům struktur. Těmi nejdůležitějšími jsou:

Relativní hustota je důležitá z hlediska celkové hmotnosti navrhované struktury. Udává poměr hmotnosti struktury vzhledem k hmotnosti plného materiálu o stejném objemu. Prostřednictvím relativní hustoty lze ostatní naměřené parametry vztáhnout k jednotkovému objemu nebo hmotnosti, což umožňuje srovnání struktur z různých studií. Vztahem ji lze vyjádřit takto [4]:

$$\rho_{\text{rel}} = \frac{m^*}{m_s} = \frac{V^*}{V_s} \quad (-) \quad (5)$$

kde m^* a V^* je hmotnost, resp. objem všech částí struktury a m_s a V_s je hmotnost, resp. objem plného materiálu o objemu vymezeném strukturou v prostoru.

Efektivní Youngův modul charakterizuje chování struktury v elastické oblasti při zatěžování. Pro některé struktury je možné ho určit analyticky, přičemž se odvíjí od Youngova modulu zákl. materiálu a geometrie buňky. Obecně ho lze určit takto [17]:

$$E_{ef} = \frac{F}{A\varepsilon} \quad (\text{Pa}) \quad (6)$$

kde F je zatěžující síla, A je plocha průřezu struktury ve směru zatěžování a ε je poměrná deformace.

Při omezení se pouze na prutové struktury je důležitým parametrem **Maxwellovo kritérium stability**, které rozlišuje struktury podle způsobu jejich deformace. Je-li elementární buňka považována za soustavu prutů o p prutech a j uzlech, pak je v rovině kritérium následující [4]:

$$M = p - 2j + 3 \quad (-) \quad (7)$$

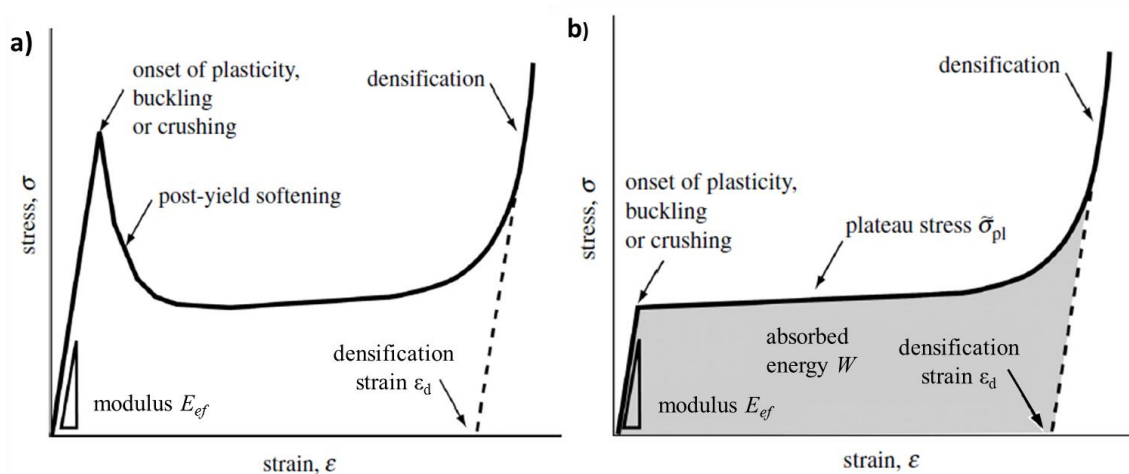
V prostoru je pak určeno takto [4]:

$$M = p - 3j + 6 \quad (-) \quad (8)$$

Jestliže je $M < 0$, pak je soustava vnitřně pohyblivá, tudíž při zatížení dojde ke zhroucení struktury (mechanismus deformace rotací ramen kolem uzlů). Pokud jsou uzly soustavy pevné a neumožňují rotaci ramen (jako je tomu u vyráběných struktur), jsou ramena při zatížení namáhána ohybem. Tyto struktury jsou označovány jako *bending-dominated* [4].

Pro $M \geq 0$ k žádnému vnitřnímu pohybu nedojde. Zatížení soustavy namáhá pruty pouze na tah či tlak. Tyto struktury jsou nazývány *stretch-dominated* [4].

Rozdělení podle Maxwellova kritéria z pohledu průběhu napětí v závislosti na deformaci ukazuje významný rozdíl v počátku deformace. Zatímco u *stretch-dominated* po lineární oblasti následuje prudký pokles napětí (*post-yield softening*; obr. 2-7a), u *bending-dominated* pomalu narůstá v oblasti *plateau stress* až do celkové densifikace (obr. 2-7b) [4].



Obr. 2-7 Typická závislost napětí-deformace pro: a) *stretch-dominated* struktury; b) *bending-dominated* struktury [4]

Schopnost **absorpce energie** při nárazu je další důležitou charakteristikou. Výhodou mikroprutových buněčných struktur je snížení hodnoty maximálního napětí (pod potřebnou kritickou mez) oproti plnému materiálu při pohlcení stejného množství energie. Absorpce spočívá v přeměně kinetické energie nárazového tělesa v deformační energii struktury [18].

Množství pohlcené energie, které lze označit jako *měrná absorbovaná energie*, se určuje jako obsah plochy pod křivkou napětí-deformace až do předem stanovené hodnoty poměrné deformace ε_0 [18].

$$W = \int_0^{\varepsilon_0} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (\text{J m}^{-3}) \quad (9)$$

kde $\sigma(\varepsilon)$ je okamžité napětí.

Zatímco měrná absorbovaná energie je vztažena na jednotku objemu, obdobně lze zavést i pohlcenou energii připadající na jednotku hmotnosti. Takto zavedená veličina se pak označuje jako *specific energy absorption (SEA)* [6].

$$SEA = \frac{W}{\rho_{\text{rel}} \rho_s} \quad (\text{J kg}^{-1}) \quad (10)$$

kde W je měrná absorbovaná energie, ρ_{rel} je relativní hustota struktury a ρ_s je hustota základového materiálu.

Pro účely nalezení optimální absorpce energie je zavedena **efektivita absorpce energie** (účinnost), která dává do vztahu pohlcenou energii do daného okamžiku a aktuální hodnotu napětí. Nabývá hodnot od 0 do 1 [19].

$$\eta(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma(\varepsilon)} \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (-) \quad (11)$$

Velikost absorbované energie je funkcí geometrie struktury i základového materiálu. Geometrie přímo ovlivňuje i způsob namáhání dle Maxwellova kritéria. U *stretch-dominated* struktur bývá pozorována vyšší efektivita absorpce energie oproti *bending-dominated* [4].

Krajní hodnotou deformace, pro kterou se určuje maximální užitečná absorbovaná energie, bývá tzv. *densification strain* ε_d , jejíž hodnotu lze určit několika způsoby [19]:

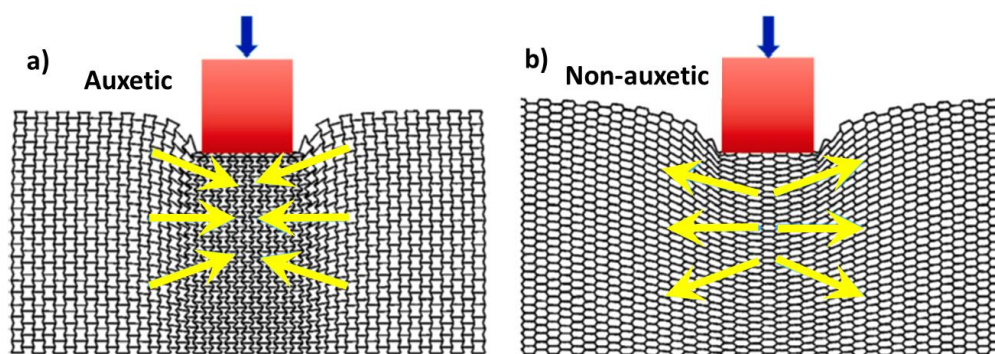
- i) ε_d je v místě průsečíku tečny k oblasti *plateau stress* a oblasti densifikace,
- ii) ε_d je v místě posledního lokálního minima napětí před oblastí densifikace,
- iii) ε_d je v místě, kde tečna ke křivce napětí má stejný sklon jako tečna k elastické oblasti,
- iv) ε_d je shodná s hodnotou deformace pro maximální účinnost absorpce energie.

V případech i) až iii) je hodnota ε_d spojena s okamžikem, kdy se jednotlivé pruty zhutní v jeden celek, zatímco u bodu iv) tomu tak může, ale nemusí být [19].

2.3.2 Vlastnosti auxetických struktur

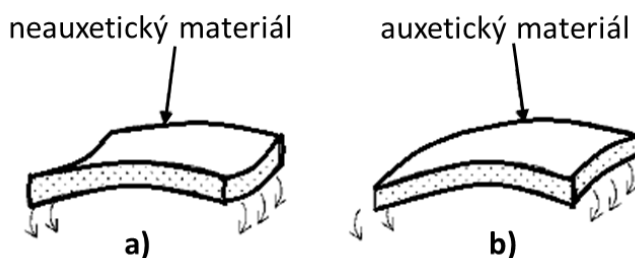
Tato kapitola se zaměřuje na vlastnosti, které odlišují auxetické materiály od materiálů s kladným Poissonovým číslem.

Z hlediska **absorpce energie** mají auxetické struktury potenciál pohltit větší množství energie při dynamickém rázu než běžné materiály, což bylo prokázáno u auxetických pěn ve srovnání s konvenčními [3]. S tímto souvisí další vlastnost, a to **odolnost proti vniknutí těles** (*indentation resistance*). Auxetické materiály se vyznačují vyšší odolností proti průniku, jelikož v důsledku kontrakce při tlakovém zatížení dojde k lokálnímu zpevnění vlivem přeskupení materiálu pod zasaženou oblast (obr. 2-8a). *Li et al.* to numericky i analyticky potvrdil, avšak jen za předpokladu, že buňky konvenční i auxetické struktury mají stejnou tloušťku stěny [20].



Obr. 2-8 a) Reakce auxetické struktury na náraz indentoru; zhutnění pod místem nárazu;
b) Reakce neauxetické struktury na náraz indentoru; upraveno dle [20]

Zajímavou vlastností, využitelnou zejména u prvků aplikovaných na členitě zakřivené povrchy, je **synklasticita**. Jestliže ohybový moment působí na neauxetický materiál, zaujme tvar s výskytem sedlové plochy (obr. 2-9a), zatímco u auxetického má deformovaný materiál oblast s vypuklou částí (obr. 2-9b). Přizpůsobení se prostorově zakřivenému povrchu může být vhodně využito ve sportovním (chrániče, helmy), leteckém či oděvním průmyslu [2].



Obr. 2-9 a) Sedlová plocha neauxetického materiálu; b) vypuklý tvar auxetického materiálu [2]

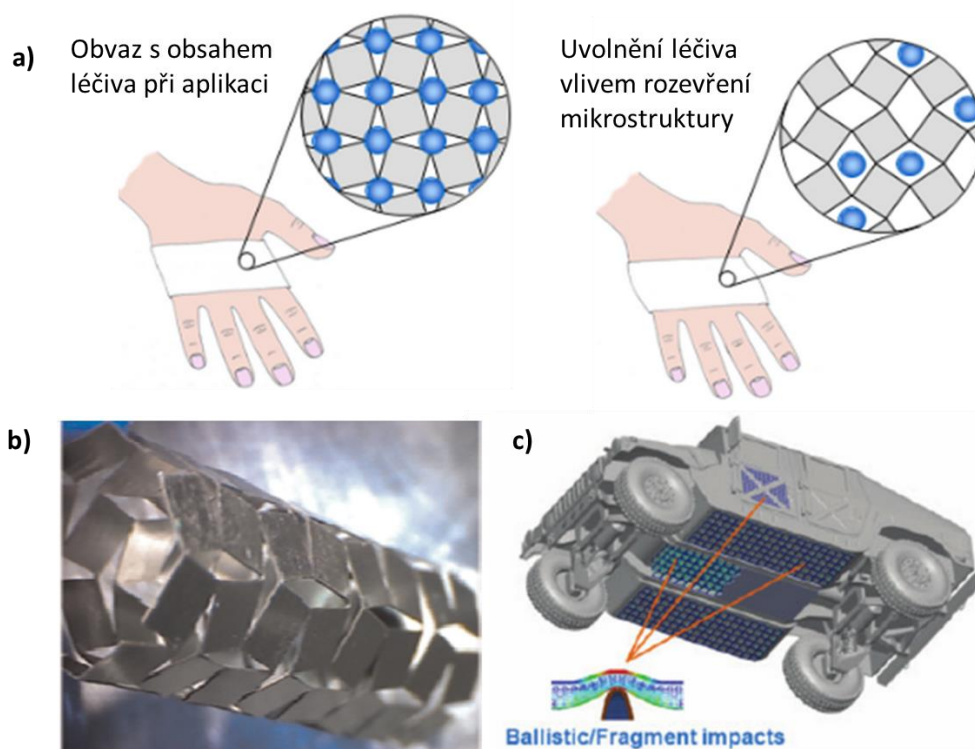
Scarpa et al. uvádí, že auxetické pěny ve srovnání s těmi běžnými nabízí až 10krát lepší **tlumení vibrací** [21].

2.3.3 Aplikační potenciál

V současnosti je možné nalézt několik aplikací, které využívají výhod auxetických materiálů, například změny velikosti prostoru mezi jednotlivými rameny *re-entrant* buněk nebo rotačních struktur při zatížení. Toho lze využít při regulaci účinnosti filtračních zařízení změnou velikosti pórů [15]. Obdobným způsobem lze aplikovat léčivé přípravky umístěné v obvazovém materiálu, který při zatížení roztáhne póry a uvolní přípravek v okamžiku namáhání postiženého místa (obr. 2-10a) [22]. Koncept auxetických bandáží navíc přináší výhodu z hlediska větší podobnosti s vlastnostmi lidské kůže. Dále bylo zkoumáno užití stentů vyrobených z rotačních auxetických struktur (obr. 2-10b) [3].

U sportovního vybavení najde uplatnění zejména schopnost absorpce energie při zachování nízké hmotnosti. Tato kombinace parametrů je žádoucí např. u chráničů, helem, rukavic či podrážek bot. Synklasticita na druhou stranu napomůže lepšímu přizpůsobení se v případě kolenních a loketních chráničů nebo helem [3, 22].

Zmírnění důsledků nárazu je důležitým faktorem u deformačních dílů, jako jsou nárazníky, výztuže či různé formy balistické ochrany (obr. 2-10c). Auxetické materiály kombinují vlastnosti, které z nich činí potenciální konkurenci existujícím formám ochrany [22].



Obr. 2-10 a) Princip auxetické bandáže s dávkováním léčiva; b) tubulární stent tvořený rotační auxetickou strukturou; c) balistické pláty z auxetického materiálu na armádním vozidle [3, 22]

2.4 Typy struktur

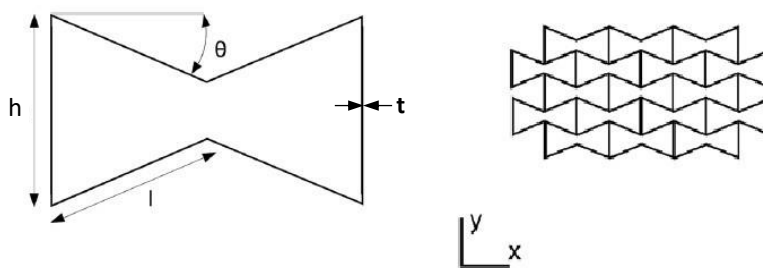
2.4.1 Rovinné auxetické struktury

Struktury typu *re-entrant* (2D)

Označení *re-entrant* poukazuje na „směřující dovnitř“, lze jej ale také chápat jako „prolomený“, což vystihuje orientaci některých ramen základní buňky. Mechanismus této skupiny je založený na zvětšování, resp. zmenšování úhlu prolomení při kompresi, resp. tahu. Míra auxetického chování je závislá na úhlu prolomení a poměru délek ramen. U rovinných struktur mají efektivní Youngův modul a Poissonův poměr opačný charakter, jelikož pro více záporné Poissonovo číslo je dosaženo nižšího E_{ef} . Konstrukce tohoto typu často spočívá ve vytažení auxetického 2D vzoru do prostoru (skořepinový typ), nebo vystřížením (vyříznutím) z plného plátu [1].

Motýlek (*Re-entrant Hexagonal Honeycomb, bow-tie*)

Geometrie tohoto typu (obr. 2-11) vznikla prolomením dvou vrcholů šestiúhelníku směrem dovnitř. *Master & Evans* u ní zkombinovali všechny tři mechanismy deformace, zatímco do té doby byly modely založeny jen na ohybu ramen buňky, nebo jejich rotace [1, 23].



Obr. 2-11 Model hexagonální *re-entrant* buňky (vlevo) a struktury (vpravo); h a l jsou délky ramen; t je tloušťka ramen; θ je úhel prolomení; upraveno dle [2]

Pro hexagonální buňku dle obrázku 2-11 je uváděn vztah pro výpočet Poissonova poměru a efektivního Youngova modulu ve směru zatěžování následovně [24, 25]:

$$\mu_{yx} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = \frac{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right) \sin \theta}{\cos^2 \theta} \quad (-) \quad (12)$$

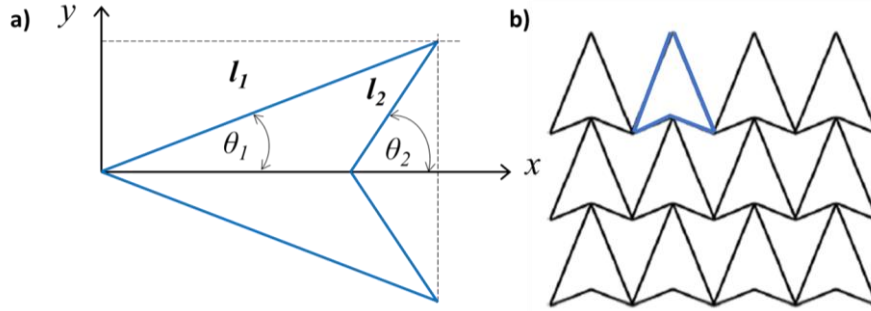
$$E_y = E_s \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\frac{h}{l} + \sin \theta}{\cos^3 \theta} \quad (\text{Pa}) \quad (13)$$

kde h a l jsou délky ramen, θ je úhel prolomení, který je v případě auxetické buňky záporný [24], E_s je Youngův modul základního materiálu a t je tloušťka ramen.

Zatímco běžná hexagonální buňka (viz obr. 2-4a) vykazuje izotropní chování, *re-entrant* buňka se chová silně anizotropně [2]. Na štíhlosti (poměr t/l) závisí modul ve smyku (G). Poměr délek ramen h/l je spolu s úhlem prolomení θ omezen v tom smyslu, aby se prolomená ramena neprotнула navzájem. Za předpokladu, že se jedná o soustavu prutů, je Maxwelllovo číslo $M < 0$, tudíž se jedná o *bending-dominated* strukturu.

Šípovité struktury (*Re-entrant triangular, arrowhead*)

Topologická optimalizace vedla k objevu další *re-entrant* buňky v podobě tzv. *arrowhead* struktury (obráz. 2-12), která se oproti *bow-tie* chová více anizotropně [7]. Z pohledu Maxwelllova kritéria se jedná o *bending-dominated* strukturu ($M < 0$).



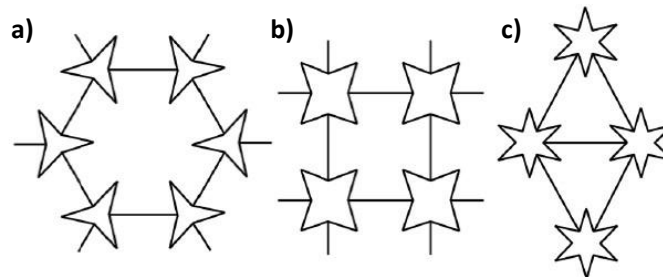
Obr. 2-12 a) Model *arrowhead* buňky, b) model struktury; upraveno dle [26]

Buňka je definována poměrem l_1/l_2 a jedním z úhlů θ_1 , θ_2 (viz obr. 2-12a); zároveň je na těchto parametrech závislé i auxetické chování struktury. *Lim* uvádí analytické odvození vztahu Poissonova poměru pro šípovou auxetickou buňku dle obr. 2-12 [26]:

$$\mu_{yx} = \frac{1}{\mu_{xy}} = -\tan(\theta_1)\tan(\theta_2) \quad (-) \quad (14)$$

Hvězdicové struktury (*Re-entrant star system*)

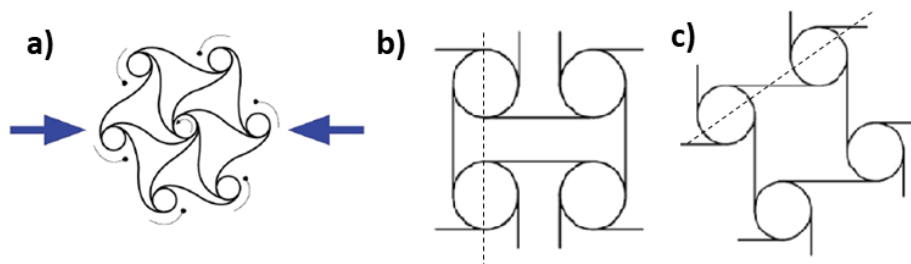
Grima et al. zkoumal potenciál auxetického chování u struktur vytvořených periodickým opakováním *arrowhead* geometrie. Vznikla tak rotačně symetrická struktura se stupněm symetrie $n = 3, 4, 6$ označované jako n -STAR (viz obr. 2-13). Stupeň symetrie také značí počet buněk napojených k jedné buňce. Vlastnosti n -STAR struktur závisí na geometrii buňky a (ohybové) tuhosti spoje v místě napojení ramen. Hvězdicové struktury jsou také *bending-dominated* ($M < 0$) [27].



Obr. 2-13 Hvězdicové auxetické struktury: a) 3-STAR; b) 4-STAR; c) 6-STAR [27]

Chirální struktury (2D)

Základní buňka chirálních struktur je tvořena válcovými segmenty a k nim tečně připevněnými rameny. Mechanismus deformace spočívá v navíjení ramen na válcové uzly (obr. 2-14a). Elementární buňky lze sestavit buďto *anti-chirální* (spojnice středů válců je rovnoběžná s rameny; obr. 2-14b), *chirální* (spojnice středů válců je různoběžná s rameny; obr. 2-14c) nebo *meta-chirální* (kombinace obou zmíněných v rámci jedné struktury). Počet ramen vázaných na válcový segment udává označení daného typu chirální struktury [1, 28].

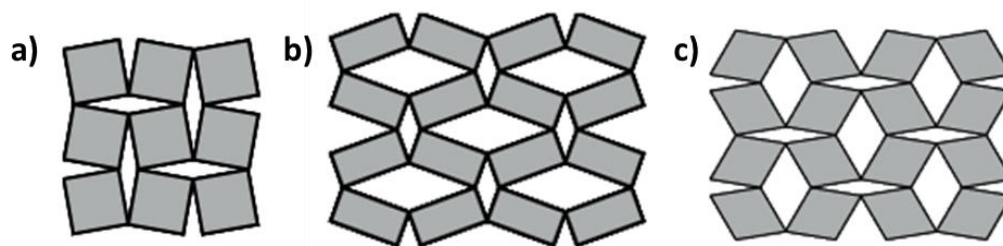


Obr. 2-14 a) Mechanismus deformace; b) anti-tetrachirální (s vyznačením spojnice středů válců); c) tetrachirální (s vyznačením spojnice středů válců) [1, 29]

V závislosti na geometrických parametrech struktury (délka ramene, osová vzdálenost uzlů, poloměr válcových uzlů) lze dosáhnout kladného [28] i záporného [11] Poissonova čísla. Obdobně je možné pozorovat izotropní [11] i anizotropní [29] chování. Na rozdíl od *re-entrant* typu je hodnota μ méně závislá na velikosti deformace [9].

Rotační struktury (2D)

Model rotačních struktur je tvořen dokonale tuhými mnohoúhelníky (trojúhelníky, čtverci, obdélníky, kosočtverci a kosodélníky) vzájemně spojenými rotačními vazbami v místech jejich vrcholů (obr. 2-15) [1].

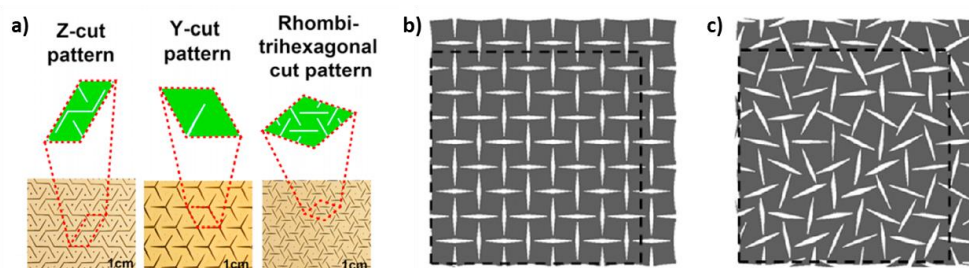


Obr. 2-15 a) Rotační čtverce; b) rotační obdélníky; c) rotační kosočtverce [30]

Rotující rovnostranné trojúhelníky a čtverce jsou izotropní a mají Poissonovo číslo blízké hodnotě -1 . Rotující obdélníky se chovají zcela odlišně, s kladnou i zápornou hodnotou Poissonova čísla, izotropně i anizotropně, v závislosti na poměru délek jejich stran a způsobu vzájemného propojení. Rotující kosočtverce a kosodélníky jsou na tom obdobně jako obdélníky, jen s tím rozdílem, že výsledné chování je mnohem více závislé na geometrických parametrech a směru zatěžování [30, 31].

Ostatní 2D struktury

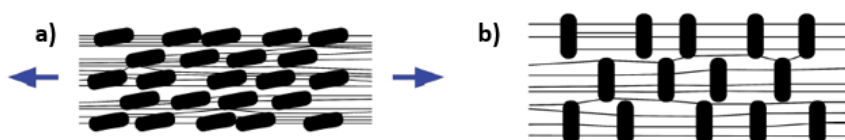
Perforované pláty (obr. 2-16) lze zhotovit vyříznutím obrazce do plného materiálu. Těmito obrazci mohou být například rovnoběžníky, kruhy, elipsy, otvory ve tvaru „I“ či „Y“, nebo prosté zářezy. Některé z nich svým chováním napodobují model rotujících mnohoúhelníků. Uspořádání perforace může být zcela náhodné, či cíleně orientované. Orientace vzorů vůči sobě a směru zatěžování silně ovlivňuje nejen auxeticitu, ale i izotropii/anizotropii [10, 13].



Obr. 2-16 Perforované pláty s prostými zářezy; a) „Y-cut“ napodobuje rotační trojúhelníky; b) vzájemně kolmé zářezy (napodobení rotačních čtverců); c) náhodně orientované zářezy [10, 13]

Zvrásněné archy (fólie) se chovají podobně jako zmačkaný list papíru, který je jednoose zatěžován. Při natahování dochází k rozkládání namačkaných vrstev do stran, což je projevem auxetického chování [3].

Model uzlinových vláken (*nodule fibril model*; obr. 2-17) posloužil k objasnění auxetického chování expandovaného mikroporézního polytetrafluorethylenu (ePTFE), který díky silné anizotropii dosahoval Poissonova poměru -12 [32].



Obr. 2-17 a) Zatěžování struktury tahem, uzliny v podélném směru; b) rozšíření v důsledku rotace uzlin do kolmého směru [1]

2.4.2 Prostorové auxetické struktury

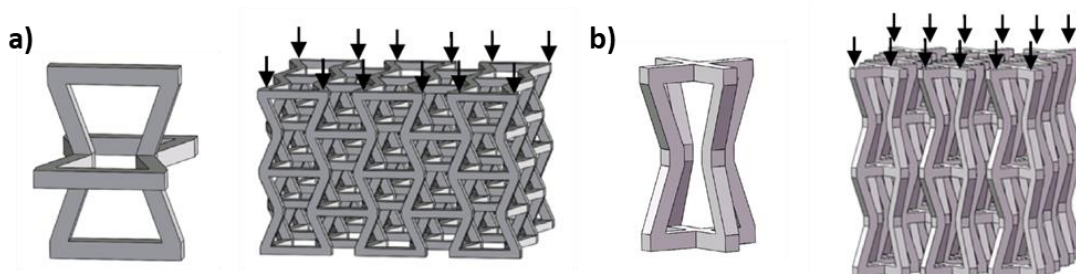
Auxetické struktury v prostoru fungují na stejných principech jako jejich rovinné varianty. Elementární buňku 3D struktury často tvoří rovinná geometrie popsaná v kapitole 2.4.1, proto lze i vlastnosti prostorových struktur řídit obdobnými způsoby jako u 2D struktur [3].

Struktury typu *re-entrant* (3D)

U prostorových *re-entrant* struktur má efektivní Youngův modul a hodnota Poissonova čísla shodný trend, kdy se zvětšujícím se úhlem prolomení je dosaženo vyššího E_{ef} i více záporného μ [33]. Toto je oproti 2D *re-entrant* strukturám nejvýznamnější rozdíl.

Mikro-prutové struktury

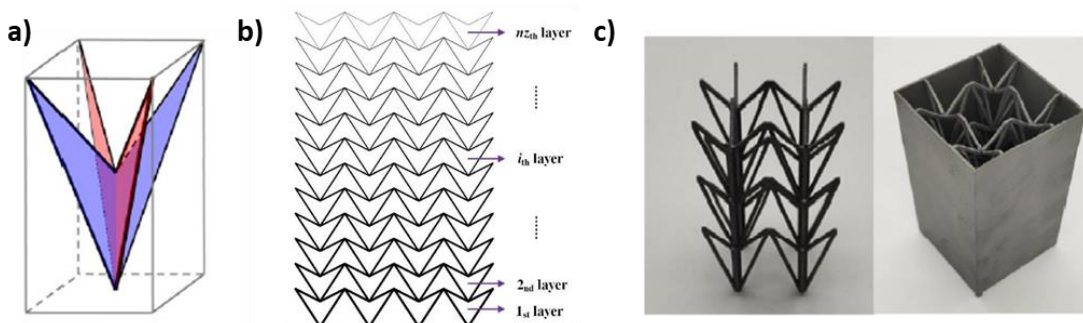
Shen *et al.* se věnoval srovnání dvou prostorových uspořádání *bow-tie* struktury. Úprava původního typu (obr. 2-18a) spočívala ve využití obou částí elementární buňky ve směru zatěžování (obr. 2-18b). Pro určitou konfiguraci geometrických parametrů dosáhl větší měrné absorbované energie i vyššího E_{ef} oproti původnímu uspořádání. Oba zmíněné typy jsou *bending-dominated* ($M < 0$) [34].



Obr. 2-18 a) Původní 3D re-entrant prutová buňka a struktura; b) nová 3D buňka a struktura [34]

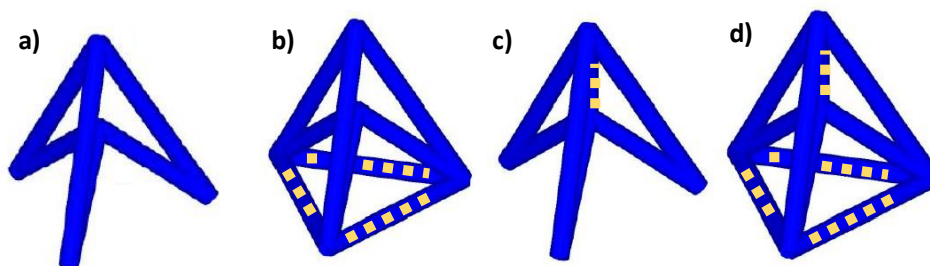
Lim se zabýval prostorovými šípovitými strukturami, které označil jako *intersecting double arrowhead* (obr. 2-19a). Zkoumal kinematické hledisko, kdy představil odvození rovnice (14). Je silně anizotropní a umožňuje variace Poissonova čísla v jednotlivých rovinách symetrie v závislosti na geometrických parametrech jednotlivých „šipek“ [26].

Gao *et al.* navázal na Lima, navíc zkoumal výhody gradientního uspořádání průměru prutů. Každá následující vrstva struktury měla průměr větší, resp. menší oproti předešlé při vzestupném, resp. sestupném gradientním uspořádání (obr. 2-19b). Celá struktura navíc vyplňovala tubus čtvercového průřezu (obr. 2-19c), což dále vylepšilo pohlcení energie nárazu. Díky gradientnímu uspořádání došlo k poklesu maximální nárazové síly při zachování, nebo i navýšení absorbované energie oproti struktuře bez gradientního uspořádání. Na tom, zdali bylo uspořádání vzestupné nebo sestupné nebyly výsledky závislé. Elementární buňku lze označit za *bending-dominated* ($M < 0$) [35].



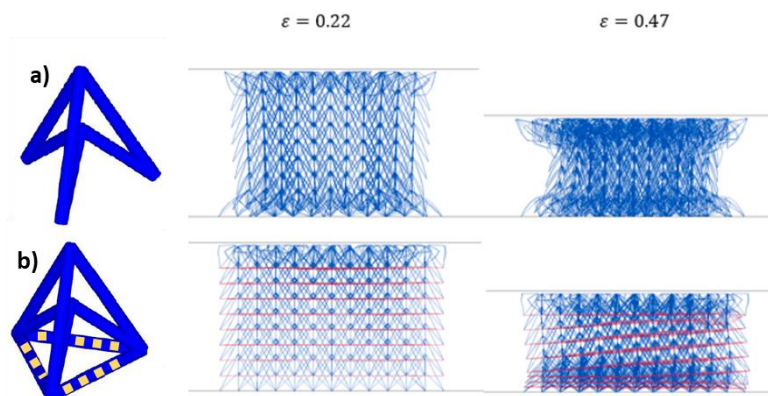
Obr. 2-19 a) Schéma *double arrowhead* buňky; b) gradientní uspořádání průměru prutů; c) čtvercový tubus vyplněný gradientní auxetickou strukturou [26, 35]

Chen et al. studoval několik konfigurací mikro-prutového čtyřstěnu (obr. 2-20) založeného na *re-entrant arrowhead*. Vyztužení struktury propojením uzlů v různém uspořádání způsobilo výrazný nárůst E_{ef} (až čtyřnásobně oproti nevyztuženému typu) i měrné absorbované energie. Dvě z těchto konfigurací jsou *bending-dominated* ($M < 0$; obr. 2-20a, c) a dvě zbylé pak *stretch-dominated* ($M \geq 0$; obr. 2-20b, d) [17].



Obr. 2-20 a) Mikro-prutový auxetický čtyřstěň; b) – d) vyztužené podoby auxetického čtyřstěnu (přidané vyztuhy vyznačeny přerušovanou čarou) [17]

Při kvazistatické kompresi struktur v prostředí MKP byly pozorovány dva odlišné průběhy deformace v závislosti na typu základního mikro-prutového čtyřstěnu. U *bending-dominated* mikro-prutového čtyřstěnu bylo při deformaci pozorovatelné příčné zúžení (obr. 2-21a). Oproti tomu u *stretch-dominated* mikro-prutového čtyřstěnu deformace probíhala vrstva po vrstvě bez viditelného auxetického efektu (obr. 2-21b) [17].



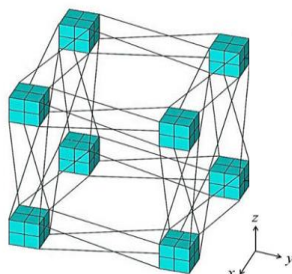
Obr. 2-21 Průběh deformace mikro-prutového čtyřstěnu: a) deformace struktury s příčným zúžením; b) deformace struktury vrstva po vrstvě [17]

Re-entrant pěny

Polymerové auxetické pěny byly prvním uměle vyrobeným auxetickým materiálem. Oproti běžným pěnám nabízejí mimo vlastností typických pro auxetické materiály (viz kapitola 2.3) zvýšenou lomovou houževnatost a lepší tlumení vibrací. Na druhou stranu mají snížený efektivní Youngův modul pružnosti [3].

Chirální struktury (3D)

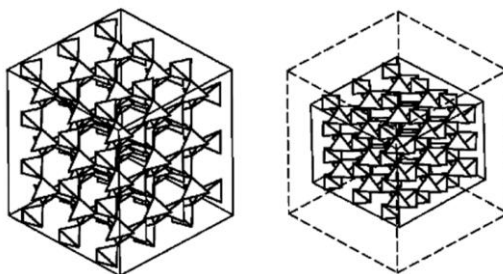
Analýzu prostorové chirální struktury provedl *Ha et al.* Struktura sestávala z krychlových uzlů vzájemně propojených rameny, přičemž tyto uzly byly zároveň vrcholy krychle (obr. 2-22). Velikost Poissonova poměru byla funkcí geometrických parametrů elementární buňky a pro některé jejich kombinace bylo možné dosáhnout i záporných hodnot (auxeticity). Chování struktury také záviselo na počtu buněk v jednotlivých směrech [36].



Obr. 2-22 Elementární buňka prostorové chirální struktury [36]

Rotační struktury (3D)

Auxetické chování α -cristobalitu bylo popsáno pomocí modelu rotujících čtyřstěnnů (obr. 2-23). Auxetické chování bylo výsledkem tří možných mechanismů deformace: rotace, dilatace, nebo kombinací obojího. Hodnoty Poissonova poměru byly pro všechny mechanismy rovny -1 (u výpočtových modelů) [37].



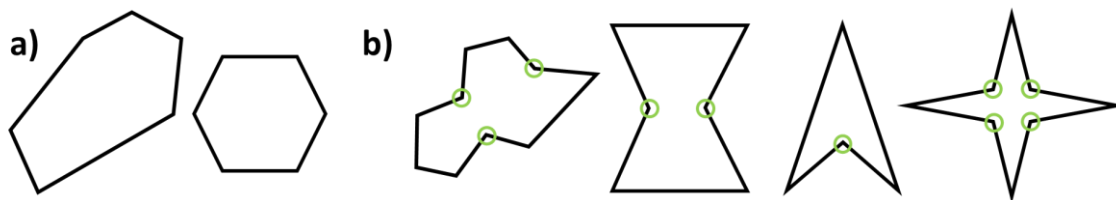
Obr. 2-23 Struktura tvořená rotujícími čtyřstěny [37]

2.5 Návrh auxetických struktur

V současnosti stále neexistuje jednoduchý nástroj či postup, jehož vstupem by byly požadované parametry (E , G , μ , mechanismus deformace aj.) a výstupem kompletní geometrie struktury. Přesto vznikají stále nové typy struktur za účelem dosažení požadovaných vlastností. Klíčem k jejich tvorbě je studie již dosavadních modelů a analytická i simulační analýza (nejčastěji metodou konečných prvků), která vede k cílené modifikaci existujících struktur. Modifikace auxetických struktur vznikají také na základě předchozí predikce vytvořené numerickou simulací [35].

Geometrické předpoklady auxetických struktur

Podmínka pro auxetické chování prutových struktur vychází z velikosti vnitřních úhlů tvořícího mnohoúhelníku. Příslušná struktura může být označena jako auxetická, pokud je alespoň jeden její vnitřní úhel nekonvexní ($>180^\circ$, obr. 2-24b). S rostoucím nekonvexním úhlem se zvětšuje i prolomení ramen a tím míra auxetického efektu [24].



Obr. 2-24 Příklady rovinných mnohoúhelníků: a) bez auxetického potenciálu; b) s předpokladem auxetického chování; vyznačeny nekonvexní úhly (zeleně)

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

K využití potenciálu auxetických mikro-prutových struktur je zapotřebí takové geometrie, která v sobě kombinuje snadnou vyrobiteľnosť, dobré pevnostní a absorpční charakteristiky včetně plného řízení těchto vlastností změnou jejich geometrických parametrů.

Dosavadní studie zabývající se auxetickými mikro-prutovými strukturami spočívají v návrhu nového typu buňky a tomu odpovídající struktury. Návrhy často vychází z již známých 2D struktur, načež jsou různě prostorově uspořádány [34, 35], případně doplněny výztužnými pruty [17]. Každá takto vytvořená konstrukce vyniká jedinečnými parametry z hlediska tuhosti, schopnosti absorbovat energii, relativní hustoty, Poissonova poměru aj.

Každý nový druh auxetické struktury rozšiřuje možnosti jejich aplikace a zároveň vede k rozšíření znalostí týkajících se auxetických struktur. Tyto získané informace lze v budoucnu použít k návrhu struktury kombinující přední vlastnosti svých předchůdců.

Nedostatek u zmíněných studií lze vidět v tom, že v případě 3D mikro-prutových struktur probíhá ověření jejich vlastností často pouze v modelovacím prostředí MKP. K samotné výrobě mnohdy nedojde z důvodu jejich obtížnější vyrobiteľnosti. Z toho důvodu je záměrem této práce navrhnout takový typ auxetické struktury, která bude snadno vyrobiteľná.

3.2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je na základě informací z provedené rešeršní studie a vlastních poznatků navrhnout prostorovou mikro-prutovou strukturu vykazující auxetické chování. Tato struktura musí být vyrobiteľná metodou Selective Laser Melting (SLM).

Jednotlivé cíle je možné v bodech zapsat takto:

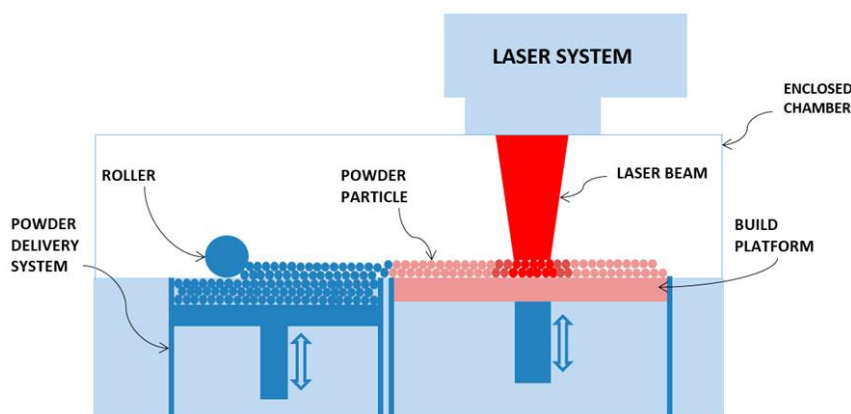
- i) Rešeršní studie existujících typů 2D i 3D auxetických struktur
- ii) Stanovení základních předpokladů pro vnitřní architekturu struktury se záporným Poissonovým číslem
- iii) Návrh mikro-prutové struktury s auxetickým chováním
- iv) Výroba navržené struktury metodou SLM z oceli 316L

4 MATERIÁL A METODY

Za účelem dosažení stanovených cílů bylo využito níže uvedené metody výroby vzorků, návrhu struktury a její analýzy. Dále je uveden způsob experimentálního ověření včetně metod vyhodnocení získaných dat.

4.1 Technologie výroby

Selective Laser Melting (SLM) je jednou z metod aditivních technologií, která spočívá v natavování materiálu v podobě jemného prášku účinkem výkonného laseru. Princip je zachycen na obr. 4-1.



Obr. 4-1 Schéma procesu výroby metodou SLM [38]

Materiál

Jednotlivé struktury byly vyrobeny z práškové austenitické nerezové oceli 316L (EN 1.4404) od společnosti TLS Technik GmbH. Tento materiál je dobře zpracovatelný, tudíž je vhodný na výrobu složitých geometrií, např. mikro-prutových struktur. Navíc se jedná o houževnatý materiál, což je žádoucí z hlediska absorpce energie vyrobené struktury při nárazu. Chemické složení kovového prášku je uvedeno v tab. 4-1. Velikost jednotlivých zrn se pohybovala do 50 μm . Hustota plného materiálu byla brána jako 7 950 kg m^{-3} .

Tab. 4-1 Chemické složení TLS práškové oceli 316L [39]

prvek	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
hm. %	66,37	0,03	0,8	1,8	17,5	2,2	11,3

Procesní parametry

Samotná výroba vzorků proběhla na zařízení SLM 280^{HL} firmy SLM Solutions. Parametry prostředí tisku byly následující: předehřev platformy na 100 °C, dusíková (N₂) inertní atmosféra, tloušťka vrstvy 50 μm. Výkon laseru a skenovací rychlost se odvíjely od fáze tisku jednotlivé vrstvy: *scanning contours* (100 W; 300 mm s⁻¹), *hatching* (275 W; 700 mm s⁻¹), *filling contours* (150 W; 400 mm s⁻¹).

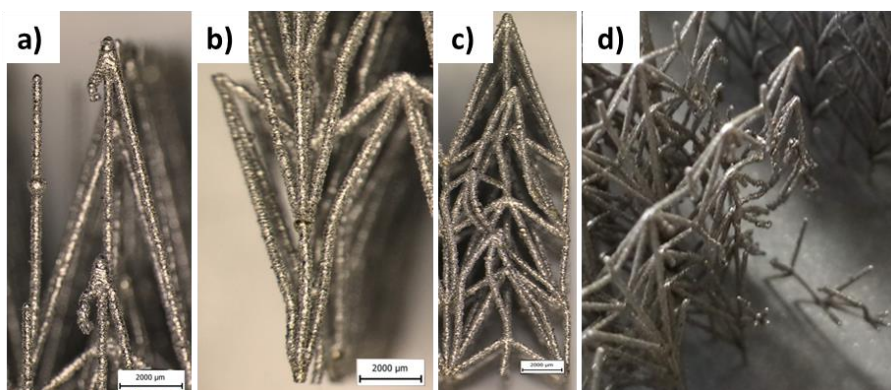
Post-processing

Po dokončení tisku následovala vizuální kontrola kvality vytištěných struktur a odstranění z platformy. Podpory sloužící k snadnému odstranění vzorků byly odstřiženy a povrch zabroušen. Pomocí posuvného měřidla byly vzorky následně změřeny a zváženy na přesných vahách.

Kvalitu tisku byla rozdělena do tří kategorií podle dosažené (vizuálně hodnocené) jakosti. Takto bylo možné posoudit výsledky experimentu s přihlédnutím na kvalitu dané struktury. Pádovému testu byly podrobeny vždy tři nejlepší vzorky daného typu. Jednotlivé jakostní kategorie byly definovány takto:

- **Výborná kvalita (✓✓)**
Celá struktura byla vytištěna bez porušení prutů nebo jejich deformace.
- **Dobrá kvalita (✓)**
Struktura obsahuje prasklé či jinak deformované pruty (obr. 4-2a, b).
- **Špatná kvalita (X)**
Část struktury je poškozena nebo zcela chybí (obr. 4-2c, d).

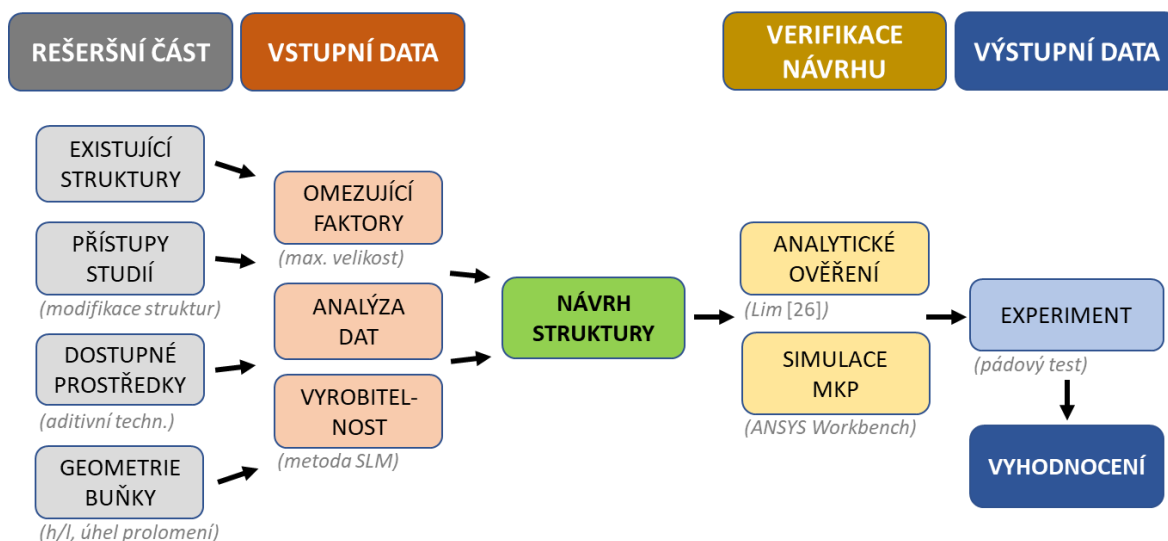
Jako doplňující hodnocení byly zvoleny symboly + a –, kterými byly označeny ty vzorky, jejichž kvalita byla lepší, resp. horší než jiných vzorků v dané kategorii.



Obr. 4-2 Druhy vad ovlivňující hodnocení kvality vzorku: a) prasklý prut; b) deformace prutů; c) deformace části struktury; d) chybějící část struktury

4.2 Návrh 3D mikro-prutové struktury

Na obrázku 4-3 je schematicky popsán postup tvorby nové mikro-prutové buňky. Všechny informace uvedené v následující části se týkají výhradně mikro-prutových struktur, které zastupují typ *re-entrant*.



Obr. 4-3 Schéma postupu práce při návrhu nové mikro-prutové struktury

Návrh nové struktury byl iterační proces, navíc omezen několika vstupními kritérii, která nepřímou určovala podobu auxetické buňky. Níže jsou uvedeny nejdůležitější z nich:

- Periodické uspořádání buněk ve struktuře bez použití propojovacích elementů.
- Výroba metodou SLM s sebou přinesla omezení v podobě orientace prutů vzhledem ke směru stavby. Aby byla stavba bezpečně dokončena bez narušení výrobního procesu, který by negativně ovlivnil kvalitu vyrobených staveb, bylo nutné dodržet minimální úhel sklonu prutů od podložky. Ten byl na základě provedeného výzkumu [40] zvolen 40°, byť se jedná o konzervativní volbu.
- Aby bylo dosaženo co nejefektivnější absorpce energie, bylo cílem strukturu navrhnout jako *stretch-dominated* (vnitřně nepohyblivá soustava).

Analýza struktury metodou konečných prvků

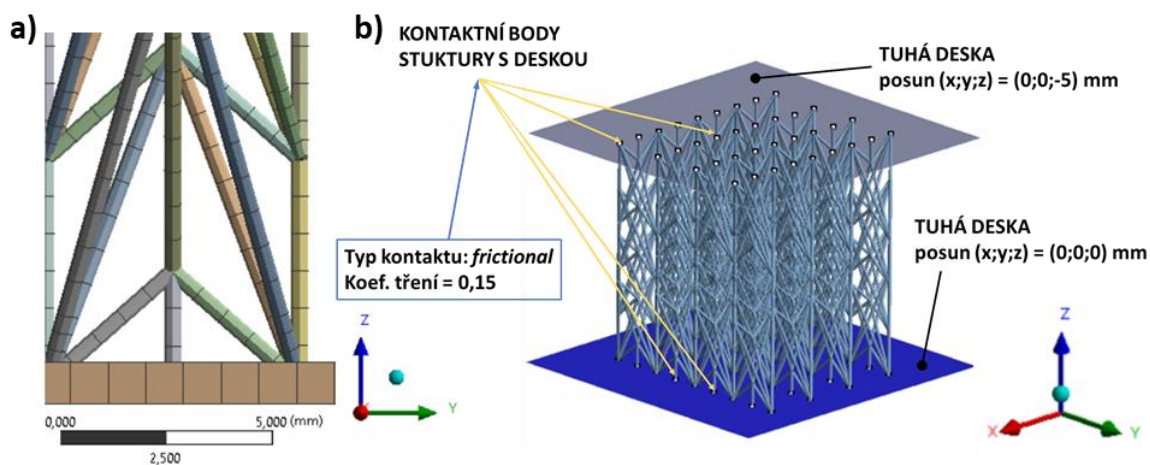
Pro přesnější odhad výsledného chování navržené struktury byla provedena simulace metodou konečných prvků v prostředí programu ANSYS Workbench 2021 R2. Účelem bylo ušetřit čas věnovaný výrobě a testování vzorků, které by nakonec auxetické chování nemusely projevit.

Test byl proveden pro jednu rozměrovou konfiguraci v režimu *Static Structural*. Z knihovny materiálů byla vybrána přímo nerezová ocel 316 pro aditivní technologie ($E = 195 \text{ GPa}$; $\mu = 0,25$; *Bilinear Isotropic Hardening*).

Model struktury o $4 \times 4 \times 4$ buňkách byl vytvořen prostřednictvím střednic prutů jako *BEAM element model* s *BEAM 188* (založené na Timošenkově prutové teorii), kterému byl následně přidělen jednotný příčný průřez.

Jednotlivé pruty byly programem automaticky rozděleny na elementy (obr. 4-4a). Takto bylo dosaženo mnohem menšího počtu prvků (12 154) oproti tvorbě elementů z objemového tělesa ($>500\,000$ při dostatečné kvalitě prvků).

Zatěžování probíhalo kvazistaticky posunutím horní tuhé desky o 5 mm v záporném směru osy z, přičemž model stál na nehybné tuhé podložce. Kontakt mezi strukturou a deskami byl proveden jako *frictional* s koeficientem tření 0,15 (obr. 4-4b).



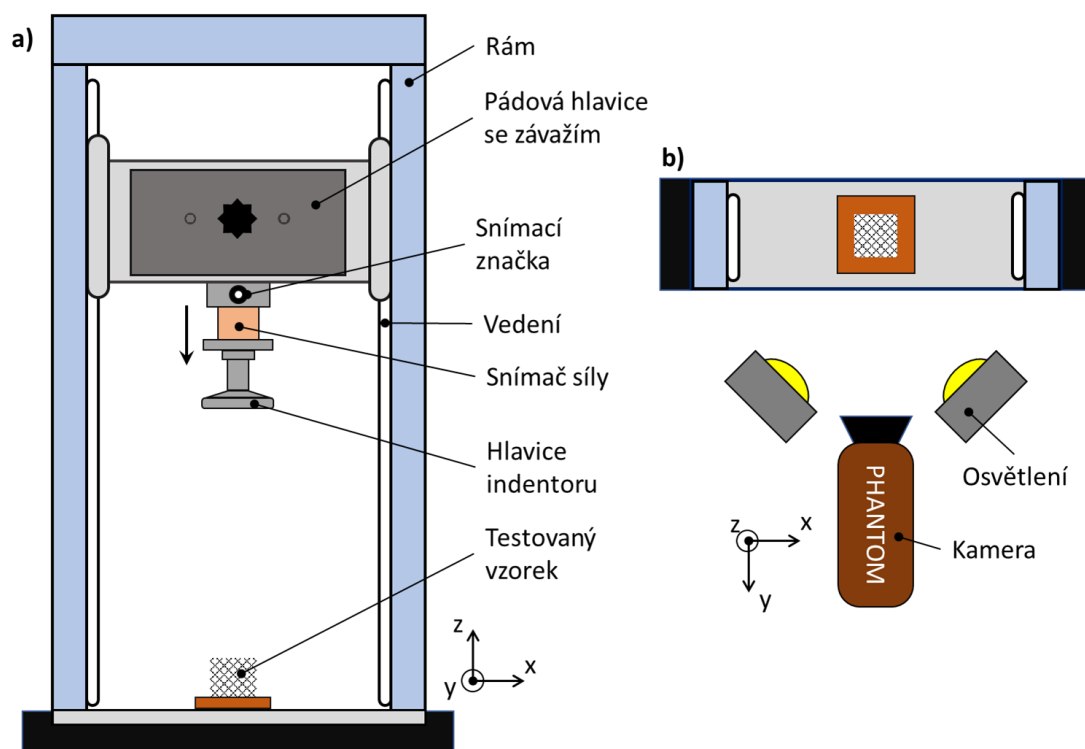
Obr. 4-4 a) Výřez modelu RRIDA struktury se zobrazenými elementy; b) zobrazení okrajových podmínek

4.3 Experimentální zkouška vyrobených struktur

Experimentální ověření auxetického chování struktur a jejich dalších charakteristik bylo provedeno pomocí pádového testu.

4.3.1 Pádový test

Zařízení na provedení pádové zkoušky se skládalo z pádové hlavice s měřícím zařízením v podobě tenzometru (XY31-3/120). Pro možnost následného vyhodnocování v prostředí programu Matlab byl pořizován záznam testu vysokorychlostní kamerou (Phantom V710). Schéma celé sestavy je zobrazeno na obr. 4-5. Pádová hlavice měla celkovou hmotnost 11,45 kg a byla pouštěna z výšky 1 metru. Při nárazu dosahovala hlavice indentoru rychlosti v rozmezí 2,5– 3,0 m s⁻¹. Vzorkovací frekvence karty tenzometru byla 96 kHz; kamera snímala s rozlišením 1280×120 pixelů při frekvenci 48 022 Hz.



Obr. 4-5 Schéma pádového testu; a) čelní pohled; b) pohled shora (řez rámem)

Prvotním výstupem pádového testu byla závislost reakční síly na čase a obrazovým záznam. Pomocí programu Matlab R2019a byl tento výstup vyhodnocen a druhotně získána závislost síly na poloze. S touto závislostí bylo již možné dále pracovat.

4.3.2 Způsob vyhodnocení naměřených dat

V této části jsou uvedeny způsoby, jakými byla vyhodnocena data získaná z provedeného experimentu.

Skutečná relativní hustota (ρ_{str})

Skutečná relat. hustota byla určena po změření a zvážení vyrobených vzorků na základě vztahu (5). Následně byla srovnána s hodnotou ρ_{str} určenou dle vztahu (20) (viz kap. 5.1.2). Úpravou vztahu (5) vznikne:

$$\rho_{\text{skut}} = \frac{m^*}{\rho_s V_s} \quad (-) \quad (15)$$

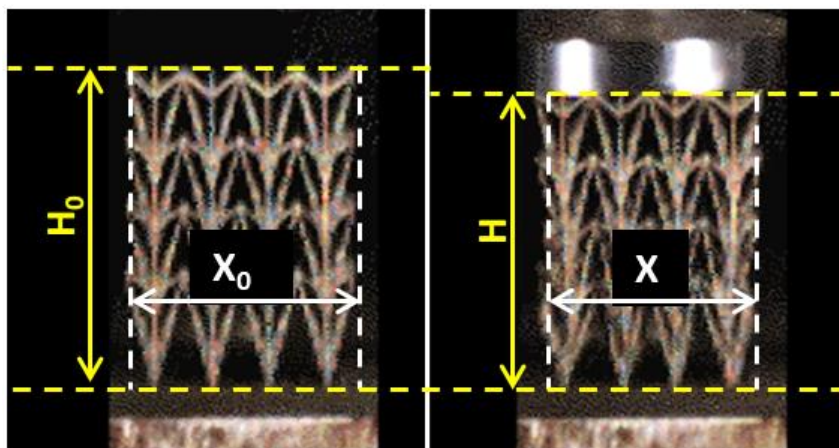
kde m^* je hmotnost vzorku, V_s je objem vymezený vzorkem a ρ_s je hustota materiálu.

Poissonův poměr (μ_{zx})

Stanovení Poissonova poměru probíhalo z kamerového záznamu pádového testu, kdy byly porovnány snímky před deformací a z průběhu deformace (obr. 4-6). Jako druhý zmíněný snímek byl zvolen ten s největší mírou příčného zúžení, avšak ještě bez výrazného borcení struktury jako celku. Z výsledků tří vzorků dané rozměrové konfigurace (viz kap. 5.1.3) byl poté vypočten aritmetický průměr Poissonova čísla.

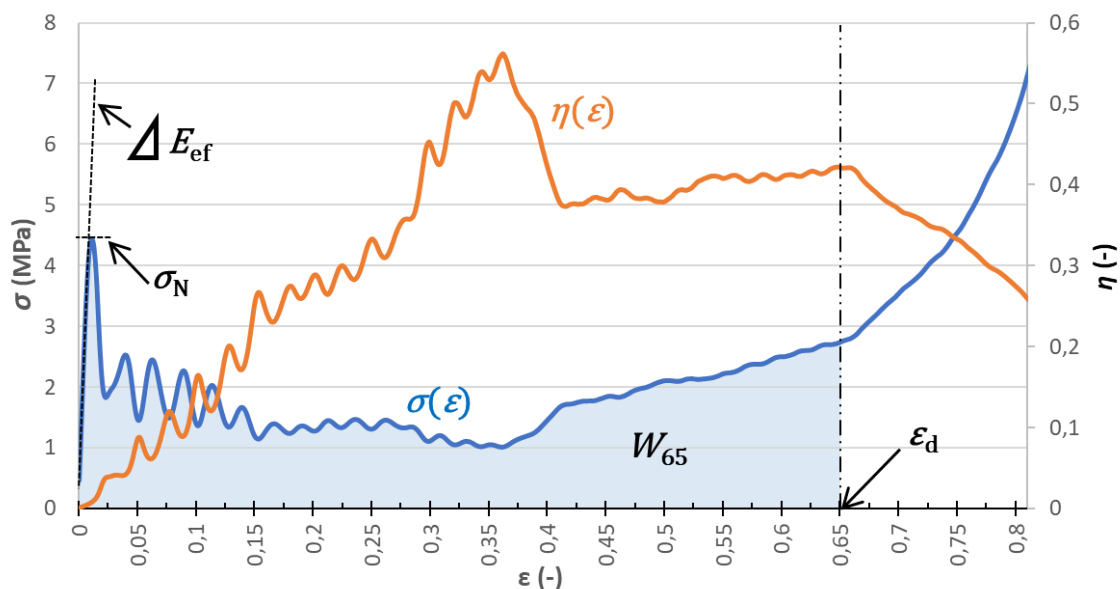
Úpravou vztahů (1) a (2) s využitím značení na obr. 4-6 vznikne:

$$\mu_{zx} = - \left(\frac{X - X_0}{X_0} \cdot \frac{H_0}{H - H_0} \right) \quad (-) \quad (16)$$



Obr. 4-6 Způsob určení Poissonova poměru pomocí snímků z kamerového záznamu

Díky získané závislosti síly na poloze mohly být stanoveny hodnoty veličin týkajících se mechanických vlastností. Prvním krokem byl přepočet na závislost napětí na poměrné deformaci, podle obecného vztahu $\sigma = F/A$, kde F je zatěžující síla a A je plocha průřezu struktury ve směru zatěžování; poměrnou deformaci dle rovnice (2). Na obr. 4-7 je vzorový vyhodnocený záznam tenzometru, který poskytne názornější výklad dále uvedených veličin.



Obr. 4-7 Vzorový vyhodnocený záznam tenzometru se zaznačením veličin

Efektivní Youngův modul (E_{ef})

Hodnota E_{ef} byla stanovena jako směrnice přímky vzniklé lineární regresi prvních sedmi naměřených hodnot napětí.

Nárazové maximum (σ_N)

Jedná se o nejvyšší zaznamenanou hodnotu napětí před *densification strain* ε_d .

Efektivita absorpce energie (η)

Efektivita byla určena pomocí rovnice (11). Na základě vynesené závislosti $\eta(\varepsilon)$ byla hodnota *densification strain* ε_d stanovena na 65 %, společná pro všechny struktury. Tato hodnota byla určena po provedení experimentu na základě bodu iv) kap. 2.3.1 s doplněním, že se jedná o lokální maximum před ryze klesajícím průběhem účinnosti (viz obr. 4-7).

Měrná absorpce energie (W_{65})

Zde bylo využito vztahu (9), ve kterém je $\varepsilon_0 = \varepsilon_d = 65 \%$. Společná hodnota ε_d je z důvodu možnosti vzájemného srovnání jednotlivých typů struktur. W_{65} byla použita pro výpočet SEA_{65} .

Specific energy absorption (SEA_{65})

Tato charakteristika byla získána na základě rovnice (10), přičemž $\rho_{rel} = \rho_{skut}$ a $W = W_{65}$. Dle SEA_{65} bylo provedeno srovnání struktur z hlediska absorbované energie.

5 VÝSLEDKY

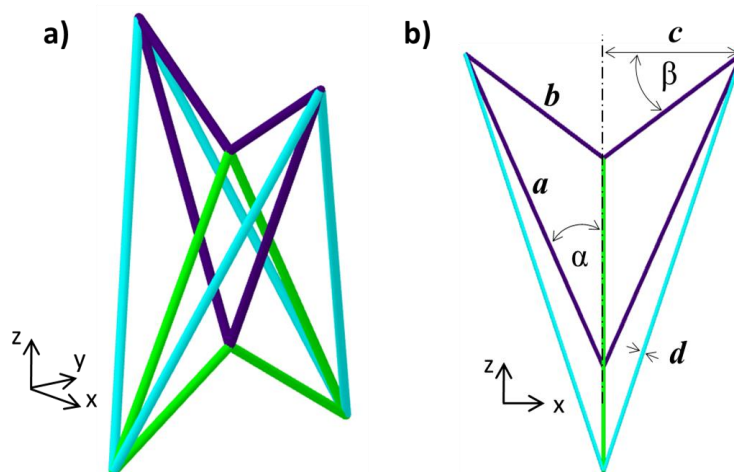
V této kapitole jsou popsány výstupy z jednotlivých fází – návrh struktury, důkaz auxetického chování na základě simulace, zhodnocení vyrobených vzorků a jejich destrukce na pádovém testu. Součástí je i stručná analýza získaných dat, která je základem pro následnou diskuzi.

5.1 Analytické modely

5.1.1 Nový typ auxetické struktury

V počátečních fázích návrhu bylo nejdůležitější vybrat vhodný rovinný obrazec, který by tvořil základ elementární auxetické buňky. Dle geometrického kritéria popsaného v kapitole 2.5 mohl být zvolen téměř jakýkoliv odpovídající útvar, avšak z důvodu požadovaného periodického napojení elementární buňky byly vyhovující jen symetrické obrazce. Jako vhodná se jevila *arrowhead* geometrie, která splňovala podmínky na výrobitelnost.

Modifikací *double arrowhead* buňky na obr. 2-19a ve smyslu otočení jedné ze „šipek“ o 180° při zachování původních společných bodů vznikne základ elementární buňky. Propojením zbývajících vrcholů dalšími pruty vznikne zcela nová elementární buňka auxetické struktury (obr. 5-1a). Vzhledem ke způsobu vytvoření a v návaznosti na výchozí uspořádání je dále nová struktura označována jako *Reinforced Reversed Intersecting Double Arrowhead*, zkráceně RRIDA.



Obr. 5-1 a) Geometrie nového typu prostorové auxetické buňky;
b) základ buňky tvořený šípovitou rovinnou strukturou

Základní buňka je jednoznačně určena (viz obr. 5-1b) délkovými parametry a (nejdelší rameno jádra), b (*re-entrant* rameno), c (polovina šířky buňky) a průměrem prutů d .

Pro další účely je uvedena závislost velikosti úhlů α a β na délkových parametrech.

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{c}{a}\right) \quad (^\circ) \quad (17)$$

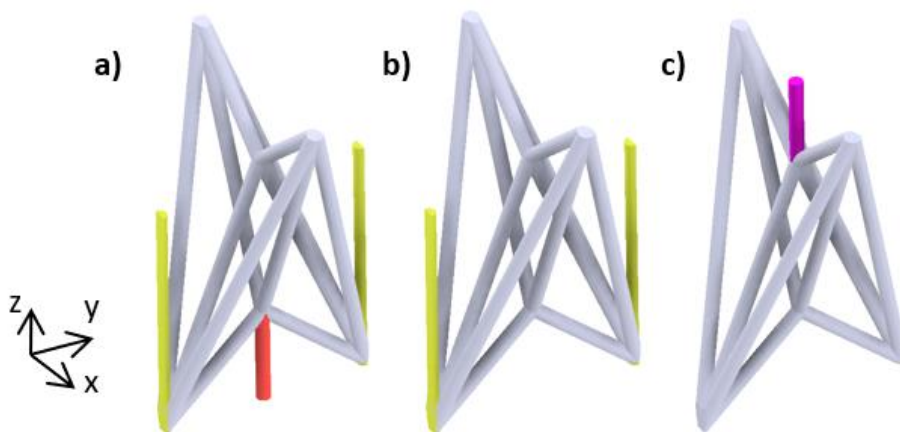
$$\beta = \arccos\left(\frac{c}{b}\right) \quad (^\circ) \quad (18)$$

Dle Maxwellova kritéria stability je RRIDA buňka díky okrajovým prutům (světle modré na obr. 5-1a) *stretch-dominated*. Vyjádřeno pomocí vztahu (8):

$$M = p - 3j + 6 = 12 - 3 \cdot 6 + 6 = 0.$$

Tímto je splněna podmínka týkající se vnitřní nepohyblivosti mikro-prutové struktury.

Aby bylo možné navrženou strukturu vyrobit metodou SLM, bylo nutné buňku na obr. 5-1 doplnit o nezbytné podpory a pomocné pruty. Výroba některých částí buněk v druhé a vyšší vrstvě by se uskutečňoval do prázdna, což by mohlo vést až ke zničení vzorků v procesu stavby. Přidáním prutů dle obr. 5-2 (žluté) bylo toto riziko minimalizováno. Pomocné pruty (červené a fialové) pomohou přenést zatěžující sílu do místa prolomení, což by mohlo podpořit auxetické chování. Nyní je ovšem nutné rozlišit vrstvy buněčné struktury na tři části – spodní, střední a vrchní – jelikož pro každou z nich jsou doplněné pruty rozdílné.



Obr. 5-2 Schéma RRIDA buněk doplněných o nezbytné podpory (žlutě) a pomocné pruty (červeně a fialově):
a) spodní vrstva struktury, b) střední vrstvy, c) vrchní vrstva

5.1.2 Relativní hustota

Analytický výpočet relativní hustoty RRIDA buňky i celé struktury na základě vztahu (5) byl založen na tom, že buňka je tvořena střednicemi prutů a společným průřezem. Ta poté zabírá v prostoru objem vymezený hranolem o stranách $2c \times 2c \times (a \cos \alpha + b \sin \beta)$. Relativní hustota buňky vychází menší než struktury. Může za to skutečnost, že při sestavení struktury se jednotlivé elementární hranoly vzájemně překrývají.

Elementární RRIDA buňka

Relativní hustota elementární buňky byla určena pro geometrii definovanou na obr. 5-1, tj. bez podpurných prutů. Výsledky byly následně porovnány s hodnotami uváděnými programem Inventor Professional 2020 pro namodelovanou konfiguraci. Hodnoty byly rozdílné, přičemž ty určené analyticky vycházely vždy větší. Důvodem je vzájemné překrývání jednotlivých prutů v místě vrcholů buňky, které program dokáže zohlednit. Překrytí je tím rozsáhlejší, čím je průměr prutů větší. Jelikož nešlo jednoduše tento vliv explicitně zahrnout do výpočtu, byl přidán korekční faktor určený z porovnávání dat. Relativní hustota RRIDA buňky je dána:

$$\rho_b = \frac{V_b}{V_s} = \frac{\pi d^2 (a + b + \sqrt{a^2 + b^2 + 2ac \cos \alpha}) \cdot K}{4c^2 (a \cos \alpha + b \sin \beta)} \quad (-) \quad (19)$$

kde a, b, c jsou délkové parametry definované na obr. 5-1b, d je průměr prutů, α a β jsou určeny vztahy (17) a (18) a K je korekční faktor. V_b je objem prutů a V_s je objem hranolu vymezeného buňkou.

Korekční faktor je funkcí délkových parametrů a, b, c , zejména pak průměru prutů d , jelikož u něj byla pozorována kvadratická závislost (viz příloha A). Nabývá hodnot $0 < K < 1$.

RRIDA struktura

Byť je struktura tvořena $N_x \times N_y \times N_z$ buňkami v příslušných směrech, výsledná hodnota relativní hustoty je závislá pouze na počtu N_z . Při odvozování vztahu pro celou strukturu byly brány v úvahu přidané pruty zmiňované na obr. 5-2. I tyto pruty se z části překrývají s jinými pruty, nicméně zde již bylo možné to do výpočtu zahrnout. Nutno však podotknout, že se stále jedná o určitou míru zjednodušení (odchylka $< 5 \%$ pro $4 \times 4 \times 4$ struktury ve srovnání s CAD modely).

Finální vztah je dán následovně:

$$\rho_{str} = \frac{N_z V_b + \frac{\pi d^2}{4} [(N_z - 1)(a \cos \alpha - C) - (N_z - 3)b \sin \beta - 2D]}{4c^2 [N_z (a \cos \alpha - b \sin \beta) + 2b \sin \beta]} \quad (-) \quad (20)$$

$$C = \frac{d}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (m) \quad (21)$$

$$D = \frac{d}{2 \tan\left(\frac{90^\circ - \beta}{2}\right)} \quad (m) \quad (22)$$

kde N_z je počet vrstev buněk ve směru osy z , V_b je objem prutů elementární buňky bez podpor (viz (19)), parametry a, b, c, d, α a β odpovídají předchozímu značení (viz obr. 5-1). Koeficienty C a D zohledňují překryv podpurných prutů a jejich význam roste zejména s rostoucím průměrem d .

5.1.3 Konfigurace vyráběných struktur

Rozměry elementární buňky mají vliv na chování struktury jako celku. Z toho důvodu bylo navrženo několik konfigurací RRIDA buňky s rozdílnou velikostí a /nebo průměrem prutů. S odkazem na *Gao et al.* [35] bylo zkoumáno gradientní uspořádání průměru prutů.

Experiment v podobě pádového testu ovlivnil rozměry vyráběných struktur. Aby hlavice indentoru zasáhla celou strukturu, je jejich šířka $\times$ hloubka maximálně 30×30 mm. Pro dosažení plného stlačení je průměr prutů volen do maximální hodnoty $0,5 \text{ mm}^1$.

Finální rozměrové konfigurace jsou shrnuty v tabulce 5-1. Šířka a hloubka struktur je pro všechny konfigurace 24 mm. Struktura je tvořena ze $4 \times 4 \times 4$ buněk. Velikost buňky je dána délkou ramene a . Gradientní uspořádání bylo zvoleno kvůli lepší vyrobiteľnosti sestupné ve směru stavby, tj. největší průměr prutů je ve spodní vrstvě. Od každého druhu byly vyrobeny čtyři vzorky.

Tab. 5-1 Rozměrové konfigurace vyráběných RRIDA struktur

Uspořádání	Typ	a	b	c	d
JEDNODUCHÉ	J1A	8	4	3	0,3
	J1B				0,35
	J1C				0,4
	J2A	9	4	3	0,3
	J2B				0,35
	J2C				0,4
	J3A	10	4	3	0,3
	J3B				0,35
	J3C				0,4
GRADIENTNÍ	G1	8	4	3	0,3 - 0,45*
	G2	9			
	G3	10			

* odstupňováno po 0,05 mm

Pro všechny konfigurace je minimální úhel odklonu prutů od výrobní podložky roven úhlu β (viz obr. 5-1b). Ten je dle vztahu (18) roven $41,4^\circ$. Tímto je splněna podmínka na vyrobiteľnost uvedená v kapitole 4.2.

¹Konzervativní volba kvůli očekávané tuhosti auxetické struktury a houževnatosti oceli 316L.

5.1.4 Závislost velikosti μ na délce ramen

Analytické určení hodnoty Poissonova poměru je jedním ze způsobů ověření, zdali daná geometrie bude vykazovat auxetické chování. Jelikož základem RRIDA struktury je rovinná *arrowhead* buňka, lze očekávat auxetické chování. Pohybu vrcholů rovinné *arrowhead* buňky však budou bránit krajní ramena, proto se předpokládá, že budou naměřeny nižší hodnoty Poissonova poměru oproti analytickému výpočtu. Analytický model je tak použitelný primárně pro rovinné obrazce.

Podle Lima [26] platí pro rovinnou šípovitou strukturu vztah (14). Po jeho úpravě s užitím vztahů (17) a (18) vypadá následovně:

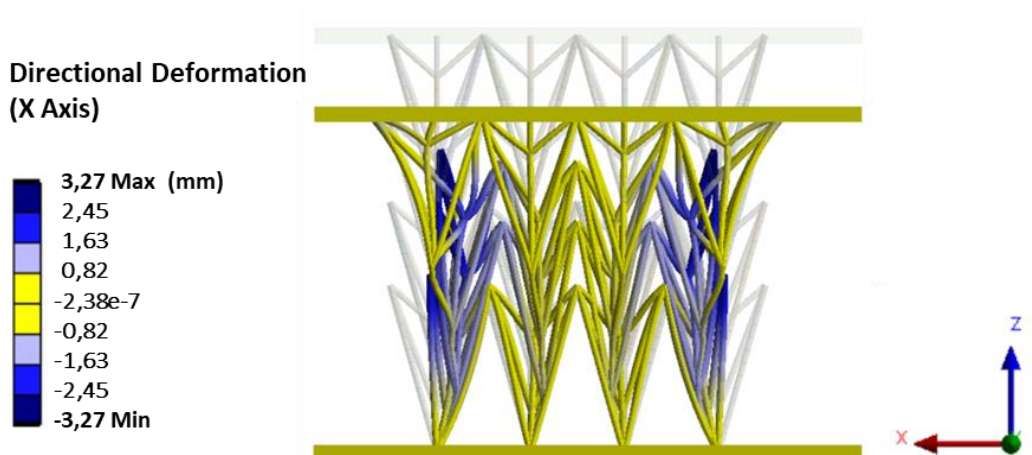
$$\mu_{zx} = \frac{1}{\mu_{xz}} = -\frac{\sqrt{(a^2 - c^2)(b^2 - c^2)}}{c^2} \quad (-) \quad (23)$$

Jelikož $a > c$ a $b > c$, je Poissonovo číslo vždy záporné.

5.2 MKP simulace

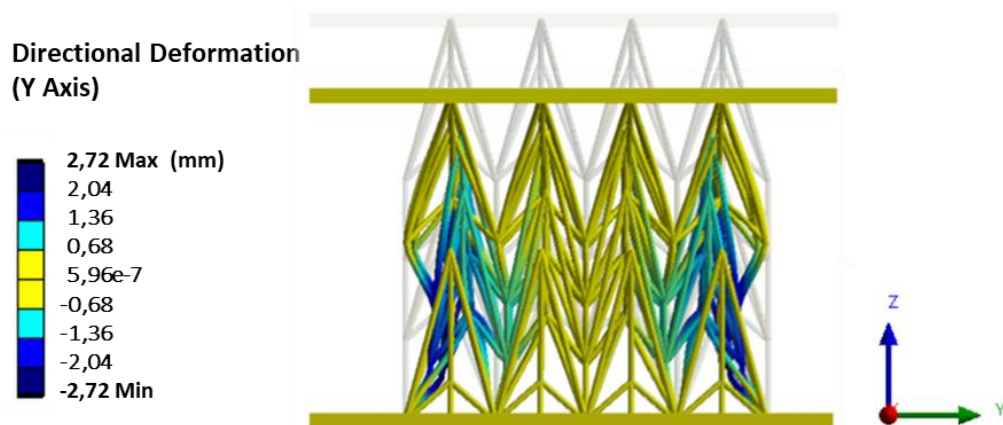
Test byl proveden pro jednu rozměrovou konfiguraci, konkrétně pro parametry $a = 9$ mm, $b = 4$ mm, $c = 3$ mm a $d = 0,4$ mm, čemuž odpovídá označení J2C.

Provedená simulace potvrdila předpoklad auxetického chování, což lze pozorovat na obrázcích 5-3 a 5-4 (dosažená hodnota² $\mu_{zx} = -1,03$). Zobrazen je jak pohled ve směru, ve kterém podpůrné pruty neměly na chování vliv, tak i ve směru, kde se jejich přítomnost projevila.



Obr. 5-3 Stlačení RRIDA struktury J2C o 5 mm, barevná mapa značí posuv v příčném směru; pohled na stranu bez podpor

² Vyhodnocení proběhlo způsobem popsáním v kap. 4.3.2.



Obr. 5-4 Stlačení RRIDA struktury J2C o 5 mm, barevná mapa značí posuv v příčném směru; pohled na stranu s podporami

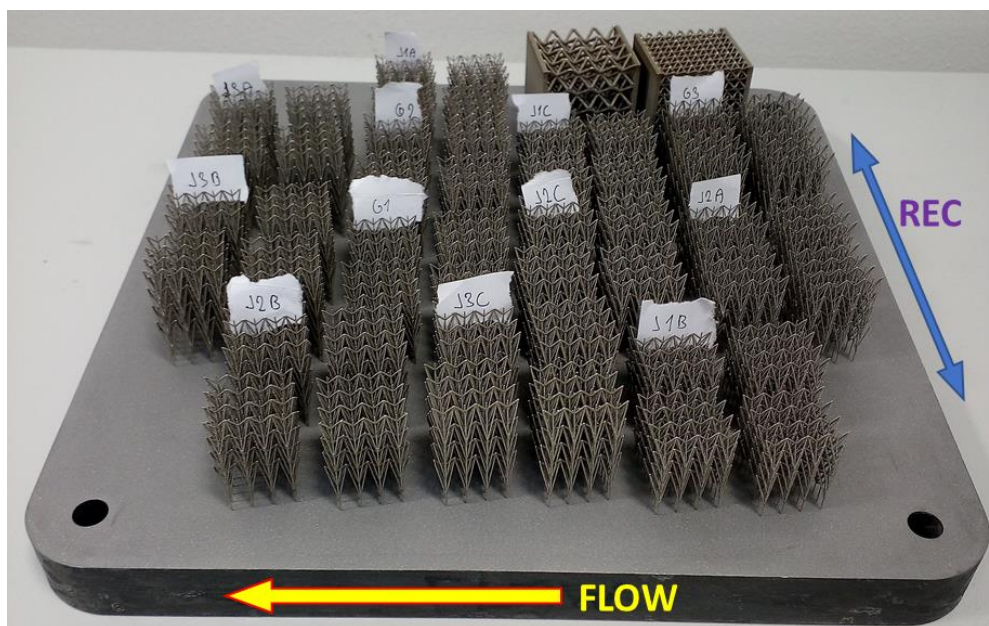
Podle očekávání (viz kap. 5.1.4) je Poissonův poměr určený pomocí analytického modelu větší. Dle vztahu (23) je $\mu_{zx} = -2,49$ (více než dvojnásobný oproti simulaci).

Pozn.: Vedlejším přínosem analýzy bylo, že struktury byly při testu orientované ke kameře stranou bez podpor (čelem k rovině xz). Tím bylo vyhodnocování snímků přehlednější.

5.3 Experiment

5.3.1 Vyrobené struktury

Po dokončení výroby byla provedena fotodokumentace vzorků, zejména výrobních vad. Na obrázku 5-5 jsou znázorněny vzorky na výrobní platformě po vyjmutí z tiskárny.



Obr. 5-5 Výrobní platforma se strukturami. Šipkami naznačen proud dusíkové atmosféry (FLOW) a pohyb recoateru (REC).

Parametry vyrobených struktur

Jednotlivé struktury byly po odstranění z platformy změřeny a zváženy (tab. 5-2). Analyticky určená hmotnost byla získána úpravou vztahu (20).

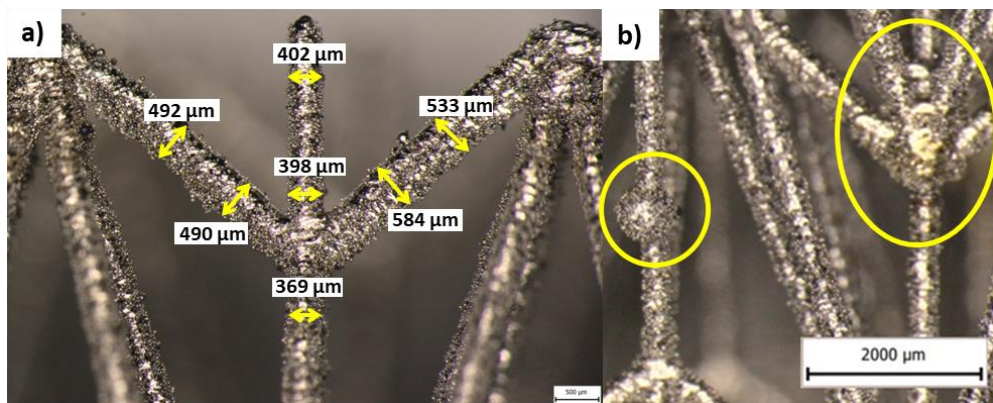
Tab. 5-2 Průměrná hmotnost struktur; srovnání skutečné a analyticky určené hodnoty

Typ	J1A	J1B	J1C	J2A	J2B	J2C	J3A	J3B	J3C	G1	G2	G3
Výška (mm)		24,4			28,6			32,8		24,4	28,6	32,8
Hmotnost analyticky (g)	3,31	4,49	5,83	3,62	4,91	6,38	3,93	5,32	6,92	5,27	5,72	6,17
Hmotnost skutečná (g)	3,37	3,97	5,22	3,47	4,56	5,74	3,95	4,92	6,07	4,88	5,20	5,66

Jednotná šířka a hloubka struktur 24 mm.

Ze snímků pod mikroskopem bylo zjištěno, že pruty místy dosahovaly většího i menšího než nominálního průměru (obr. 5-6a). Kvůli dalším výrobním nedokonalostem (obr. 5-6b) byla očekávána hmotnost vzorků větší, než je nominální.

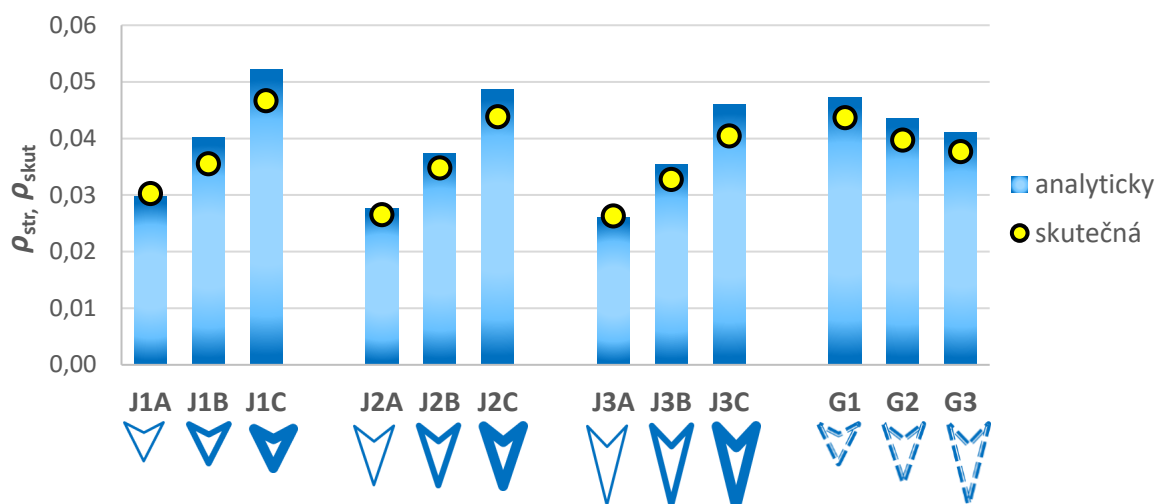
Přesto byla skutečná hmotnost v průměru o 7,1 % nižší než hmotnost určená analyticky. Důvodem může být kombinace porozity materiálu, rozdílných průměrů prutů a zejména odchylky ve výpočtu týkající se překryvu prutů (kvůli zjednodušení rovnice (20) vychází hmotnost větší). Pokud by bylo možné porozitu ve výpočtech kompenzovat pouze změnou hustoty oceli 316L, nejlepším odhadem³ by bylo $7,27 \text{ g cm}^{-3}$ místo původních $7,95 \text{ g cm}^{-3}$.



Obr. 5-6 Odchylky od modelu: a) rozdílné průměry prutů pro nominální průměr 400 μm; b) návary a shluky materiálu

Skutečná relativní hustota byla získána přepočtem z hmotnosti dle rovnice (15); analytická hodnota dle vztahu (20). Následující graf (obr. 5-7) proto reflektuje porovnání jak relativní hustoty, tak i hmotnosti struktur.

³ Nejmenší součet druhé mocniny rozdílů analytických a skutečných hodnot.



Obr. 5-7 Srovnání skutečné relativní hustoty struktury s analyticky určenou hodnotou

Pozn.: Piktogramy použité na obr. 5-7 slouží k rychlejší orientaci ve značení jednotlivých typů struktur. V opodstatněných případech jich je využito i dále.

Kvalita vyrobených struktur

Všechny struktury byly vyrobeny, nicméně u některých byly objeveny nedokonalosti, které více či méně negativně ovlivnily prováděný experiment. Výsledky vizuálního hodnocení jsou zaneseny v tabulce 5-3. Z provedeného hodnocení lze usoudit, že pravděpodobnost bezchybného vyrobení vzorku byla vyšší u menších buněk (kratší délka a) a větších průměrů prutů d .

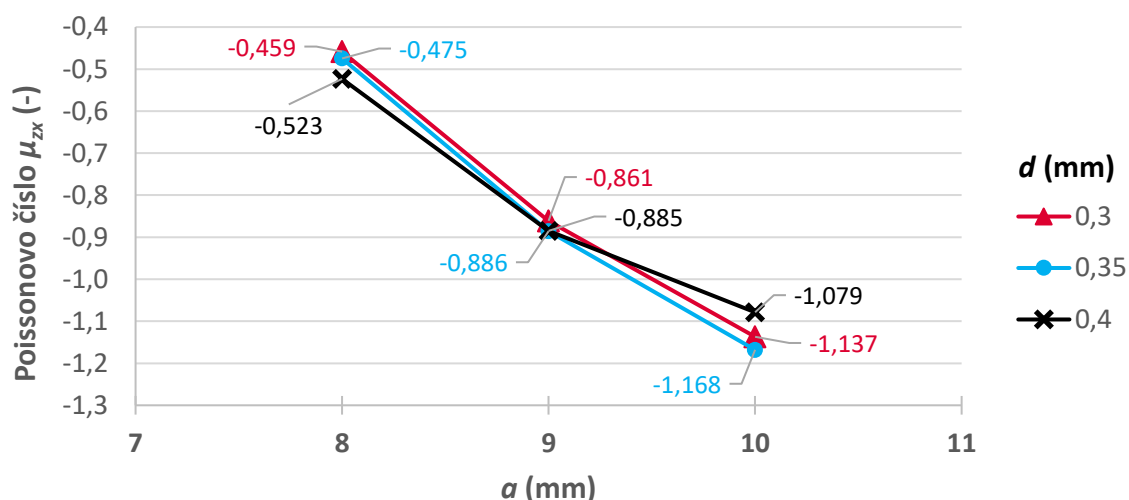
Tab. 5-3 Vizuální kontrola kvality vyrobených struktur (kritéria hodnocení viz kap. 4.1)

struktura	a (mm)	d (mm)	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek
J1A	8	0,3	✓✓	✓✓	✓(2)	X
J1B		0,35	✓✓	✓✓	✓(3)	X+
J1C		0,4	✓✓	✓✓	✓✓	✓(1)
J2A	9	0,3	✓(2)	✓(6)	X	X
J2B		0,35	✓✓	✓✓	✓✓	✓(2)
J2C		0,4	✓✓	✓✓	✓✓	✓(1)
J3A	10	0,3	✓(6)	✓- (11)	X+	X
J3B		0,35	✓✓	✓(1)	✓(1)	✓(3)
J3C		0,4	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
G1	8	0,3-0,45	✓✓	✓(1)	✓(1)	✓(2)
G2	9		✓✓	✓(1)	✓(1)	✓(1)
G3	10		✓✓	✓(1)	✓(5)	X
Legenda	✓✓	Výborná kvalita				
	✓()	Dobrá kvalita ("počet prasklých prutů")				
	X	Špatná kvalita				
	+/-	Lepší/horší než daná kategorie				

5.3.2 Kamerový záznam

Výstupem kamerového záznamu byly hodnoty **Poissonova poměru**, které jsou pro jednoduché struktury uvedeny na obr. 5-8. V tomto grafu jsou rozlišeny struktury podle velikosti buňky (rozměr a), dále podle nominálního průměru prutů d .

Špatná kvalita struktur (zejména chybějící část struktury a velké množství prasklých prutů) způsobila až průběh deformace bez projevu auxetického chování (jeden vzorek u J1A a J3A, částečně pak u J2A). U gradientních struktur nebyl pozorován žádný auxetický efekt, z toho důvodu nebylo Poissonovo číslo vyhodnocováno.



Obr. 5-8 Poissonův poměr v závislosti na velikosti buňky a průměru prutů

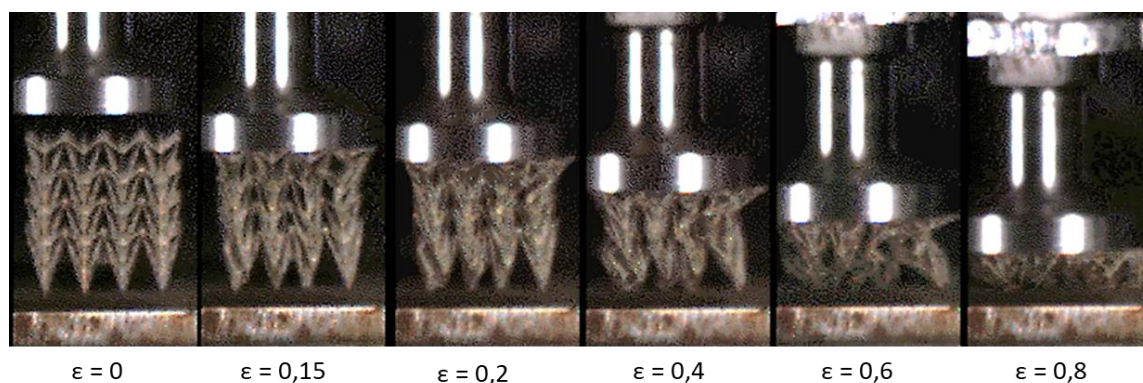
Na obr. 5-9 je zobrazena velikost poměrné deformace v okamžiku měření Poissonova čísla. Je z něj patrné, že pro větší velikost buňky bylo nejvýraznějšího příčného zúžení dosaženo při nižších hodnotách deformace.



Obr. 5-9 Velikost deformace pro měřené hodnoty Poissonova čísla

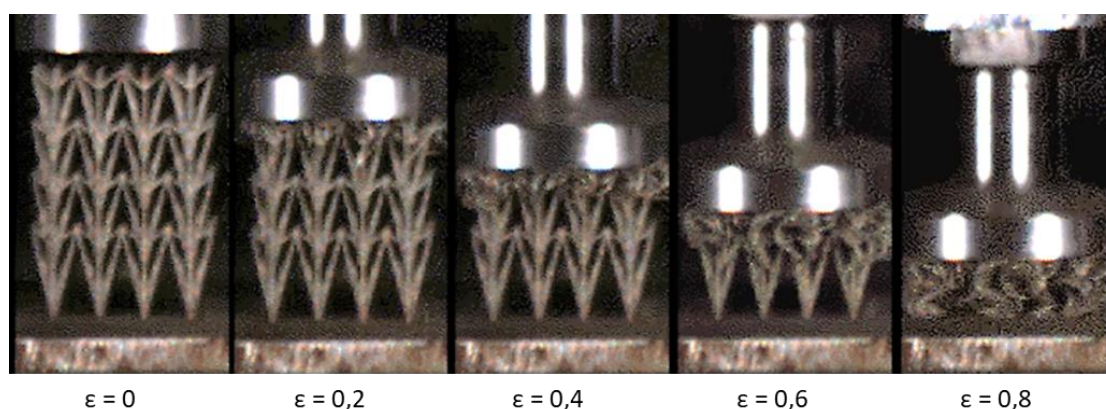
Díky záznamu bylo možné pozorovat celý průběh deformace vzorků (obr. 5-10), ze kterého lze vyvodit několik poznatků týkajících se chování jednoduchých struktur:

- První (horní) řada sloužila pouze k přenosu zatížení na nižší vrstvy.
- Auxetický efekt byl pozorován převážně u třetí a čtvrté vrstvy. U některých vzorků dále následovalo vyboulení spodní části struktury. K tomuto docházelo až po největším příčném zúžení, tudíž na měření Poissonova čísla to nemělo vliv.
- U vzorků J3A a J3B bylo pozorováno vlnění struktury v důsledku většího a a menšího d . Struktura J3C díky většímu průměru prutů již vlnění téměř nepodléhala.



Obr. 5-10 Průběh deformace jednoduché struktury; vzorek J1A

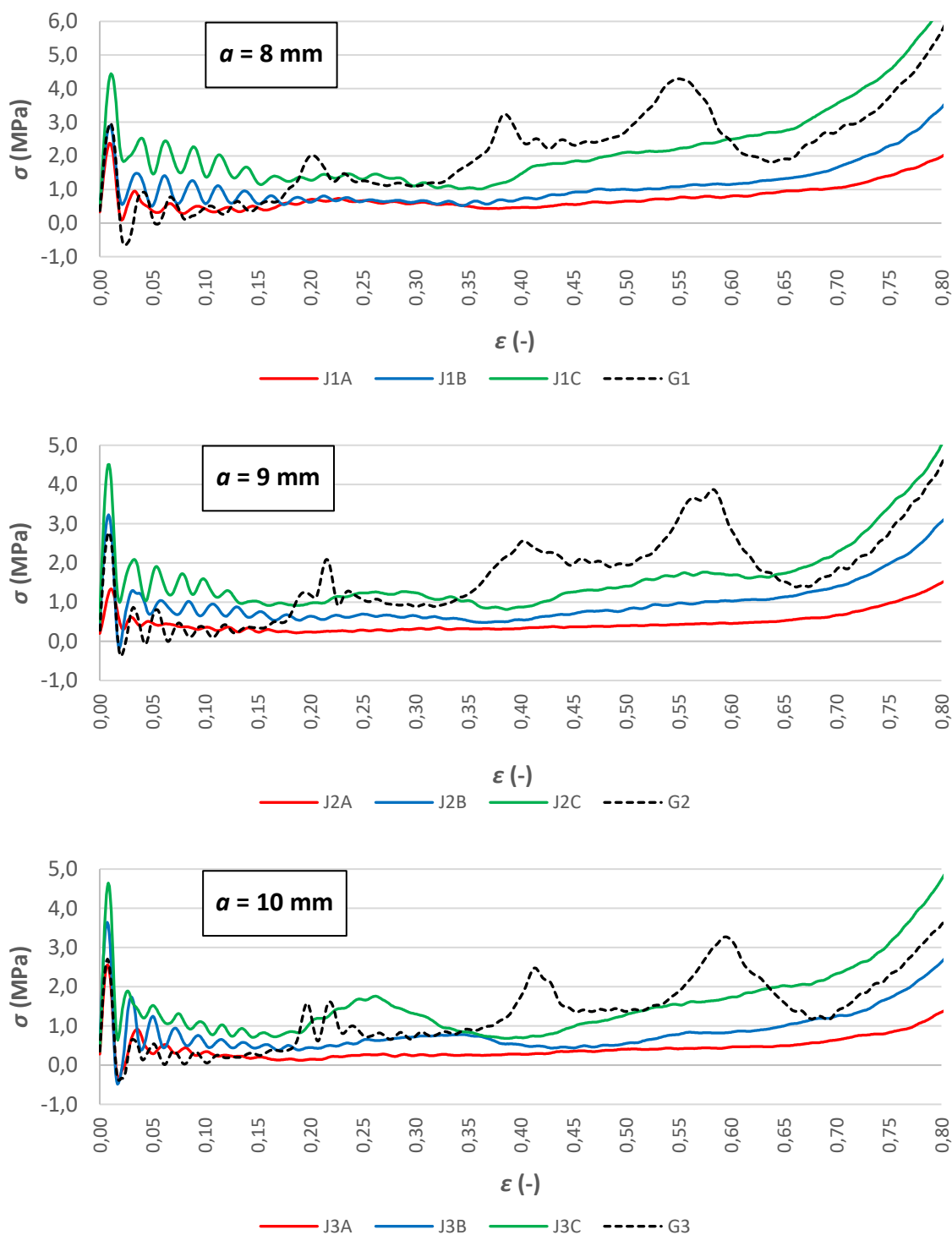
Gradientní struktury se oproti jednoduchým chovaly zcela odlišně (obr. 5-11). Hlavním rozdílem je absence auxetického chování. Tuhost daná rozdílným průměrem prutů byla mnohem významnějším faktorem z hlediska charakteru borcení, než geometrie buňky (tj. geometrie buňky neměla šanci projevit svůj auxetický potenciál). Deformace probíhala postupně po jednotlivých vrstvách (z důvodu skokové změny tuhosti) s různou plynulostí přechodu na další vrstvu. Větší velikost buňky měla za následek ostřejší přechod. To znamenalo, že u vzorku G3 došlo k totálnímu stlačení první vrstvy a až poté se začala deformovat druhá. Naproti tomu u vzorku G1 se následující řada částečně zdeformovala spolu s předchozí a další stlačení následovalo až po úplné deformaci předchozí řady.



Obr. 5-11 Průběh deformace gradientní struktury, vzorek G3

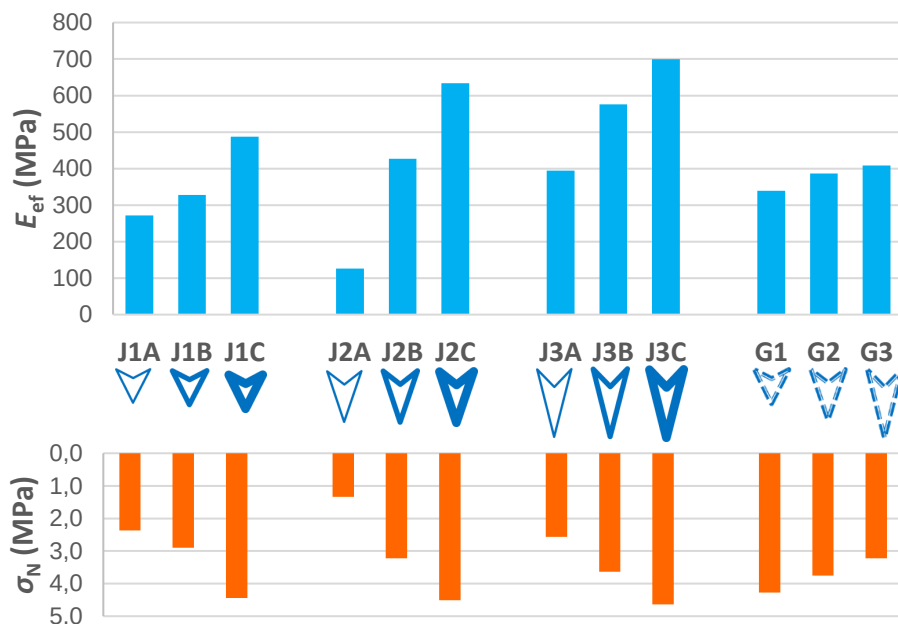
5.3.3 Záznam tenzometru

Vyhodnocením dat z tenzometru vznikly závislosti napětí na poměrné deformaci, ze kterých byly určeny nejdůležitější charakteristiky týkající se absorpce energie. Ze tří testovaných vzorků od každého typu struktury byla data použita ke stanovení průměrných hodnot, které posloužily k reprezentaci daného typu struktury (obr. 5-12).



Obr. 5-12 Srovnání závislosti $\sigma(\epsilon)$ pro struktury se stejnou velikostí buňky (délkou a)

Prvními veličinami získanými z vyobrazených závislostí byly **efektivní Youngův modul** a **nárazové maximum**. Společně jsou uvedeny na obr. 5-13. U jednoduchých struktur se jediné maximum nacházelo vždy na začátku průběhu napětí. Gradientní struktury v důsledku měněního se průměru prutů měly takováto lokální maxima čtyři (čtyři rozdílné průměry prutů), vyhodnoceno bylo nejvyšší z nich.

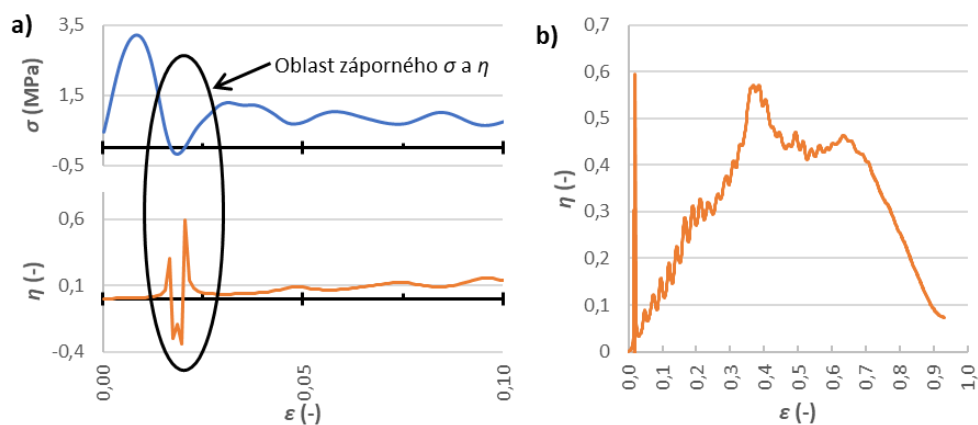


Obr. 5-13 Efektivní Youngův modul a nárazová maxima jednotlivých typů struktur

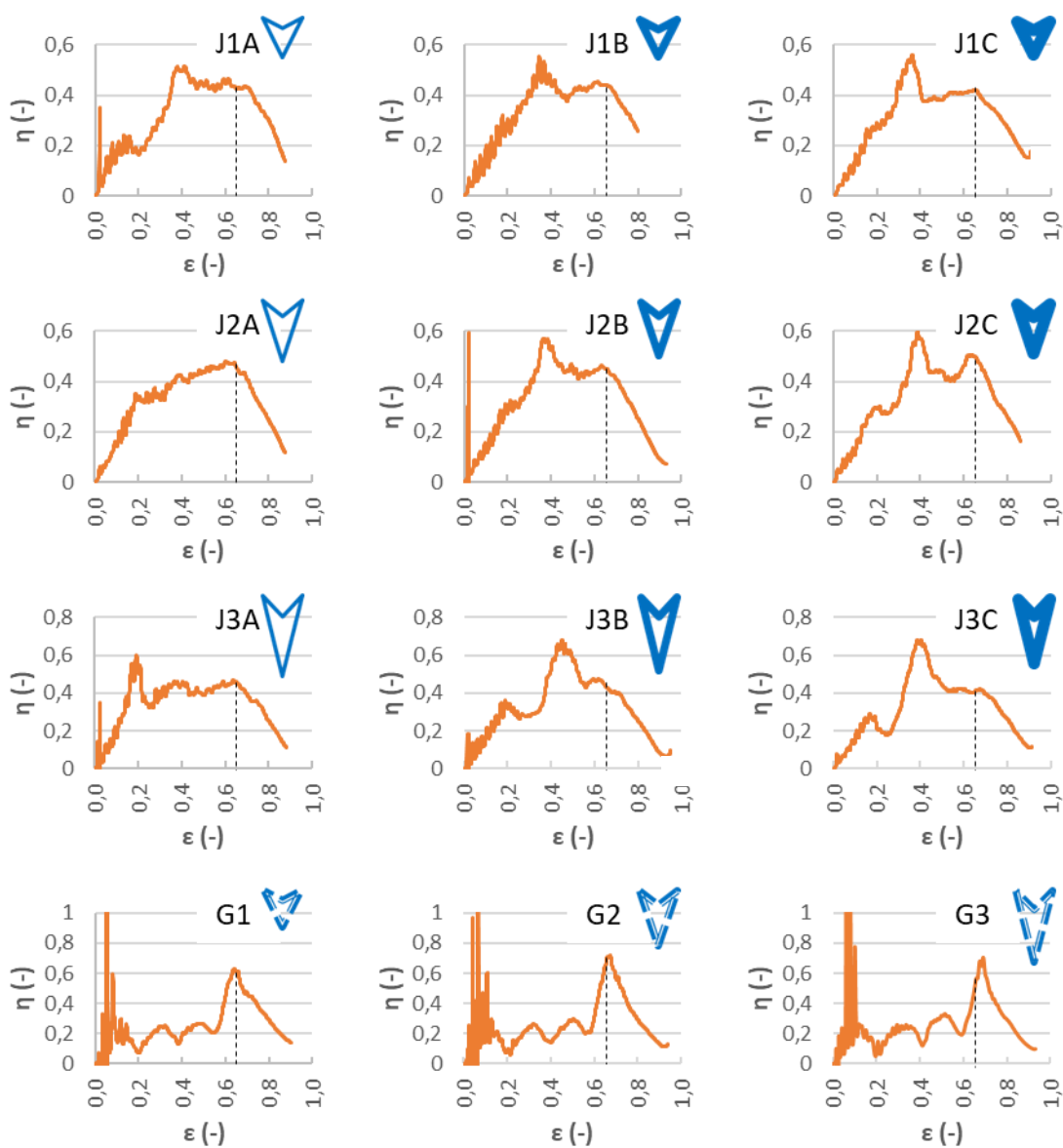
Efektivní Youngův modul s rostoucí velikostí buňky a průměrem prutů rostl (výjimkou byla J2A – vliv kvality struktury). U jednoduchých struktur spolu s E_{ef} rostlo i nárazové maximum. U gradientních naopak všechna nárazová maxima s rostoucí velikostí buňky klesala.

Nárazové maximum všech gradientních struktur bylo vždy menší než nárazové maximum jednoduché struktury s průměrem $d = 0,4$ mm (maximální průměr prutů gradientních struktur byl $0,45$ mm). V kombinaci s nižší relativní hustotou (oproti jednoduchým strukturám, viz obr. 5-7), mají gradientní struktury nakročeno naplnit svůj potenciál z hlediska dobré schopnosti absorpce energie při nižším nárazovém maximu.

Dalším vyhodnoceným parametrem byla **efektivita absorpce energie**. U některých vzorků (J2B, J3A, J3B, všechny gradientní) hodnoty napětí dosahovaly nulových až záporných hodnot. Záporné napětí v počáteční fázi deformace lze pokládat za důsledek odražené tlakové vlny vyvolané nárazem, nicméně se jedná pouze o domněnku. Efektivita absorpce byla určena na základě vztahu (11), kde se ve jmenovateli nachází okamžitá hodnota napětí. Z toho vyplývá, že efektivita v těchto případech dosahovala buďto záporných, nebo velmi vysokých hodnot (obr. 5-14a), což je v rozporu s definicí účinnosti, která se pohybuje v rozmezí od 0 do 1. Proto byl omezen rozsah zobrazovaných hodnot efektivy absorpce energie na $0 < \eta < 1$ (obr. 5-14b). Souhrnný přehled je poté na obr. 5-15.



Obr. 5-14 a) Oblast záporného σ a tomu odpovídající η pro strukturu J2B;
b) Upravený rozsah hodnot pro efektivitu absorpce u J2B



Obr. 5-15 Efektivita absorpce energie v průběhu deformace

Do průběhů na obr. 5-15 je také zaznačena zvolená hodnotu *densification strain* ($\varepsilon_d = 65\%$) společná pro všechny struktury. Extrémní odchylky u některých struktur nebyly považovány za relevantní z dříve objasněných příčin.

Průběh byl u většiny vzorků jednoduchého uspořádání shodný a sledoval podobný scénář:

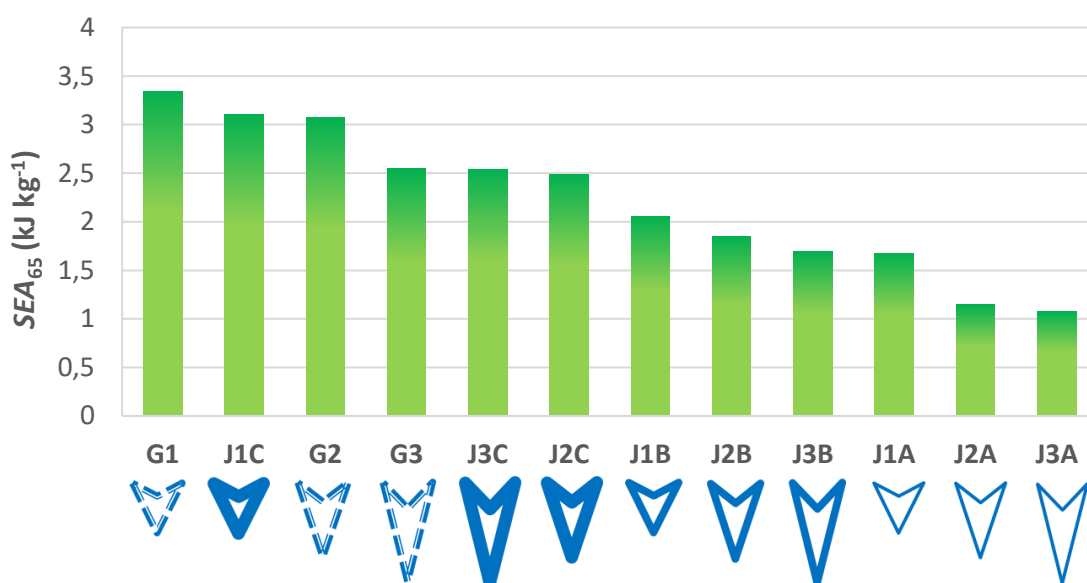
1. rovnoměrný nárůst účinnosti do maximální hodnoty při cca 40 % deformace,
2. prudký pokles,
3. pozvolný nárůst hodnoty účinnosti do cca 65 % deformace,
4. pokles účinnosti až do konečného stlačení struktury.

S rostoucí velikostí buňky dosahovala maximální efektivita vyšších hodnot, zároveň se v první části začal objevovat „mezistupeň“ v podobě lokálního poklesu.

Z důvodu chybějící části nebo značného množství prasklých prutů byl u struktur J2A a J3A očekáván odlišný průběh deformace. To potvrzuje mj. i průběh účinnosti, který u zmíněných struktur nezapadá mezi ostatní.

I z průběhu efektivit absorpce energie u gradientních struktur lze snadno rozlišit deformaci jednotlivých vrstev s rozdílnými průměry prutů. Na rozdíl od jednoduchých struktur se *densification strain* ($\varepsilon_d = 65\%$) shodovala s deformací pro maximální účinnost. I zde se s rostoucí velikostí buňky zvyšovala maximální hodnota efektivit absorpce.

Na základě měrné absorbované energie (W_{65}) určené dle vztahu (9) a skutečné relativní hustoty struktur byla stanovena **specific energy absorption** (SEA_{65}) každého typu struktury. Výsledné srovnání je uvedeno na obrázku 5-16.



Obr. 5-16 Srovnání naměřených hodnot SEA_{65} jednotlivých typů struktur

Pořadí struktur sleduje určitý trend: menší a a větší $d \rightarrow$ vyšší SEA_{65} (až na J2C); gradientní uspořádání dosahovalo lepších výsledků než struktury se stejnou velikostí ramene a .

Návary na prutech struktury J2C zásadně neovlivnily proces deformace, ale navýšily skutečnou relativní hustotu, což ve výsledku snížilo hodnotu SEA_{65} , která je tak nižší než u struktury J3C (zde nebyly návary tak četné). Při použití analyticky určené relativní hustoty struktur dosahuje J2C již vyšší hodnoty absorbované energie než J3C, což je v souladu s vypořizovaným trendem.

Přehled všech naměřených veličin je shrnut v příloze B.

6 DISKUZE

V následující části jsou zhodnoceny a diskutovány dosažené cíle a srovnány s teoretickými podklady. Dále je vysloveno několik otázek týkajících se možností dalšího zkoumání.

Relativní hustota

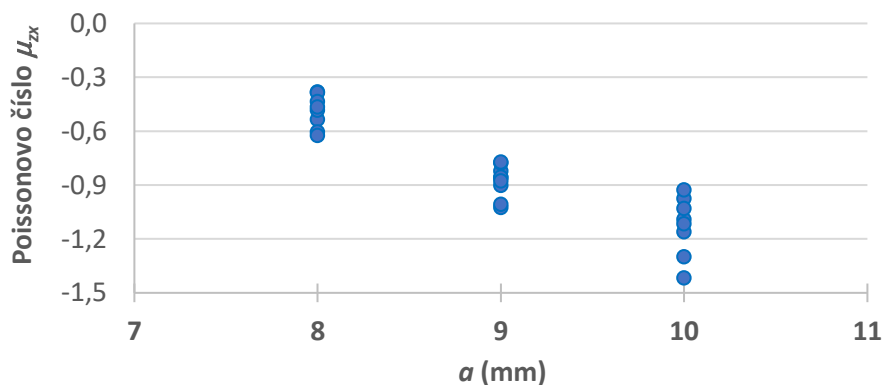
Byl odvozen vztah pro relativní hustotu RRIDA struktury (rovnice (20)), avšak do výpočtů byla použita skutečná relativní hustota, protože mnohem lépe odrážela skutečný stav vyrobených struktur. Odchyłky vypočítaných hodnot byly způsobeny zjednodušením analytického modelu.

Analytické vyjádření rel. hustoty má přínos z hlediska jednoduchého určení její hodnoty (bez nutnosti tvorby CAD modelu), která je nezbytná při srovnávání různých druhů struktur, nebo například při volbě rozměrových parametrů pro návrh nové rozměrové konfigurace.

Auxetické chování

Analýza kamerového záznamu z provedeného experimentu prokázala auxetické chování RRIDA struktury v jednoduchém uspořádání. Dále potvrdila poznatky studie uvedené v rešeršní části [26], že větší poměr délek ramen (v tomto případě poměr a/b) vede k výraznějšímu auxetickému efektu (více záporné μ). Pro větší velikost buňky (délka a) klesala velikost poměrné deformace, pro kterou bylo naměřeno nejvíce záporné μ . Příčinou mohlo být, že příčné zúžení bylo s rostoucím a výraznější a dynamičtější (dle vizuálního hodnocení), avšak projevovalo se po kratší dobu deformace. Z důvodu delších ramen buňky byla struktura náchylnější na vyboulení její části, které zamezilo další příčné kontrakci.

Na obr. 5-8 (viz kap. 5.3.2) jsou zaneseny průměrné hodnoty Poissonova poměru pro každý typ struktury zvlášť, tj. s rozlišením průměru prutů, přičemž nebyl zaznamenán žádný trend, například že větší průměr znamená více záporné μ . Obrázek 6-1 zobrazuje naměřené hodnoty Poissonova čísla bez rozlišení průměru prutů, což může vést k předpokladu nezávislosti μ na průměru d (v rozmezí testovaných hodnot). Pro ještě větší průměr prutů by už μ zřejmě záviselo i na něm, jelikož by výrazně narůstala styčná plocha prutů ve vrcholech RRIDA buňky, což by vedlo k omezení auxetického efektu.



Obr. 6-1 Surová data z měření Poissonova poměru

Variační rozpětí hodnot pro danou velikost buňky na obr. 6-1 může být důsledkem kvality vyrobených struktur a přesnosti metody stanovení μ . Pouze na základě tří rozdílných velikostí buněk nelze určit, zdali očekávat lineární nebo jinou závislost Poissonova čísla na délce ramene a .

Srovnání Poissonova poměru určeného analyticky na základě vztahu (23) s hodnotou stanovenou simulací v prostředí ANSYS (pro typ J2C) ukázalo, nakolik rozdílné tyto dva přístupy jsou (více než dvojnásobně odlišná hodnota). Nejinak tomu bylo i po provedení experimentu, viz tab. 6-1.

Tab. 6-1 Hodnoty Poissonova poměru

a (mm)	μ_{zx} – analyticky	μ_{zx} – experiment (průměr)
8	–2,180	–0,489
9	–2,494	–0,877
10	–2,804	–1,127

Důležitou roli hraje odlišnost analytického rovinného modelu od skutečné prostorové struktury. Rovinný model *arrowhead* buňky je založen na tuhých prutech vzájemně spojených rotační vazbou, kdy deformace probíhá rotací ramen kolem uzlů. RRIDA buňka se ovšem chovala jako *stretch-dominated*⁴, což samo o sobě rotaci ramen nedovolovalo. Analytický model dle kapitoly 5.1.4 tudíž nelze aplikovat na RRIDA strukturu.

Při dodatečném srovnání Poissonova čísla struktury J2C určené simulací ($\mu_{zx} = -1,03$) s odpovídající experimentální hodnotou ($\mu_{zx} = -0,89$), je odchylka přibližně 13 %. Příčinu lze nalézt v odlišném způsobu zatěžování (kvazistatické/dynamické), ale i vlivu výroby.

U RRIDA struktury složené ze $4 \times 4 \times 4$ buněk se auxetické chování objevovalo minimálně u dvou spodních řad, přestože u *stretch-dominated* mikro-prutového čtyřstěnu [17] nebyl pozorován auxetický efekt (průběh deformace vrstva po vrstvě, viz obr. 2-21b). V případě navýšení celkového počtu buněk RRIDA struktury by bylo očekáváno projevení auxetického efektu ve větší míře, jak je zobrazeno na obr. 2-21a.

Gradientní uspořádání RRIDA struktury auxetické chování nevykazovalo. Jedná se pravděpodobně o následek specifické stavby jednotlivých vrstev. Rozdílné průměry prutů buněk v jednotlivých řadách zapříčinily rozdílné tuhosti. I když byla změna průměru pouze o 0,05 mm na řadu, tuhost vrstev byla natolik odlišná, že nižší řada se chovala jako pevný podklad. Je možné, že menší gradient (např. o 0,01 mm na řadu) by umožnil RRIDA struktuře projevit svůj auxetický potenciál.

⁴ Maxwelllovo kritérium viz kap. 5.1.1; srovnání průběhů $\sigma(\epsilon)$ na obrázcích 2-7a a 5-12.

Mechanické vlastnosti

Vyhodnocení efektivního Youngova modulu pro jednoduché uspořádání souhlasilo s poznatky uváděnými ve studii [33]. Tato práce potvrdila růst E_{ef} spolu s mírou auxetického chování při zvětšování délky ramene a . Zároveň s vyšším E_{ef} rostlo i nárazové maximum (viz obr. 5-13). Obecně lze říct, že množství absorbované energie bylo tím větší, čím vyšší byla relativní hustota struktury (menší a , větší d). Jelikož relativní hustotu více ovlivňuje průměr prutů (viz obr. 5-7), pohlcená energie na něm závisela mnohem více než na velikosti buňky.

U gradientního uspořádání byl vliv velikosti buňky na E_{ef} shodný jako v případě jednoduchých struktur. Snížení nárazového maxima a navýšení pohlcené energie oproti jednoduchému uspořádání se stejnou velikostí buňky (viz obr. 5-13 a 5-16) se shoduje s teorií [35]. Na druhou stranu typ G3 dosáhl z hlediska absorbované energie téměř shodného výsledku ve srovnání s J3C. Roli zde mohla sehrát kvalita výroby, kdy dva ze tří testovaných vzorků G3 obsahovaly několik prasklých prutů, zatímco vzorky J3C byly bez vad.

Na množství pohlcené energie má pozitivní vliv nejen auxetické chování, ale i gradientní uspořádání průměru prutů (viz řešerše [3, 35]). Nejlepšího výsledku by bylo pravděpodobně dosaženo při využití výhod obou zmíněných faktorů.

Ačkoliv nebylo u gradientních struktur dosaženo auxetického efektu (viz“ auxetické chování“ výše), čímž nebyl plně využit potenciál auxetické struktury z hlediska absorpce energie ⁵, primárně navržená struktura, tj. RRIDA struktura v jednoduchém uspořádání, uspěla během experimentálního testování ve všech ohledech.

⁵ Z důvodu absence příčného zúžení nedošlo k lokálnímu vyztužení okolními pruty.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem bakalářské práce byl návrh prostorové mikro-prutové auxetické struktury, kterou bude možné vyrobit technologií SLM.

Byl navržen nový typ auxetické struktury – RRIDA, spadající do kategorie mikro-prutových 3D *re-entrant* struktur. Dále byl stanoven analytický vztah pro výpočet rel. hustoty, důležitý zejména pro srovnání s jinými strukturami bez nutnosti tvorby CAD modelu.

Bylo navrženo devět rozměrových konfigurací jednoduchého uspořádání (průměr prutů je v rámci vzorku konstantní), lišící se velikostí elementární buňky a průměrem prutů. K tomu další tři konfigurace gradientního uspořádání o různé velikosti el. buňky s gradientem průměru prutů 0,05 mm na řadu. Všechny vzorky tvořilo $4 \times 4 \times 4$ buněk.

Vyrobitelnost technologií SLM byla ověřena zhotovením čtyř vzorků od každé konfigurace. I přes lokální vady na některých strukturách proběhla výroba úspěšně bez jejího přerušení.

Za účelem ověření auxetického chování byly vyrobené vzorky podrobeny pádovému testu. Jeho dalším výstupem byla závislost $\sigma(\varepsilon)$, která sloužila k vyhodnocení mechanických vlastností navržených konfigurací.

Auxetické chování jednoduchého uspořádání bylo potvrzeno nejen prostřednictvím simulace MKP v prostředí programu ANSYS, ale i na základě vyhodnocení kamerového záznamu z provedeného pádového testu. Naměřené hodnoty Poissonova čísla byly závislé primárně na velikosti elementární buňky struktury, zatímco u zkoumaného rozmezí průměru prutů nebyla nalezena žádná závislost. Pro větší velikost buňky byly naměřeny více záporné hodnoty Poissonova poměru. Gradientní uspořádání auxetické chování neprojevalo.

Z hlediska mechanických vlastností byly zjištěny tyto vlivy geometrických parametrů:

- Pro jednoduché uspořádání znamená větší velikost buňky a průměr prutů vyšší efektivní Youngův modul (E_{ef}) i nárazové maximum.
- U gradientního uspořádání byl vliv velikosti buňky na E_{ef} totožný jako v případě jednoduchého, avšak za současně se snižujícího nárazového maxima.
- Množství absorbované energie bylo vyšší pro větší průměr prutů. Dále byl zaznamenán trend, že s větší velikostí buňky množství pohlcené energie klesá.
- Gradientní uspořádání mělo na absorpci energie pozitivní vliv (zvýšilo ji oproti jednoduchému uspořádání)

Pro důkladnější zhodnocení vlivu geometrických parametrů na vlastnosti RRIDA struktury bude nutné provést větší počet měření, aby vliv kvality vzorků byl statisticky zanedbatelný. Přínosné by také bylo zkoumání širšího rozsahu velikostí buňky a průměru prutů.

S ohledem na zadání bakalářské práce lze prohlásit, že všechny cíle byly úspěšně splněny.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOLKEN, H. M. A. a A. A. ZADPOOR. Auxetic mechanical metamaterials. *RSC Advances* [online]. 2017, 7(9), 5111-5129. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C6RA27333E
- [2] EVANS, K. E. a A. ALDERSON. Auxetic Materials: Functional Materials and Structures from Lateral Thinking!. *Advanced Materials* [online]. 2000, 12(9), 617-628. Dostupné z: doi: 10.1002/(SICI)1521-4095(200005)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3
- [3] SAXENA, K. K., R. DAS a E. P. CALIUS. Three Decades of Auxetics Research – Materials with Negative Poisson's Ratio: A Review. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2016, 18(11), 1847-1870. ISSN 14381656. Dostupné z: doi:10.1002/adem.201600053
- [4] ASHBY, M.F. The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2006, 364(1838), 15-30. ISSN 1364-503X. Dostupné z: doi:10.1098/rsta.2005.1678
- [5] CHRISTENSEN, J., M. KADIC, M. WEGENER a O. KRAFT. Vibrant times for mechanical metamaterials. *MRS Communications* [online]. 2015, 5(3), 453-462. ISSN 2159-6859. Dostupné z: doi:10.1557/mrc.2015.51
- [6] GOHAR, S., G. HUSSAIN, M. ILYAS a A. ALI. Performance of 3D printed topologically optimized novel auxetic structures under compressive loading: experimental and FE analyses. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2021, 15, 394-408. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2021.07.149
- [7] LARSEN, U. D., O. SIGNUND a S. BOUWSTA. Design and fabrication of compliant micromechanisms and structures with negative Poisson's ratio. *Journal of Microelectromechanical Systems* [online]. 1997, 6(2), 99-106. ISSN 10577157. Dostupné z: doi:10.1109/84.585787
- [8] STARKOVA, O. a A. ANISKEVICH. Poisson's ratio and the incompressibility relation for various strain measures with the example of a silica-filled SBR rubber in uniaxial tension tests. *Polymer Testing* [online]. 2010, 29(3), 310-318. ISSN 01429418. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymertesting.2009.12.005
- [9] PRALL, D. a R.S. LAKES. Properties of a chiral honeycomb with a poisson's ratio of — 1. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 1997, 39(3), 305-314. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/S0020-7403(96)00025-2
- [10] SHAN, S., S. H. KANG, Z. ZHAO, L. FANG a K. BERTOLDI. Design of planar isotropic negative Poisson's ratio structures. *Extreme Mechanics Letters* [online]. 2015, 4, 96-102. ISSN 23524316. Dostupné z: doi:10.1016/j.eml.2015.05.002

- [11] ALDERSON, A., K.L. ALDERSON, D. ATTARD a K.E. EVANS. Elastic constants of 3-, 4- and 6-connected chiral and anti-chiral honeycombs subject to uniaxial in-plane loading. *Composites Science and Technology* [online]. 2010, **70**(7), 1042-1048. ISSN 02663538. Dostupné z: doi:10.1016/j.compscitech.2009.07.009
- [12] BOUAZIZ, O., J.P. MASSE, S. ALLAIN a L. ORGÉAS. Compression of crumpled aluminum thin foils and comparison with other cellular materials. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2013, **570**, 1-7. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2013.01.031
- [13] GRIMA, J. N., L. MIZZI, K. M. AZZOPARDI a R. GATT. Auxetic Perforated Mechanical Metamaterials with Randomly Oriented Cuts. *Advanced Materials* [online]. 2016, **28**(2), 385-389. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201503653
- [14] ALI, M. N., J. J. C. BUSFIELD a I. U. REHMAN. Auxetic oesophageal stents: structure and mechanical properties. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* [online]. 2014, **25**(2), 527-553. ISSN 0957-4530. Dostupné z: doi:10.1007/s10856-013-5067-2
- [15] ALDERSON, A., J. RASBURN, S. AMEER-BEG a P. G. MULLARKEY. *An Auxetic Filter: A Tuneable Filter Displaying Enhanced Size Selectivity or Defouling Properties* [online]. 2000, **39**(3), 654-665. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie990572w
- [16] KRISHNAN, B. R., A. N. BISWAS, K.V. AHALYA KUMAR a P.S. RAMA SREEKANTH. Auxetic structure metamaterial for crash safety of sports helmet. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, **56**, 1043-1049. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.09.110
- [17] CHEN, Z., Z. WANG, S. ZHOU aj. SHAO. Novel Negative Poisson's Ratio Lattice Structures with Enhanced Stiffness and Energy Absorption Capacity. *Materials* [online]. 2018, **11**(7). ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11071095
- [18] HARRIS, J.A., R.E. WINTER a G.J. MCSHANE. Impact response of additively manufactured metallic hybrid lattice materials. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2017, **104**, 177-191. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2017.02.007
- [19] LI, Q. M., I. MAGKIRIADIS a J. J. HARRIGAN. Compressive Strain at the Onset of Densification of Cellular Solids. *Journal of Cellular Plastics* [online]. 2006, **42**(5), 371-392. ISSN 0021-955X. Dostupné z: doi:10.1177/0021955X06063519
- [20] LI, Z., K.F. WANG a B.L. WANG. Indentation resistance of brittle auxetic structures: Combining discrete representation and continuum model. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2021, **252**. ISSN 00137944. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfracmech.2021.107824
- [21] SCARPA, F., W. W. CLARK, M. AHMADIAN a J. A. GIACOMIN. *Dynamic behavior and damping capacity of auxetic foam pads* [online]. 2006. Dostupné z: doi:10.1117/12.658453

- [22] GRIMA-CORNISH, J.-N. Auxetics: Don't Pull Me, I'll Get Fatter!. *IUCr Newsletter* [online]. 2019, **27**(2). Dostupné z: iucr.org/news/newsletter/volume-27/number-2/auxetics
- [23] MASTERS, I.G. a K.E. EVANS. Models for the elastic deformation of honeycombs. *Composite Structures* [online]. 1996, **35**(4), 403-422. ISSN 02638223. Dostupné z: [doi:10.1016/S0263-8223\(96\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(96)00054-2)
- [24] INGROLE, A., A. HAO a R. LIANG. *Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement* [online]. 2017, **117**, 72-83. ISSN 02641275. Dostupné z: [doi:10.1016/j.matdes.2016.12.067](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.12.067)
- [25] SMITH, C.W, J.N GRIMA a K.E EVANS. A novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foams: missing rib foam model. *Acta Materialia* [online]. 2000, **48**(17), 4349-4356. ISSN 13596454. Dostupné z: [doi:10.1016/S1359-6454\(00\)00269-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00269-X)
- [26] LIM, T.-CH.. A 3D auxetic material based on intersecting double arrowheads. *Physica status solidi (b)* [online]. 2016, **253**(7), 1252-1260. ISSN 03701972. Dostupné z: [doi:10.1002/pssb.201600015](https://doi.org/10.1002/pssb.201600015)
- [27] GRIMA, J. N., R. GATT, A. ALDERSON a K. E. EVANS. On the potential of connected stars as auxetic systems. *Molecular Simulation* [online]. 2005, **31**(13), 925-935. ISSN 0892-7022. Dostupné z: [doi:10.1080/08927020500401139](https://doi.org/10.1080/08927020500401139)
- [28] MOUSANEZHAD, D., B. HAGHPANAH, R. GHOSH a A. M. HAMOUDA. Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach. *Theoretical and Applied Mechanics Letters* [online]. 2016, **6**(2), 81-96. ISSN 20950349. Dostupné z: [doi:10.1016/j.taml.2016.02.004](https://doi.org/10.1016/j.taml.2016.02.004)
- [29] GRIMA, J. N., R. GATT a P.-S. FARRUGIA. On the properties of auxetic meta-tetrachiral structures. *Physica status solidi (b)* [online]. [online], 2008, **245**(3), 511-520. ISSN 03701972. Dostupné z: [doi:10.1002/pssb.200777704](https://doi.org/10.1002/pssb.200777704)
- [30] GRIMA, J. N., P.-S. FARRUGIA, R. GATT a D. ATTARD. On the auxetic properties of rotating rhombi and parallelograms: A preliminary investigation. *Physica status solidi (b)* [online]. 2008, **245**(3), 521-529. ISSN 03701972. Dostupné z: [doi:10.1002/pssb.200777705](https://doi.org/10.1002/pssb.200777705)
- [31] GRIMA, J. N., R. GATT, A. ALDERSON a K. E. EVANS. On the Auxetic Properties of Rotating Rectangles' with Different Connectivity. *Journal of the Physical Society of Japan* [online]. 2005, **74**(10), 2866-2867. ISSN 0031-9015. Dostupné z: [doi:10.1143/JPSJ.74.2866](https://doi.org/10.1143/JPSJ.74.2866)
- [32] CADDOCK, B. D. a K. E. EVANS. Microporous materials with negative Poisson's ratios. I. Microstructure and mechanical properties. *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 1989, **22**(12), 1877-1882. ISSN 0022-3727. Dostupné z: [doi:10.1088/0022-3727/22/12/012](https://doi.org/10.1088/0022-3727/22/12/012)

- [33] SCARPA, F. a P. J. TOMLIN. On the transverse shear modulus of negative Poisson's ratio honeycomb structures. *Fracture of Engineering Materials and Structures* [online]. 2000, **23**(8), 717-720. ISSN 8756-758X. Dostupné z: doi:10.1046/j.1460-2695.2000.00278.x
- [34] SHEN, J., K. LIU, Q. ZENG aj. GE. Design and mechanical property studies of 3D re-entrant lattice auxetic structure. *Aerospace Science and Technology* [online]. 2021, **118**. ISSN 12709638. Dostupné z: doi:10.1016/j.ast.2021.106998
- [35] GAO, Q. a W.-H. LIAO. Energy absorption of thin walled tube filled with gradient auxetic structures-theory and simulation. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2021, **201**. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2021.106475
- [36] HA, CH. S., M. E PLESHA a R. S. LAKES. Chiral three-dimensional lattices with tunable Poisson's ratio. *Smart Materials and Structures* [online]. 2016, **25**(5). ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/25/5/054005
- [37] EVANS, K. E. a A. ALDERSON. Rotation and dilation deformation mechanisms for auxetic behaviour in the α -cristobalite tetrahedral framework structure. *Physics and Chemistry of Minerals* [online]. 2001, **28**(10), 711-718. ISSN 0342-1791. Dostupné z: doi:10.1007/s002690100209
- [38] AHMED, S. H. a A. MIAN. Influence of Material Property Variation on Computationally Calculated Melt Pool Temperature during Laser Melting Process. *Metals* [online]. 2019, **9**(4). ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met9040456
- [39] ČERVINEK, O., B. WERNER, D. KOUTNÝ, O. VAVERKA, L. PANTĚLEJEV a D. PALOÚŠEK. Computational Approaches of Quasi-Static Compression Loading of SS316L Lattice Structures Made by Selective Laser Melting. *Materials*. [online], 2021, **14**(9). ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14092462
- [40] VRÁNA, R. Návrh porézních struktur pro aditivní výrobu technologií selective laser melting [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. 2014. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/33119>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

SYMBOL	JEDNOTKA	VÝZNAM VELIČINY
a	m	nejdelší rameno jádra RRIDA buňky
A	m ²	plocha průmětu struktury ve směru zatěžování
b	m	re-entrant rameno RRIDA buňky
B	Pa	objemový modul pružnosti
c	m	polovina šířky RRIDA buňky
C	m	koeficient zahrnující překryv podpor
d	m	průměr prutů
D	m	koeficient zahrnující překryv pomocných prutů
E	Pa	Youngův modul pružnosti v tahu
E_{ef}	Pa	efektivní Youngův modul pružnosti v tahu
E_s	Pa	Youngův modul základního materiálu
E_y	Pa	Youngův modul v daném směru
F	N	zatěžující síla
G	Pa	modul pružnosti ve smyku
h	m	délka ramene
H	m	výška vzorku při měření μ
H_0	m	původní výška vzorku
j	–	počet uzlů soustavy prutů
K	–	korekční faktor zahrnující překryv prutů
l, l_1, l_2	m	délka ramene
L	m	původní délka objektu
ΔL	m	délková změna
$\Delta L_x, \Delta L_y$	m	délková změna v daném směru
m^*	kg	hmotnost struktury/vzorku
m_s	kg	hmotnost materiálu o objemu V_s
M	–	Maxwellovo číslo
n	–	stupeň symetrie hvězdicových struktur
N_x, N_y, N_z	–	počet buněk struktury v daném směru
p	–	počet prutů soustavy prutů

SYMBOL	JEDNOTKA	VÝZNAM VELIČINY
SEA	$J\ kg^{-1}$	specific energy absorption
SEA_{65}	$J\ kg^{-1}$	specific energy absorption pro $\varepsilon_d = 65\ %$
t	m	tloušťka ramene
V^*	m^3	objem prutů struktury
V_b	m^3	objem prutů RRIDA buňky
V_s	m^3	objem vymezený strukturou/vzorkem v prostoru
W	$J\ m^{-3}$	měrná absorbovaná energie
W_{65}	$J\ m^{-3}$	měrná absorbovaná energie pro $\varepsilon_d = 65\ %$
X	m	šířka vzorku při měření μ
X_0	m	původní šířka vzorku

SYMBOL	JEDNOTKA	VÝZNAM VELIČINY
α	°	úhel RRIDA buňky
β	°	úhel RRIDA buňky
ε	–	poměrná deformace
ε_0	–	poměrná deformace pro vyhodnocení W
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_x, \varepsilon_y$	–	poměrná deformace v příslušných směrech
ε_d	–	densification strain
η	–	efektivita (účinnost) absorpce energie
$\eta(\varepsilon)$	–	okamžitá efektivita absorpce energie
θ	°	úhel prolomení
θ_1, θ_2	°	úhel arrowhead buňky
μ	–	Poissonův poměr, Poissonovo číslo
$\mu_{yx}, \mu_{xy}, \mu_{xz}, \mu_{zx}$	–	Poissonův poměr v daném směru
ρ_b	–	relativní hustota RRIDA buňky
ρ_{rel}	–	relativní hustota
ρ_s	$kg\ m^{-3}$	hustota základového materiálu
ρ_{skut}	–	skutečná (změřená) rel. hustota RRIDA struktury
ρ_{str}	–	analyticky určená rel. hustota RRIDA struktury
σ	Pa	zatěžující napětí
$\sigma(\varepsilon)$	Pa	okamžitá hodnota napětí
σ_N	Pa	nárazové maximum

<u>ZKRATKA</u>	<u>VÝZNAM ZKRATKY</u>
2D	dvojměrný
3D	trojměrný
CAD	Computer Aided Design
ePTFE	extrudovaný polytetrafluorethylen
MKP	metoda konečných prvků
RRIDA	Reinforced Reversed Intersecting Double Arrowhead
SLM	Selective Laser Melting

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	Snímek z mikroskopu: a) běžná; b) auxetická polymerní pěna [2].....	14
Obr. 2-2	Příklady hlavních skupin auxetických struktur: a) re-entrant; b) chirální; c) rotační [1].....	15
Obr. 2-3	a) Model elementární buňky auxetické mikro-prutové struktury; b) rovinná prutová struktura vytažená do prostoru (skořepinový typ) [5, 6]	15
Obr. 2-4	a) Běžná hexagonální síť deformující se rotací buněčných stěn (prutů) v místech spojení v důsledku tahového zatížení ve směru y; $\Delta L_y > 0$; $\Delta L_x < 0 \rightarrow \mu > 0$ (neauxetické). b) <i>Re-entrant</i> hexagonální síť při stejném způsobu zatížení a mechanismu deformace jako (a); $\Delta L_y > 0$; $\Delta L_x > 0 \rightarrow \mu < 0$ (auxetické). [2].....	16
Obr. 2-5	Příklady izotropních auxetických struktur: a) hexachirální [11], b) zvrásněná hliníková fólie [12], c) perforovaný arch [13]	17
Obr. 2-6	Milton-Ashby mapa auxetických materiálů (červený klín) zobrazující rozsah ρ_{rel} , G a B ve srovnání s běžnými materiály (šedý mrak) [5].....	18
Obr. 2-7	Typická závislost napětí-deformace pro: a) <i>stretch-dominated</i> struktury; b) <i>bending-dominated</i> struktury [4]	19
Obr. 2-8	a) Reakce auxetické struktury na náraz indentoru; zhutnění pod místem nárazu; b) Reakce neauxetické struktury na náraz indentoru [20]	21
Obr. 2-9	a) Sedlová plocha neauxetického materiálu; b) vypuklý tvar auxetického materiálu [2]	21
Obr. 2-10	a) Princip auxetické bandáže s dávkováním léčiva; b) tubulární stent tvořený rotační auxetickou strukturou; c) balistické pláty z auxetického materiálu na armádním vozidle [3, 22]	22
Obr. 2-11	Model hexagonální <i>re-entrant</i> buňky (vlevo) a struktury (vpravo); h a l jsou délky ramen; t je tloušťka ramen; θ je úhel prolomení [2]	23
Obr. 2-12	a) Model <i>arrowhead</i> buňky, b) model struktury; upraveno dle [26].....	24
Obr. 2-13	Hvězdicové auxetické struktury: a) 3-STAR; b) 4-STAR; c) 6-STAR [27]	24
Obr. 2-14	a) Mechanismus deformace; b) anti-tetrachirální (s vyznačením spojnice středů válců); c) tetrachirální (s vyznačením spojnice středů válců) [1, 29]	25
Obr. 2-15	a) Rotační čtverce; b) rotační obdélníky; c) rotační kosočtverce [30]	25

Obr. 2-16	Perforované pláty s prostými zářezy; a) „Y-cut“ napodobuje rotační trojúhelníky; b) vzájemně kolmé zářezy (napodobení rotačních čtverců); c) náhodně orientované zářezy [10, 13]	26
Obr. 2-17	a) Zatěžování struktury tahem, uzliny v podélném směru; b) rozšíření v důsledku rotace uzlin do kolmého směru [1]	26
Obr. 2-18	a) Původní 3D re-entrant prutová buňka a struktura; b) nová 3D buňka a struktura [34].....	27
Obr. 2-19	a) Schéma <i>double arrowhead</i> buňky; b) gradientní uspořádání průměru prutů; c) čtvercový tubus vyplněný gradientní aux. strukturou [26, 35]	27
Obr. 2-20	a) Mikro-prutový auxetický čtyřstěn; b) – d) vyztužené podoby auxetického čtyřstěnu (přidané výztuhy vyznačeny přerušovanou čarou) [17]	28
Obr. 2-21	Průběh deformace mikro-prutového čtyřstěnu: a) deformace struktury s příčným zúžením; b) deformace struktury vrstva po vrstvě [17]	28
Obr. 2-22	Elementární buňka prostorové chirální struktury [36]	29
Obr. 2-23	Struktura tvořená rotujícími čtyřstěny [37]	29
Obr. 2-24	Příklady rovinných mnohoúhelníků: a) bez auxetického potenciálu; b) s předpokladem aux. chování; vyznačeny nekonvexní úhly	30
Obr. 4-1	Schéma procesu výroby metodou SLM [38]	32
Obr. 4-2	Druhy vad ovlivňující hodnocení kvality vzorku: a) prasklý prut; b) deformace prutů; c) deformace části struktury; d) chybějící část struktury	33
Obr. 4-3	Schéma postupu práce při návrhu nové mikro-prutové struktury	34
Obr. 4-4	a) Výřez modelu RRIDA struktury se zobrazenými elementy; b) zobrazení okrajových podmínek.....	35
Obr. 4-5	Schéma pádového testu; a) čelní pohled; b) pohled shora (řez rámem)	36
Obr. 4-6	Způsob určení Poissonova poměru pomocí kamerového záznamu.....	37
Obr. 4-7	Vyhodnocený záznam tenzometru se zaznačením veličin.....	38
Obr. 5-1	a) Geometrie nového typu prostorové auxetické buňky; b) základ buňky tvořený šípovitou rovinnou strukturou	39
Obr. 5-2	Schéma RRIDA buněk doplněných o nezbytné podpory (žlutě) a pomocné pruty (červeně a fialově): a) spodní vrstva struktury, b) střední vrstvy, c) vrchní vrstva	40
Obr. 5-3	Stlačení RRIDA struktury J2C o 5 mm, barevná mapa značí posuv v příčném směru; pohled na stranu bez podpor.....	43

Obr. 5-4	Stlačení RRIDA struktury J2C o 5 mm, barevná mapa značí posuv v příčném směru; pohled na stranu s podporami	44
Obr. 5-5	Výrobní platforma se strukturami. Šipkami naznačen proud dusíkové atmosféry (FLOW) a pohyb recoateru (REC).	44
Obr. 5-6	Odchyłky od modelu: a) rozdílné průměry prutů pro nominální průměr 400 μm ; b) návary a shluky materiálu.....	45
Obr. 5-7	Srovnání skutečné rel. hustoty struktury s analyt. určenou hodnotou	46
Obr. 5-8	Poissonův poměr v závislosti na velikosti buňky a průměru prutů.....	47
Obr. 5-9	Velikost deformace pro měřené hodnoty Poissonova čísla	47
Obr. 5-10	Průběh deformace jednoduché struktury; vzorek J1A	48
Obr. 5-11	Průběh deformace gradientní struktury, vzorek G3.....	48
Obr. 5-12	Srovnání závislosti $\sigma(\epsilon)$ pro struktury se stejnou velikostí a	49
Obr. 5-13	Efekt. Youngův modul a nárazová maxima struktur	50
Obr. 5-14	a) Oblast záporného σ a tomu odpovídající η pro strukturu J2B; b) Upravený rozsah hodnot pro efektivitu absorpce u J2B.....	51
Obr. 5-15	Efektivita absorpce energie v průběhu deformace	51
Obr. 5-16	Srovnání naměřených hodnot SEA_{65} jednotlivých typů struktur	52
Obr. 6-1	Surová data z měření Poissonova poměru	54

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1	Chemické složení TLS práškové oceli 316L [39]	32
Tab. 5-1	Rozměrové konfigurace vyráběných RRIDA struktur	42
Tab. 5-2	Prům. hmotnost struktur; srovnání skutečné a analyt. určené hodnoty	45
Tab. 5-3	Vizuální kontrola kvality vyrobených struktur	46
Tab. 6-1	Hodnoty Poissonova poměru	55
Tab. 12-1	Souhrnný přehled vybraných veličin.....	69

12 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A – Vztahy pro určení korekčního faktoru K

PŘÍLOHA B – Tabulka srovnání naměřených veličin

PŘÍLOHA A

Výpočet korekčního faktoru K zahrnující překryv prutů v elementární RRIDA buňce (viz rovnice (19), kap. 5.1.2). Uvedené vztahy je možné použít pouze pro danou konfiguraci délek ramen a, b, c a v rozmezí průměru prutů $d \in \langle 0,2; 1 \rangle$ mm.

- $a = 8$ mm, $b = 4$ mm, $c = 3$ mm

$$K = -0,0303d^2 - 0,0554d + 0,9694 \quad (-) \quad (24)$$

- $a = 9$ mm, $b = 4$ mm, $c = 3$ mm

$$K = -0,0272 - 0,0562d + 0,9718 \quad (-) \quad (25)$$

- $a = 10$ mm, $b = 4$ mm, $c = 3$ mm

$$K = -0,0247d^2 - 0,0576d + 0,9739 \quad (-) \quad (26)$$

PŘÍLOHA B

Tab. 12-1 Souhrnný přehled vybraných veličin

Struktura	a (mm)	d (mm)	ρ_{skut} (-)	μ_{zx} (-)	ε pro měřené μ_{zx} (%)	E_{ef} (MPa)	σ_N (MPa)	W_{65} (MJ m ⁻³)	SEA_{65} (kJ kg ⁻¹)
J1A	8	0,3	0,0301	-0,459	18,0	271,7	2,37	0,403	1,671
J1B		0,35	0,0355	-0,475	15,2	327,4	2,90	0,580	2,057
J1C		0,4	0,0467	-0,523	16,3	487,0	4,44	1,154	3,107
J2A	9	0,3	0,0265	-0,861	9,9	125,7	1,34	0,242	1,147
J2B		0,35	0,0348	-0,886	12,5	426,8	3,22	0,510	1,845
J2C		0,4	0,0438	-0,885	12,5	634,2	4,51	0,865	2,484
J3A	10	0,3	0,0263	-1,137	10,1	394,7	2,56	0,225	1,077
J3B		0,35	0,0327	-1,168	9,6	576,3	3,64	0,441	1,694
J3C		0,4	0,0404	-1,079	8,5	699,4	4,64	0,816	2,540
G1	8	0,3 - 0,45	0,0437	-	-	338,8	4,27	1,162	3,344
G2	9		0,0397	-	-	386,3	3,75	0,970	3,074
G3	10		0,0377	-	-	408,8	3,22	0,763	2,545

hodnoty W_{65} a SEA_{65} stanovené pro $\varepsilon_d = 65$ %