



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ SUPERELASTICKÝCH METAMATERIÁLŮ

COMPUTATIONAL MODELING OF SUPERELASTIC METAMATERIALS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Karel Brulík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Červínek, Ph.D.

BRNO 2025



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Karel Brulík**  
Studijní program: Konstrukční inženýrství  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Červínek, Ph.D.**  
Akademický rok: 2024/25

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 diplomové práce:

## Výpočtové modelování superelastických metamateriálů

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozvoj aditivních technologií v posledních letech umožnil produkovat díly s komplexními geometriemi z celé řady netradičních materiálů. Příkladem jsou niki–titanové slitiny vyráběné technologií laser powder bed fusion, které umožňují dosáhnout efektů superelastivity nebo tvarové paměti. Právě tyto vlastnosti otevřely možnost vývoje smart meta–materiálů s morfovateľnou geometrií, které mohou být aktivované vnějšími podmínkami jako je změna působící síly nebo teploty. Funkce morfování geometrie je velmi žádanou pro aplikace v celé řadě odvětví od arteriálních stentů po vesmírný průmysl.

Typ práce: výzkumná  
Výstup práce: publikační výsledek (J, D)  
Projekt: MPO

**Cíle diplomové práce:**

Cílem práce je za využití metod výpočtového modelování stanovit závislost míry anisotropie mechanických vlastností a rozsahu pseudoelastických deformací na vnitřním geometrickém uspořádání 2D metamateriálu aditivně vyráběného ze superelastické slitiny Nitinol.

Dílčí cíle diplomové práce:

- rešeršní studie existujících struktur a vlivu jejich geometrického uspořádání na rozsah pseudoelastických deformací a míru anisotropie,
- rešeršní studie vlivu aditivní výroby na mechanické vlastnosti superelastické slitiny Nitinol,
- identifikace klíčových geometrických prvků s nejvyšším potenciálem pro ovlivnění sledovaných vlastností metamateriálu,
- tvorba parametrických výpočtových modelů mechanického zatěžování 2D metamateriálu zohledňujících superelastické chování materiálu,
- experimentální testování vybraných konfigurací metamateriálu za účelem pozorování reálných superelastických charakteristik a stanovení jejich vlivu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

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

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

**Seznam doporučené literatury:**

YAN, Zhaorui, Jia Ning ZHU, Evgenii BORISOV, Ton RIEMSLAG, Sean Paul SCOTT, Marcel HERMANS, Jovana JOVANOVA a Vera POPOVICH. Superelastic response and damping behavior of additively manufactured Nitinol architected materials. Additive Manufacturing [online]. 2023. ISSN 22148604.

GU, Xiaojun, Yinfeng CAO, Jihong ZHU, Jun WANG, Weihong ZHANG a Ziad MOUMNI. Shape optimization of SMA structures with respect to fatigue. Materials and Design [online]. 2020. ISSN 18734197.

XIAO, Yao a Dongjie JIANG. Constitutive modelling of transformation pattern in superelastic NiTi shape memory alloy under cyclic loading. International Journal of Mechanical Sciences [online]. 2020. ISSN 00207403.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Využití slitin s tvarovou pamětí v kombinaci s komplexní geometrií aditivně vyráběných metamateriálů umožňuje návrh morfovateľných segmentů schopných plynule měnit svůj tvar při zachování strukturální integrity. Ty mohou najít uplatnění například v oblasti letectví jako efektivnější náhrada konvenčních vztlakových klapek a přispět k vyšší účinnosti letu i nižší ekologické zátěži. Výhodou těchto řešení je nejen velká míra reverzibilní deformace, násobně překračující možnosti konvenčních materiálů, ale také možnost cíleného řízení směrové tuhosti prostřednictvím optimalizace vnitřní geometrie. Tato práce se zabývala analýzou vlivu vnitřního geometrického uspořádání superelastického 2D metamateriálu ze slitiny NiTi na rozsah pseudoelastických deformací a anizotropii mechanické odezvy. Získané výsledky umožnily identifikovat zásadní vliv deformačního režimu a distribuce napětí na rozsah pseudoelastických deformací. Klíčovými prvky byly velikost poloměru zaoblení a zúžené stěny, jejichž optimalizací bylo možné rozsah navýšit až o 183 %. Z pohledu anizotropní odezvy se jako klíčové opět ukázaly být velikost poloměru zaoblení a zúžené stěny, jimiž bylo možné řídit deformační režimy při jednotlivých způsobech zatěžování, a tím i míru anizotropie v rozsahu  $A = 1-7,74$ , a taktéž poloha spojů, která určovala celkový způsob přenosu namáhání.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Metamateriál, NiTi, pseudoelastické deformace, anizotropie, Laser Powder Bed Fusion

## ABSTRACT

The use of shape memory alloys in combination with the complex geometry of additively manufactured metamaterials enables the design of morphable segments capable of continuously changing their shape while maintaining structural integrity. These may find applications, e.g. in the field of aviation as a more efficient replacement for conventional flaps and contribute to higher flight efficiency and lower environmental burden. The advantage of these solutions is not only the high degree of reversible deformation, exceeding the capabilities of conventional materials by many times, but also the possibility of targeted control of directional stiffness through optimization of the internal geometry. In this thesis, the effect of the internal geometry of a superelastic 2D NiTi alloy metamaterial on the extent of pseudoelastic deformation and the anisotropy of the mechanical response was analyzed. The obtained results allowed to identify the major influence of the deformation mode and stress distribution on the extent of pseudoelastic deformations. The key elements proved to be the size of the fillet radius and the tapered walls, which could be optimised to increase the extent by up to 183 %. In terms of the anisotropic response, the size of the fillet radius and the tapered walls were again found to be key elements, which allowed to control the deformation modes under the different loading conditions and thus the degree of anisotropy in the range  $A = 1-7.74$ , as well as the position of the joints, which determined the overall load transfer.

## KEYWORDS

Metamaterial, NiTi, pseudoelastic deformation, anisotropy, Laser Powder Bed Fusion



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BRULÍK, Karel. *Výpočtové modelování superelastických metamateriálů*. Brno, 2025, 107 s. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/162452>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ondřej Červinek.



## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl upřímně poděkovat všem, kteří mi byli podporou nejen během práce na této diplomové práci, ale také během celého studia. Především bych rád poděkoval Ing. Ondřeji Červinkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a především čas, který věnoval konzultacím a pomoci s řešeným tématem. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Anetě Zatočilové, Ph.D. za pomoc s technologií DIC. V neposlední řadě děkuji své rodině, přátelům a přítelkyni, kteří mi byli nepostradatelnou oporou během celého studia.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci *Výpočtové modelování superelastických metamateriálů* jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Ondřeje Červinka, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

V Brně, dne 23. května 2025

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>15</b>
2.1	Rešeršní metody	15
2.2	Kritická rešerše	17
2.2.1	Slitiny s tvarovou pamětí	17
2.2.2	Superelastické materiálové modely pro výpočtové modelování	19
2.2.3	Vliv aditivní výroby na termomechanické vlastnosti NiTi slitin	22
2.2.4	Geometrické aspekty návrhu superelastických metamateriálů	24
2.2.5	Návrh metamateriálu s kontrolovanou anizotropií	27
2.2.6	Faktory ovlivňující anizotropii mechanických vlastností	29
2.3	Shrnutí kritické rešerše	30
2.3.1	Diskuze materiálových modelů	30
2.3.2	Diskuze vlivu aditivní výroby	31
2.3.3	Diskuze geometrických a topologických faktorů	31
2.3.4	Souhrn diskutované problematiky	32
2.4	Mezera v poznání	33
<b>3</b>	<b>CÍL PRÁCE</b>	<b>34</b>
3.1	Výzkumné otázky	34
3.2	Hypotézy	35
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METODY</b>	<b>37</b>
4.1	Metodika	37
4.2	Přehled výzkumné strategie	38
4.3	Kritéria geometrie	38
4.4	Testované predikce	39
4.5	Výpočtové modelování	40
4.5.1	Fáze I – Vliv architektury elementární buňky	41
4.5.2	Fáze II – Analýza metamateriálů	43
4.6	Experimentální testování	44
4.6.1	Testovací vzorky	44
4.6.2	Výroba	45
4.6.3	Kvazistatická tlaková zkouška	47
4.7	Verifikační analýza	48

<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>50</b>
5.1	Výsledky výpočtového modelování	50
5.1.1	Fáze I – Vliv architektury elementární buňky	50
5.1.2	Fáze II – Analýza metamateriálů	66
5.2	Výsledky experimentálního testování	69
5.2.1	Vyrobené vzorky	69
5.2.2	Fáze I – Vliv architektury elementární buňky	70
5.2.3	Fáze II – Analýza metamateriálů	77
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>80</b>
6.1	Interpretace výsledků	80
6.1.1	Rozsah pseudoelastických deformací	80
6.1.2	Anizotropie mechanických vlastností	85
6.1.3	Materiálové vlastnosti	87
6.2	Verifikace hypotéz	88
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>89</b>
<b>8</b>	<b>VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV</b>	<b>90</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>91</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>96</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>98</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>102</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>103</b>

# 1 ÚVOD

Zvyšující se nároky na efektivitu moderních konstrukčních systémů a technologií přinášejí motivaci pro výzkum nových řešení, která by mohla nahradit konvenční mechanické systémy. Jednou z perspektivních cest by mohlo být využití morfovateľných metamateriálů vyrobených ze superelastických slitin, jako je například nikl-titanová slitina Nitinol, které umožňují realizovat reverzibilní tvarové změny bez potřeby složitých mechanismů. Tyto metamateriály mohou být využity například jako náhrada konvenčních vztlakových klapek letadel, což by mohlo vést ke snížení jejich hmotnosti, efektivnější změně tvaru křídla, a tím i k vyšší efektivitě letu a nižší ekologické zátěži.

Zásadní výhodou aditivně vyráběných metamateriálů je jejich vysoká geometrická flexibilita, která umožňuje navrhovat metamateriály s přesně řízenou mechanickou odezvou. Toho lze využít v kombinaci se slitinami s tvarovou pamětí, které vykazují specifickou mechanickou odezvu – tzv. pseudoelastické chování – které je důsledkem fázové transformace mezi austenitickou a martenzitickou strukturou. Výsledkem je schopnost materiálu absorbovat a uvolnit energii ve formě mechanické deformace bez trvalých změn tvaru. V kombinaci s vhodně optimalizovanou geometrií tak lze navrhovat metamateriály s vlastnostmi, které výrazně překračují možnosti konvenčních materiálů.

Tato diplomová práce se zabývá výpočtovým modelováním 2D metamateriálů ze superelastické slitiny NiTi. Cílem je analyzovat, jakým způsobem jednotlivé prvky jejich vnitřní geometrie ovlivňují mechanickou odezvu metamateriálu, a jaký je jejich vliv na dosažitelný rozsah pseudoelastických deformací a anizotropii mechanické odezvy. Práce přináší poznatky v podobě detailního popisu vztahů mezi vnitřním geometrickým uspořádáním superelastického metamateriálu a jeho mechanickou odezvou, které lze využít pro efektivní návrh metamateriálů s přesně řízenými vlastnostmi pro širokou škálu specifických aplikací.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Rešeršní metody

Cílem kritické rešerše bylo zmapovat aktuální poznatky v oblasti výpočtového modelování slitin s tvarovou pamětí, vliv procesních parametrů aditivní výroby na jejich superelastické vlastnosti a identifikovat klíčové geometrické faktory ovlivňující rozsah pseudoelastických (PE) deformací a anizotropii mechanických vlastností.

Za účelem zmapování zkoumané oblasti byly sestaveny čtyři výzkumné otázky, které umožnily získat zásadní informace potřebné k návrhu metamateriálu s využitím metod výpočtového modelování.

**1) *Jaké jsou dostupné materiálové modely pro výpočtové modelování napěťově-deformačního chování slitin s tvarovou pamětí?***

Přehled dostupných materiálových modelů, jejich omezení a možností implementace do softwarových nástrojů pro numerické simulace poskytne podklady pro výběr vhodného modelu a také pro vymezení fenoménů superelastického chování, které bude nutné zkoumat pomocí experimentálního testování.

**2) *Jaký je vliv procesních parametrů aditivní výroby na materiálové vlastnosti nikl-titanových slitin a jejich superelastické chování?***

Aditivní výroba může zásadně ovlivňovat mechanické vlastnosti nikl-titanových slitin. Je proto nutné nalézt vhodné procesní parametry výroby technologií L-PBF a vymežit interval použitelných tlouštěk stěn tak, aby bylo dosaženo co nejlepších mechanických a superelastických vlastností.

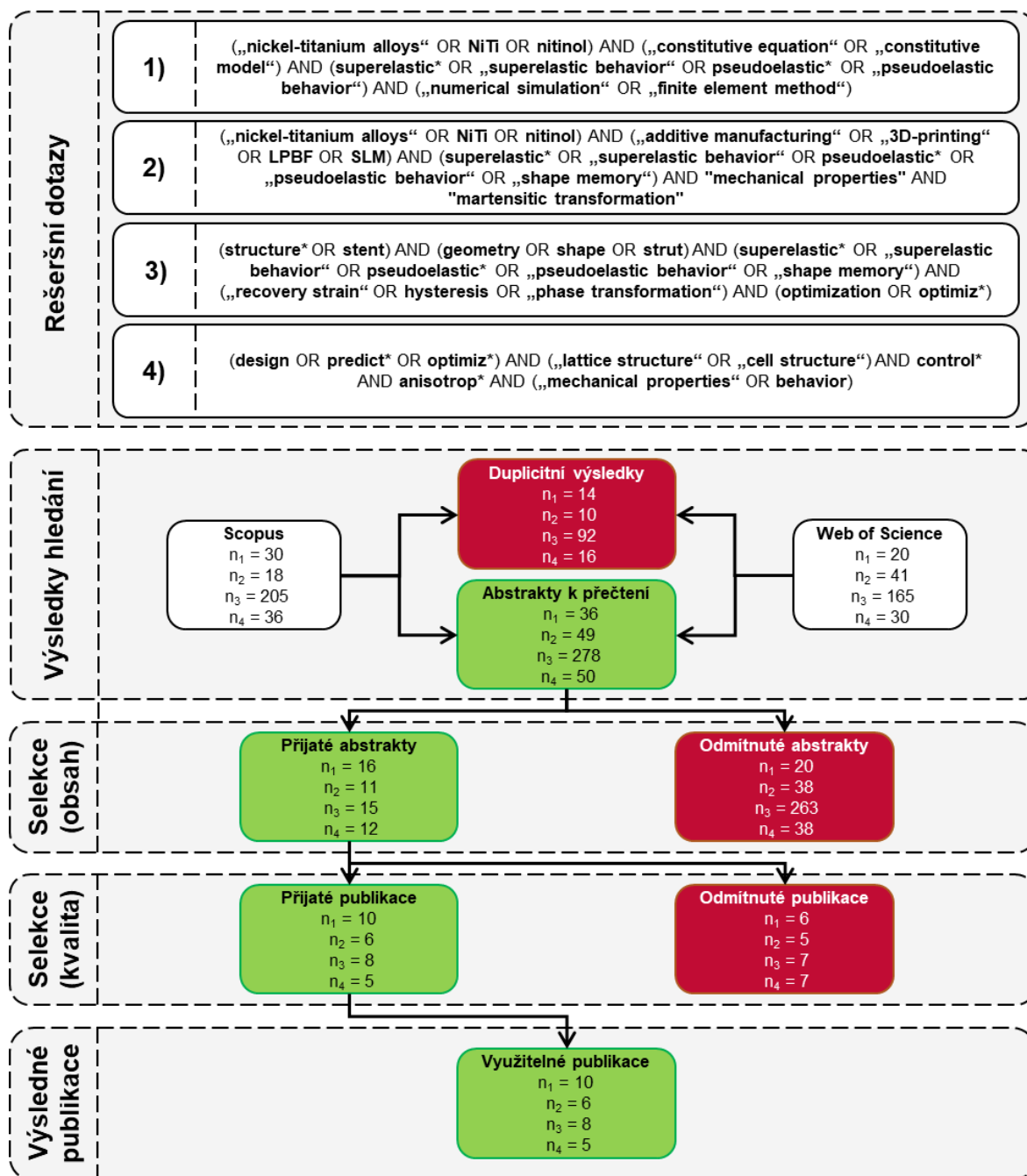
**3) *Jakým způsobem ovlivňuje geometrie metamateriálu superelastické chování a jak lze geometrii optimalizovat pro dosažení vysokých pseudoelastických deformací?***

Analýza vlivu geometrických faktorů na superelastické chování umožní identifikovat klíčové geometrické uzly a parametry, a povede tak k cílenějšímu návrhu metamateriálu.

**4) *Jaké jsou metody pro návrh struktur s kontrolovanou anizotropií mechanických vlastností?***

Využití metod návrhu geometrie s kontrolovanou anizotropií umožní vytvoření metamateriálu s izotropními mechanickými vlastnostmi.

Na základě výše uvedených výzkumných otázek byly sestaveny rešeršní dotazy, které byly využity při vyhledávání relevantní literatury v databázích *Scopus*, *Web of Science* a *Google Scholar*. Získané publikace byly následně vyhodnoceny podle předem definovaných kritérií relevance<sup>1</sup>. V průběhu rešerše byly navíc identifikovány další zdroje, které tematicky rozšiřují nebo doplňují výchozí literaturu. Proces výběru publikací je znázorněn pomocí PRISMA diagramu na Obr. 2-1.



Obr. 2-1 PRISMA diagram selektce publikací

<sup>1</sup> Relevantnost tématu, abstrakt a scientometrické údaje (impakt faktor periodika, h-index autora a počet citací)

## 2.2 Kritická rešerše

### 2.2.1 Slitiny s tvarovou pamětí

Slitiny s tvarovou pamětí (*Shape Memory Alloys*, SMA) představují specifickou skupinu tzv. smart materiálů schopných vrátit se do původního tvaru po deformaci. Tento jev je umožněn fázovými transformacemi v tuhém stavu – *martenziticko-austenitickou transformací*, která je iniciována změnou teploty, aplikací mechanického napětí nebo působením elektromagnetického pole [1, 2].

Nejvýznamnějšími zástupci jsou slitiny na bázi niklu a titanu (*NiTi*), mědi (*Cu-Zn*, *Cu-Al-Mn*) a železa (*Fe-Ni-Co-Al*, *Fe-Mn-Al-Ni*). Klíčovými mechanismy těchto slitin jsou *efekt tvarové paměti* (*Shape Memory Effect*, SME) a *superelasticita* (SE), označovaná též jako pseudoelasticita.

#### Efekt tvarové paměti

Efekt tvarové paměti se projevuje při zatěžování při teplotě nižší, než je teplota počátku austenitické transformace ( $A_s$ ). V tomto stavu je materiál tvořen martenzitickou fází s deformačním dvojčatěním [3]. Při mechanickém zatížení dochází k odstraňování dvojčatění a deformaci materiálu. Po odlehčení si materiál zachovává martenzitickou strukturu (viz Obr. 2-2a). Následným ohřevem nad teplotu ukončení austenitické transformace ( $A_f$ ) dochází k fázové transformaci na austenit a zotavení původního tvaru. V posledním kroku se při ochlazování vnitřní struktura transformuje zpět do martenzitické fáze s deformačním dvojčatěním, a to bez další deformace.

#### Superelasticita

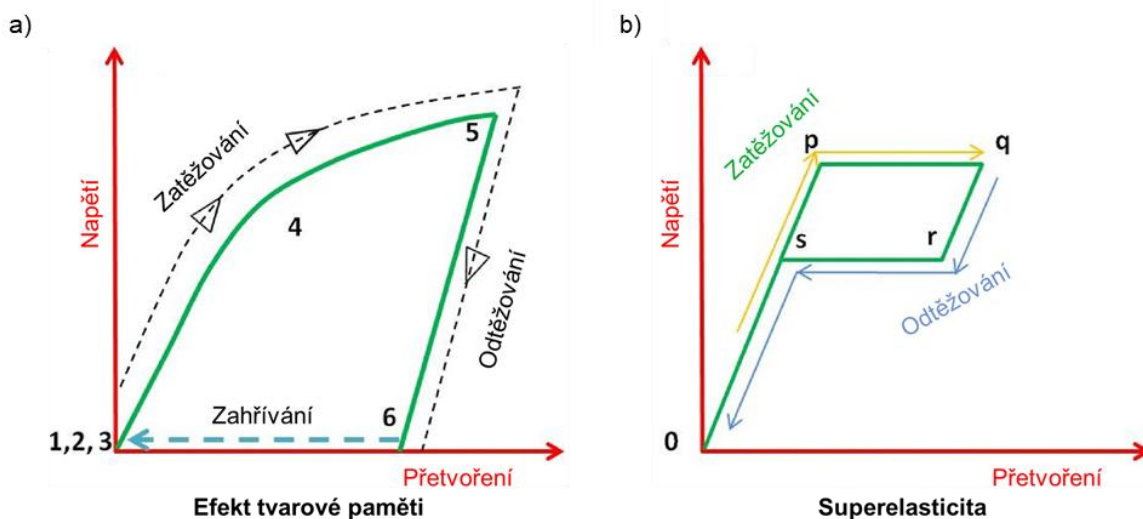
Superelastické chování se projevuje při zatěžování nad teplotou  $A_f$ , kdy je materiál v plně austenitické fázi [3]. Působením mechanického zatížení dochází k napětím indukované transformaci austenitu na martenzit, který je však při těchto teplotách termodynamicky nestabilní. Po odlehčení dochází k jeho okamžité zpětné transformaci na austenit, což je doprovázeno zotavením materiálu do původního tvaru (viz Obr. 2-2b) [4]. Pro dosažení úplné superelasticity musí být splněna dvě kritéria:

$$T > A_f \quad (1)$$

$$\sigma^{AY} > \sigma^{SIM} \quad (2)$$

kde  $T$  je teplota okolního prostředí,  $A_f$  je teplota ukončení zpětné transformace martenzitu na austenit,  $\sigma^{AY}$  je mez kluzu austenitu a  $\sigma^{SIM}$  je kritické napětí pro spuštění martenzitické transformace. Pokud není splněno ani jedno z těchto kritérií, superelasticita se neprojevuje.

Pro plné zotavení deformace současně nesmí dojít k překročení meze kluzu martenzitické fáze  $\sigma^{MY}$ . Po překročení tohoto napětí dochází ke vzniku plastických deformací a materiál ztrácí superelastické vlastnosti.



Obr. 2-2 Efekt tvarové paměti a superelasticitu u SMA [1]

### Nikl-titanové slitiny

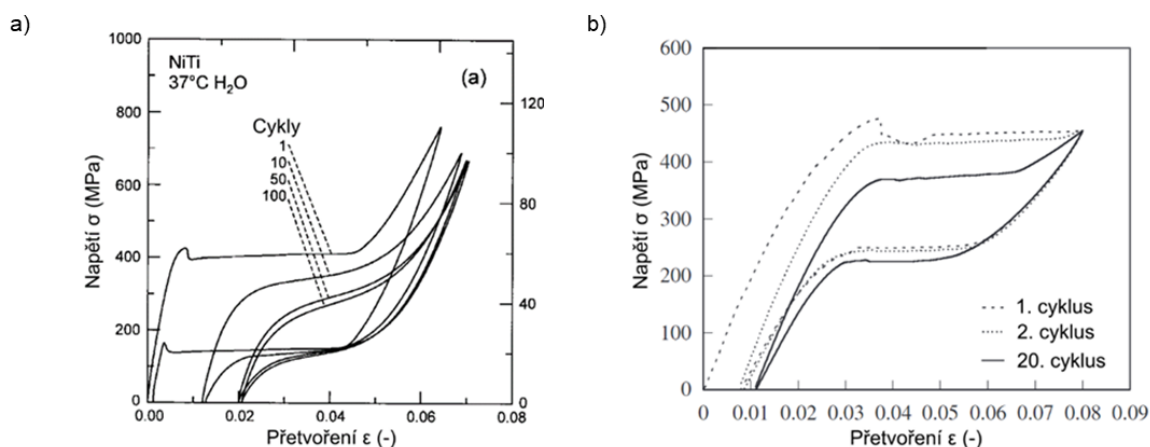
Slitina NiTi (obchodně označovaná jako *Nitinol*), vyvinutá v roce 1965 v Naval Ordnance Laboratory, obsahuje typicky 50-52 hm. % Ni a zbylý podíl Ti a příměsi dalších prvků [5]. Vyznačuje se vynikající houževnatostí, vysokou pevností v tahu a biokompatibilitou, což ji činí jednou z nejpoužívanějších SMA v technických i biomedicínských aplikacích.

Zásadním omezením je však velmi nízká obrobitelnost, která vede k vysokému opotřebení nástrojů při konvenčním obrábění [6, 7]. Naopak technologie aditivní výroby mohou představovat vhodnější alternativu, a to i přes vysokou citlivost mechanických a termomechanických vlastností na výrobní podmínky. Pro dosažení požadovaných vlastností je proto nezbytná optimalizace procesních parametrů a následného tepelného zpracování [5].

### Vliv historie zatěžování na napěťově-deformační charakteristiku nitinolu

Cyklické zatěžování výrazně ovlivňuje mechanickou odezvu slitiny NiTi, a to nejvýrazněji v počátečních cyklech. Během nich dochází k akumulaci zbytkové deformace což vede ke snížení schopnosti materiálu zotavit se zpět do původního stavu [8]. S rostoucím počtem zatěžovacích cyklů akumulace zbytkové deformace postupně saturuje. Po dosažení stabilního stavu (tzv. *elastic shakedown*) se zbytková deformace již výrazně nemění a materiál vykazuje vyšší odolnost vůči cyklické únavě.

Elastic shakedown a saturace materiálu jsou ovlivněny jeho chemickým složením, procesními parametry výroby, tepelným zpracováním a vnějšími podmínkami. Vliv těchto faktorů je patrný na srovnání výsledků publikací [9] a [10]. *McKelvey a kol.* [9] testovali tepelně zpracovaný Nitinol s obsahem 55 hm. % Ni ve vodní lázni při teplotě 37 °C. Saturace materiálu byla dosažena po 60 cyklech, kdy se zbytková deformace ustálila na hodnotě 2,1 % (viz Obr. 2-3a). Zatímco *Murasawa a kol.* [10] testovali tepelně zpracovaný Nitinol s obsahem 50,5 at. % Ni při teplotě 60 °C. V tomto případě došlo k saturaci materiálu již po 20 cyklech, kdy hodnota zbytkové deformace dosáhla 1,1 % (viz Obr. 2-3b).



Obr. 2-3 Vliv historie zatěžování na napětově-deformační charakteristiku: a) McKelvey a kol. [9]; b) Murasawa a kol. [10].

## 2.2.2 Superelastické materiálové modely pro výpočtové modelování

Aby bylo možné numericky predikovat chování metamateriálu při zatížení, je nutné porozumět materiálovým modelům vhodným pro simulaci superelastických slitin. Následující část se proto zaměřuje na přehled dostupných modelů, jejich klasifikaci, silné i slabé stránky a míru použitelnosti v rámci této práce.

Numerické modelování chování slitin s tvarovou pamětí vyžaduje speciální konstitutivní modely, které zahrnují nelineární fázové transformace, závislost na historii zatěžování či rozdílnou odezvu materiálu při tahovém a tlakovém zatěžování. Existující modely popsali ve svém přehledovém článku *Cisse a kol.* [11].

Modely lze klasifikovat dle měřítka popisu [11]:

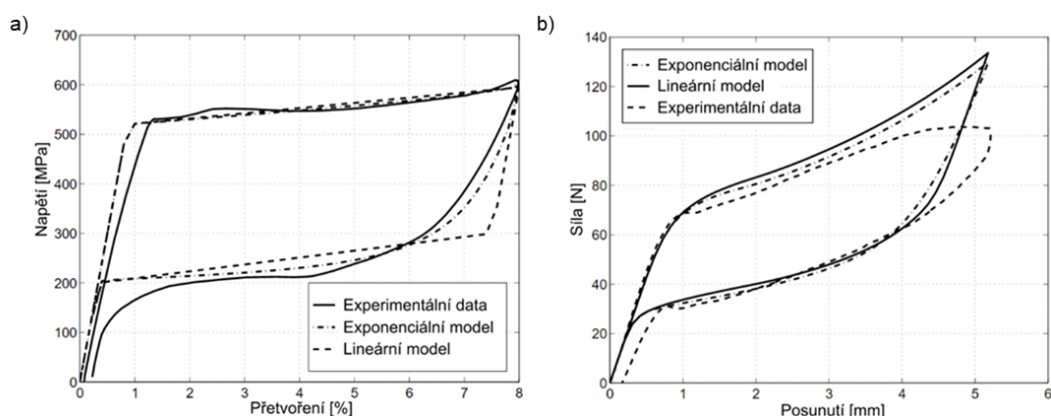
- *Mikroskopické termodynamické modely* – sledují fázové transformace a mikrostrukturální změny (např. dvojčatění martenzitu) na úrovni mřížky.
- *Mikro-makro modely* – zohledňují chování jednotlivých zrn nebo krystalografických rovin.

- *Makroskopické (fenomenologické) modely* – popisují materiál jako kontinuum s využitím napěťově-deformačních vztahů a transformací řízených jednoduchými kritérii.

Vzhledem k popisu podle napěťově-deformačních vztahů jsou právě fenomenologické modely vhodné pro analýzy metodou konečných prvků (MKP). Jejich přehledu se proto věnuje následující část.

#### Přehled fenomenologických modelů

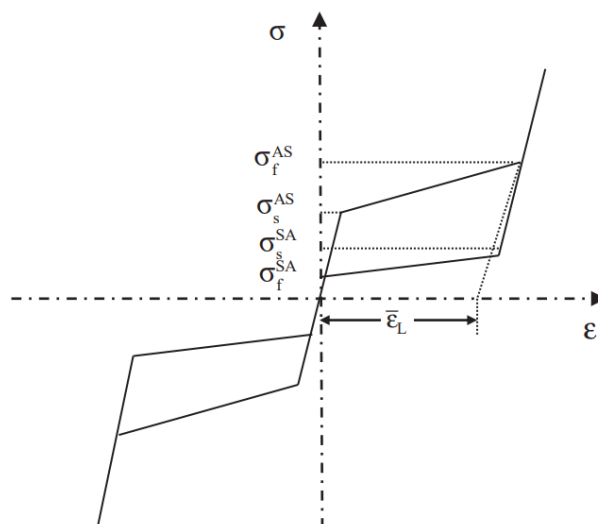
*Auricchio a kol.* [12] představili dva modely pro jednoosé a trojrozměrné zatěžování (viz Obr. 2-4) na bázi zobecněné plasticity s vnitřními proměnnými. Modely zohledňují superelastické chování SMA, rozdílnou odezvu materiálu při tahovém a tlakovém zatěžování a fázové transformace mezi austenitem, jednovariantním martenzitem a jeho reorientací. Zjednodušení zahrnují předpoklad izotropního chování a pouze jednu zohledňovanou variantu martenzitu.



Obr. 2-4 Auricchiův materiálový model: a) Namáhání trojbodým ohybem; b) Namáhání jednoosým tahem [12]

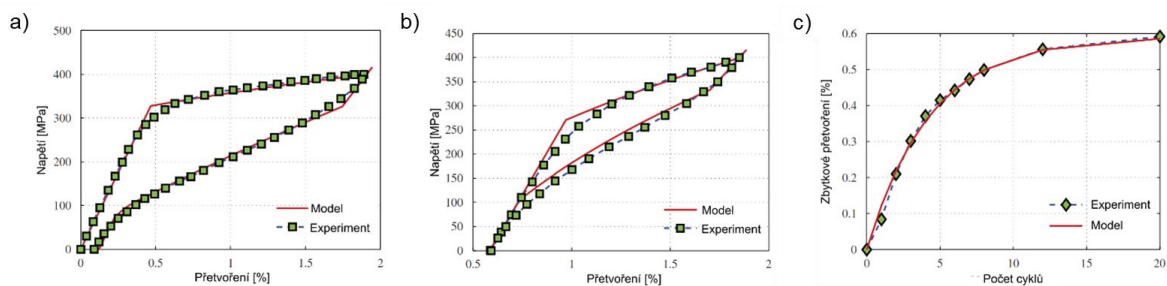
*Souza a kol.* [13] vyvinuli fenomenologický model pro numerické simulace materiálů s napětím indukovanou fázovou transformací, založený na využití Helmholtzovy volné energie. Jako stavové proměnné jsou poté použity tenzor lineárního přetvoření, tenzor deviatorického přetvoření, transformační přetvoření a absolutní teplota. Zjednodušující předpoklady jsou v tomto případě podmínka přípustnosti termodynamických sil a omezení pro fázové přeměny.

Tento model později převzali a modifikovali *Auricchio a Petrini* [14]. V původním modelu nebyly rovnice transformačního napětí definovány pro případ, kdy je toto napětí rovno nule ( $|e^{tr}| = 0$ ) a tento případ byl řešen zvlášť pomocí odlišných vztahů. Tato modifikace tedy umožnila kontinuální popis transformačního napětí v celém definičním oboru [15]. Jeho výhodou je jednoduchost z pohledu mechanických předpokladů, relativně přesný popis trojrozměrného zatěžování a robustnost. Největší předností je jeho snadná kalibrace, kdy je potřeba definovat pouze osm materiálových parametrů, a to modul pružnosti v tahu plně austenitické fáze  $E_A$ , modul pružnosti v tahu plně martenzitické fáze  $E_S$ , parametr určující rozdíl odezvy materiálu v tahu a tlaku  $\alpha$ , transformační přetvoření  $e_L$ , počáteční hodnota napětí pro dopřednou fázovou transformaci  $\sigma_{SAS}$ , koncová hodnota napětí pro dopřednou fázovou transformaci  $\sigma_{FAS}$ , počáteční hodnota napětí pro zpětnou fázovou transformaci  $\sigma_{SSA}$  a koncová hodnota napětí pro zpětnou fázovou transformaci  $\sigma_{FSA}$ . V literatuře bývá označován jako *Souza-Auricchio model*. Z tohoto modelu vychází materiálové modely se superelastickým chováním běžně využívané v komerčních výpočetních softwarech [15].



Obr. 2-5 Napětově-deformační charakteristika dle Souza-Auricchio modelu [15]

*Zaki a Mounni* [16] navrhli model pro cyklické termomechanické zatěžování, který jako jeden z mála zohledňuje akumulaci zbytkového přetvoření (viz Obr. 2-6). Kromě napětí a transformačního přetvoření pracuje i s vnitřním napětím a podílem martenzitu. Vyšší přesnost modelu je však negativně vyvážena jeho značně komplikovanou kalibrací, kdy je nutné definovat 23 vstupních parametrů. Tento model dále rozšířili *Zaki a kol.* [17] o asymetrii superelastického chování při tahovém a tlakovém zatěžování. Tyto modely jsou v literatuře označovány jako *Z-M modely*.



Obr. 2-6 Z-M model – porovnání experimentálních a numerických výsledků při tahovém zatěžování: a) První cyklus; b) Dvacátý cyklus; c) Vývoj zbytkového přetvoření [16]

Většina komerčních výpočetních softwarů využívá zjednodušené fenomenologické modely, které aproximují komplexní chování materiálu prostřednictvím parametrů odvozených například z experimentálních dat. Tyto modely často nezohledňují některé klíčové fenomény superelastického chování jako je například vliv historie zatěžování a akumulace zbytkové deformace. Pokročilejší modely, které tyto fenomény zahrnují jsou výpočetně náročné a často nejsou přímo dostupné ve standartních softwarových modulech.

Výběr vhodného materiálového modelu pro simulaci superelastického chování slitiny NiTi závisí na požadavcích konkrétní aplikace. Pro pevnostní analýzy pomocí metody konečných prvků se jako nejvhodnější jeví fenomenologické modely, které umožňují efektivní kalibraci a zachovávají realistický popis fázových transformací. *Souza-Auricchio* model představuje optimální kompromis mezi složitostí, výpočetní efektivitou a přesností, zatímco pokročilejší modely jako *Z-M* jsou vhodné pro detailní analýzy chování při opakovaném zatěžování, avšak za cenu jejich složité kalibrace.

### 2.2.3 Vliv aditivní výroby na termomechanické vlastnosti NiTi slitin

Aditivní výroba NiTi slitin umožňuje překonat limity tradičního obrábění, ale zároveň přináší nové výzvy související s vysokou citlivostí výsledných vlastností na procesní parametry. Zejména poměr energie, skenovací strategie, chlazení a tloušťka stěn významně ovlivňují fázové transformace, porozitu i superelastické chování.

#### Vliv procesních parametrů

Volba vhodných procesních parametrů při aditivní výrobě nikel-titanových slitin je zásadně ovlivněna chemickým složením použitého materiálu, především poměrem Ni a Ti. Z tohoto důvodu byly v následující části zohledněny pouze studie zaměřené na slitiny s obdobným chemickým složením jako materiál použitý v této práci.

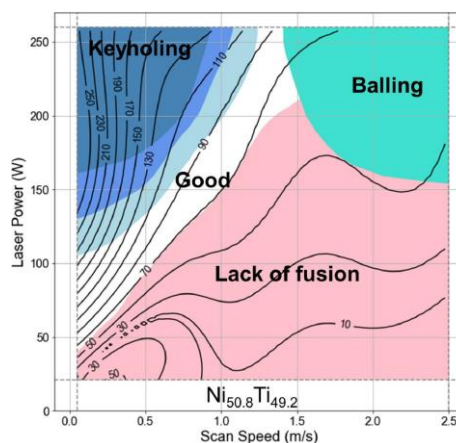
Při aditivní výrobě NiTi slitin technologií L-PBF dochází primárně k výskytu dvou degradačních mechanismů [18]:

- Růst precipitátů  $\text{Ni}_4\text{Ti}_3$  při nadměrně vysoké teplotě substrátu, který snižuje obsah niklu a zvyšuje transformační teplotu austenitické fázové přeměny.
- Odpařování Ni, způsobené jeho nižší entalpií a bodem varu oproti titanu, rovněž vedoucí k nekontrolovatelnému nárůstu transformačních teplot.

Optimalizací procesních parametrů s cílem minimalizace uvedených jevů se zabývali *Tareq a kol.* [18]. Jejich studie se zaměřila na tisk na titanový substrát při nízké energetické hustotě laseru ( $ED = 35 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$ ) za účelem minimalizace odpařování Ni. V průběhu tisku prvních vrstev nicméně nízká energetická hustota vedla k delaminaci prvních vrstev od substrátu, a proto musela být pro první čtyři vrstvy navýšena na  $148 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$ . Chemická analýza tištěných dílů potvrdila, že snížení energetické hustoty redukuje odpařování Ni, kdy díly měly téměř totožné chemické složení jako použitý prášek. Výsledné díly vykazovaly superelastické chování se zotavením 73 % v prvním cyklu, přičemž přírůstek zbytkové deformace postupně klesal, kdy při desátém cyklu zatěžování bylo pozorováno zotavení deformace na úrovni 92 %, a to při zatěžování do přetvoření  $\varepsilon = 0,0804$ .

S materiálem o stejném chemickém složení pracovali také *Wang a kol.* [19], kteří dosáhli optimálních mechanických vlastností a nejmenší porozity při  $ED = 41\text{-}55 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$  v kombinaci s vysokou skenovací rychlostí ( $900\text{-}1200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Taktéž byla prokázána pozitivní korelace mezi vysokou skenovací rychlostí a redukcí odpařování Ni, což autoři přisuzují menší velikosti tavné lázně.

Vhodnost kombinace nižší energetické hustoty a vysokých skenovacích rychlostí potvrdili také *Xue a kol.* [20, 21], kteří dosáhli nejvyšší kvality tisku při energetické hustotě  $55\text{-}70 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$ . Při nižších hodnotách energetické hustoty docházelo k defektům vlivem nedostatečného natavení (*lack of fusion*), zatímco při příliš vysokých hodnotách byla pozorována tvorba nadměrně hlubokých tavných lázní (*keyholing*) (viz Obr. 2-7).



Obr. 2-7 Závislost kvality výroby na procesních parametrech; isočáry značí hodnotu hatch distance ( $\mu\text{m}$ ) [21]

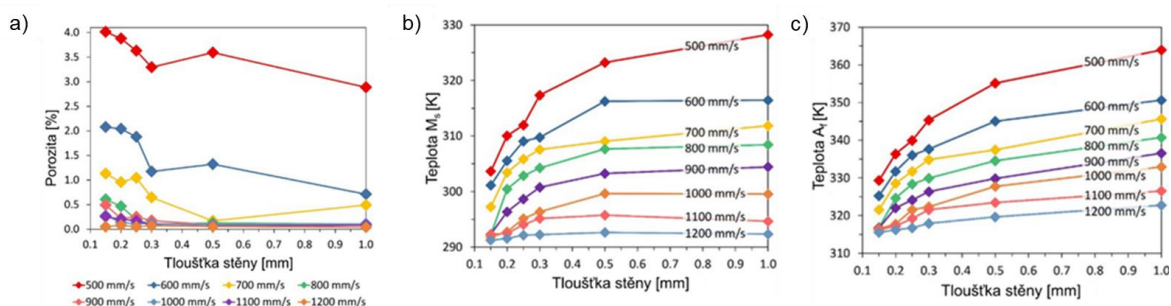
## Vliv tloušťky stěn

Geometrie dílu, zejména průřez stěn, má významný vliv na kvalitu tisku a výsledné vlastnosti. V případě 2D metamateriálů je průřez stěny jasně definován obdélníkovým tvarem. Následující přehled se proto bude věnovat primárně vlivu tloušťky stěn.

Jiang a kol. [22] a Farjam a kol. [23] posuzovali vliv tloušťky stěn na výsledné mechanické vlastnosti materiálu. Jejich závěry prokázaly, že s klesající tloušťkou stěny rostla vnitřní porozita materiálu (viz Obr. 2-8a) a výskyt vnitřních vad, v důsledku čehož docházelo ke zhoršení mechanických vlastností. To bylo způsobeno tím, že v případě tenkých stěn byla disipace tepla omezena pouze do jednoho směru, což vedlo ke vzniku hlubší tavné lázně způsobující porozitu.

U tlouštěk stěn v rozmezí 0,5-1 mm byla pozorována pouze mírná degradace mechanických vlastností, zatímco v případě nižších hodnot již docházelo k jejímu výraznému nárůstu. Vzorek s nejnižší tloušťkou stěny vykazoval také nejvyšší hodnoty kritického napětí<sup>2</sup>. Zhoršení mechanických vlastností bylo pozorováno také u tlouštěk stěn větších než 2 mm, což je přisuzováno zvýšené akumulaci tepla.

Mimo to má tloušťka stěn vliv také na transformační teploty (viz Obr. 2-8b,c). U vzorků s tloušťkou 0,5-1 mm byly pozorovány nižší transformační teploty  $M_s$  a  $A_f$ , zatímco u tloušťky 2 mm došlo ke zvýšení o přibližně 5 °C [22]. Tento efekt byl přisuzován vlivu odpařování Ni, kdy v případě tenkých stěn docházelo k opětovnému natavení pouze malé plochy a k odpařování Ni docházelo v menší míře.



Obr. 2-8 Vliv tloušťky stěny: a) Vliv na porozitu; b) Vliv na teplotu  $M_s$ ; c) Vliv na teplotu  $A_f$  [22]

## 2.2.4 Geometrické aspekty návrhu superelastických metamateriálů

Vzhledem k omezenému množství studií věnujících se mřížkovým metamateriálům ze slitin s tvarovou pamětí pro technické aplikace, byly při rešerši zohledněny poznatky z oblasti koronárních stentů, kde jsou SMA již běžně využívány.

<sup>2</sup> Kritické napětí označuje napětí, při kterém začne docházet k reorientaci martenzitu z původní varianty tvořené dvojčatěním na variantu bez dvojčatění [23].

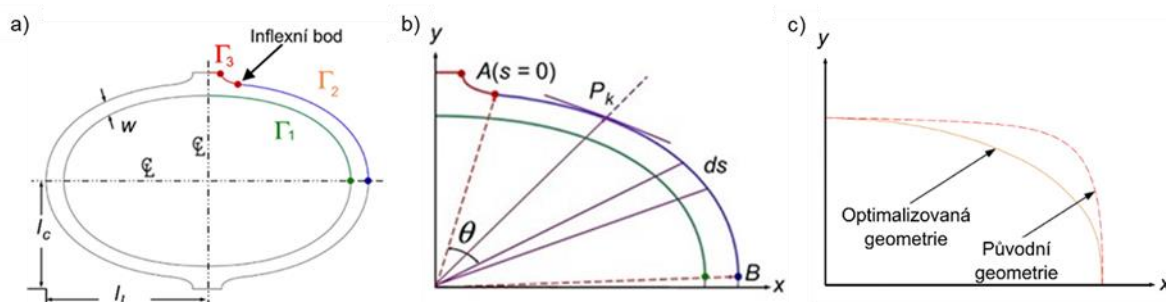
## Koronární stenty jako referenční geometrie

Koronární stenty představují jemně strukturované válcové mřížky využívané v biomedicínských aplikacích jako minimálně invazivní léčba ucpaných cév [24, 25]. Jejich geometrie musí odolávat cyklickému zatěžování (systolicko-diastolické pulzy) a minimalizovat koncentrace napětí, které by mohly vést k únavovému selhání. Lze je rozdělit do dvou základních skupin, a to konvenční stenty, které se po zavedení do cévy roztahují pomocí nafouknutí balónku a jsou vyrobeny nejčastěji z nerezové oceli, a stenty vyráběné ze SMA, které se po zavedení do cévy roztahují vlivem tvarové paměti (tzv. *self-expanding*), a na které budou zaměřeny následující kapitoly.

V biomedicínských aplikacích mohou jakákoliv mechanická selhání způsobovat fatální následky, a proto je geometrie stentů zpravidla velmi odolná vůči únavovým porušením a optimalizovaná pro dlouhou životnost. Díky tomu mohou tyto poznatky přinést nové přístupy k optimalizaci geometrie metamateriálů také pro technické aplikace.

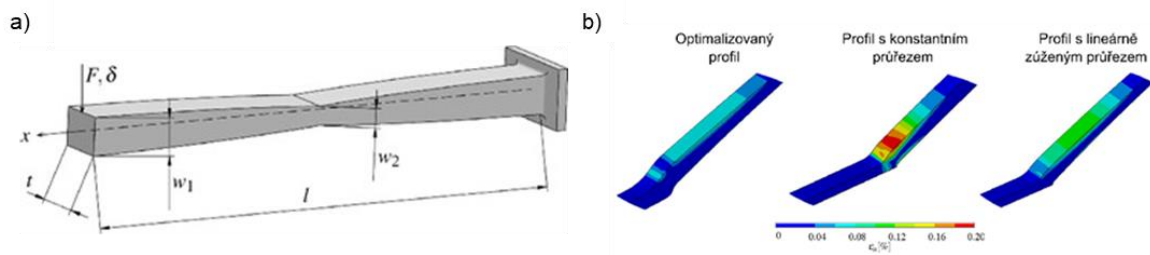
### Geometrie stěn koronárních stentů

Studie [25] ukázala, že klíčovým prvkem pro zvýšení únavové pevnosti je využití křivek s velkým poloměrem křivosti a jejich vzájemná kontinuita s křivkovou návazností G2 (viz Obr. 2-9a). Optimalizace geometrie s využitím těchto principů vedla ke zvýšení faktoru bezpečnosti vůči únavě o 69,1 % oproti původní geometrii (viz Obr. 2-9c).



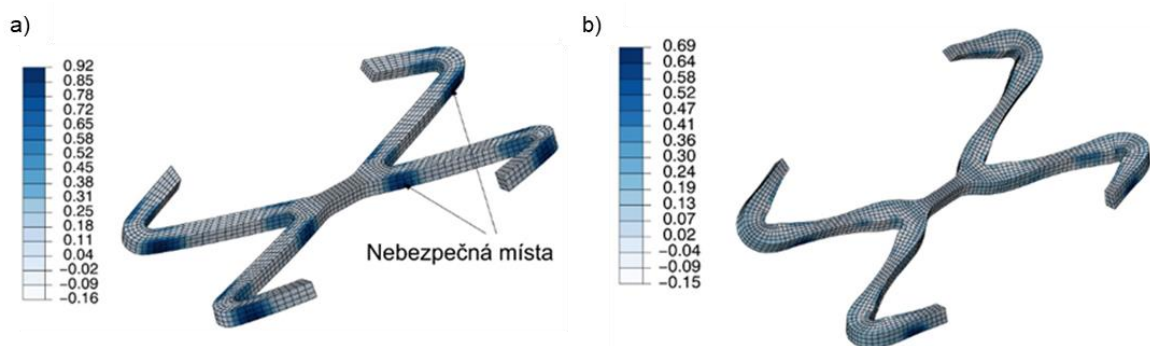
Obr. 2-9 Optimalizovaná geometrie: a) elementární buňka; b) parametry pro návaznost G2; c) porovnání výchozího a optimalizovaného tvaru [24]

Alaimo a kol. [25] optimalizovali průřez prutů stentu využitím proměnné tloušťky stěn. Zúžením šířky středu prutu o 35-50 % oproti nominální tloušťce dosáhli výrazného snížení špičkového napětí a zvýšení únavové pevnosti až o 240 % při zachování ostatních mechanických vlastností. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při využití parabolického průběhu zúžení po délce prutu (viz Obr. 2-10).



Obr. 2-10 Zúžený profil prutu: a) Geometrie parabolického profilu; b) Průběh cyklického přetvoření [25]

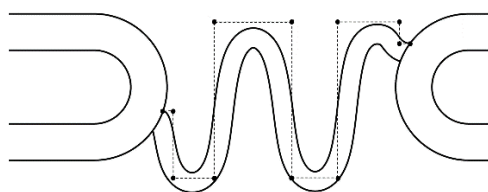
Gu a kol. [26] optimalizovali geometrii celého segmentu stentu, kdy prvotní analýzy ukázaly, že kritickými místy jsou především části namáhané ohybem a spoje segmentů. Také zde byl prokázán pozitivní vliv proměnné tloušťky prutů, kdy oproti prutům s konstantním průřezem došlo ke snížení vysoko-cyklového únavového faktoru o 25 % a výrazné eliminaci kritických míst (viz Obr. 2-11).



Obr. 2-11 Porovnání hodnot faktoru bezpečnosti vůči únavovému porušení: a) Původní segment; b) Optimalizovaný segment [26]

### Spoje elementárních buněk koronárních stentů

Významnou roli v únavové pevnosti stentů hraje také konstrukce spojů jednotlivých segmentů, které mohou působit jako výrazné koncentrátoři napětí. Běžné řešení přímým napojením segmentů zvyšuje tuhost struktur a způsobuje koncentraci napětí. Vhodnějším řešením se ukazují být takzvané *n-shaped* spoje (viz Obr. 2-12) [27]. Toto řešení funguje jako ohybově pružný článek mezi segmenty, čímž výrazně zvyšuje flexibilitu spoje a poskytuje větší prostor pro pružnou deformaci. Přidání tohoto flexibilního prvku snižuje nároky na potřebnou míru deformace samotného segmentu, což vede k jeho menším přetvořením. Z pohledu geometrie se ukazuje být vhodné použití delších a užších prutů spoje v kombinaci s širšími pruty segmentů [27, 28].



Obr. 2-12 N-shaped spoj elementárních buněk [27]

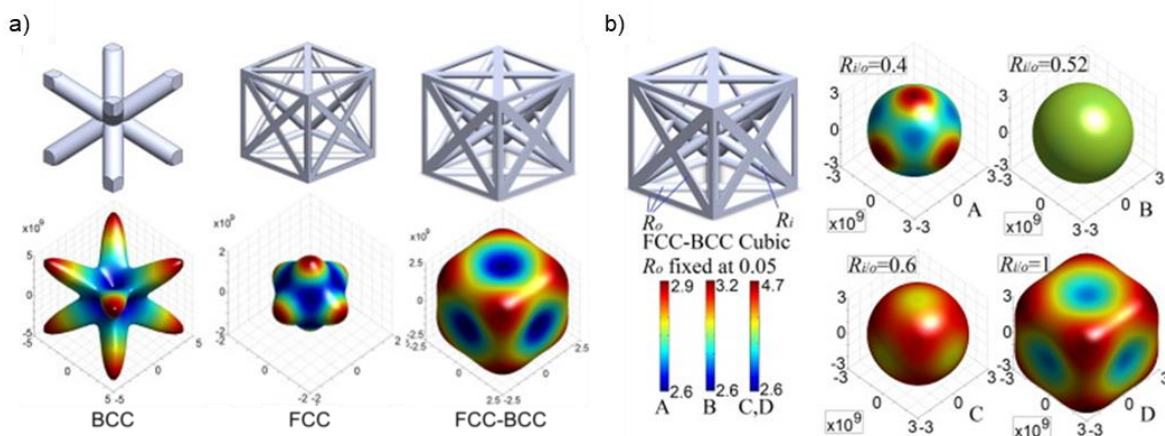
## 2.2.5 Návrh metamateriálu s kontrolovanou anizotropií

Jednou z hlavních výhod aditivně vyráběných metamateriálů je možnost návrhu řízené anizotropie mechanických vlastností. To umožňuje optimalizovat chování metamateriálu v závislosti na specifickém zatěžovacím režimu – např. maximalizaci tuhosti ve vybraném směru či zvýšení absorpce energie [29].

Strategie návrhu metamateriálu s řízenou anizotropií

*Xu a kol.* [30] popsali dvě možné strategie pro návrh metamateriálů s kontrolovanou anizotropií mechanických vlastností, které nevyžadují komplikované změny topologie:

- Kombinace různých typů elementárních buněk, jejichž anizotropní odezvy se vzájemně kompenzují. Geometrie a průměry prutů se následně optimalizují tak, aby výsledná struktura vykazovala požadované vlastnosti (viz Obr. 2-13).
- Kombinace několika elementárních buněk stejného typu s axiální symetrií, přičemž následnou optimalizací průměrů prutů lze opět dosáhnout požadované anizotropie.



Obr. 2-13 Strategie návrhu elementárních buněk s kontrolovanou anizotropií: a) kombinace dvou typů elementárních buněk; b) optimalizace průměrů prutů [30]

Modelování anizotropie pomocí homogenizace

*Munford a kol.* [29] navrhli prediktivní model pro odhad směrově závislého modulu pružnosti struktur, který je aplikovatelný jak pro stochastické, tak pro nestochastické metamateriály. Model vychází z Cowinových rovnic, popisujících vztah mezi geometrií mikrostruktury a jejími elastickými vlastnostmi a využívá tzv. strukturální tenzory k popisu tohoto uspořádání [31].

Pro numerickou analýzu anizotropie se však běžně využívá spíše metoda homogenizace, kterou podrobně popsal *Steven* [32]. Ta je založená na tzv. reprezentativním objemovém prvku (*representative volume element*, RVE). RVE je zatěžován definovanými okrajovými podmínkami ve všech směrech a na základě odezvy se sestavuje matice tuhosti  $\mathbf{C}$  odvozená z Hookova zákona:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\}$$

kde  $\sigma$  představuje vektor napětí,  $C$  je matice tuhosti a  $\varepsilon$  je vektor přetvoření.

Pro její sestavení je nutné analyzovat šest různých zatěžovacích stavů v případě prostorových struktur, respektive tři zatěžovací stavy pro rovinné struktury [30, 32]. Tyto stavy zahrnují jednoosé zatěžování s následujícími okrajovými podmínkami:

$$\begin{aligned} \Delta l_x|_{x=l_x} &= 0,001 \cdot l_x \\ \Delta l_x|_{x=0} &= \Delta l_y|_{y=l_y} = \Delta l_y|_{y=0} = \Delta l_z|_{z=l_z} = \Delta l_z|_{z=0} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

kde  $l$  je rozměr RVE v daném směru a  $\Delta l$  odpovídá deformaci v příslušném směru.

Dále je nutné provést smykové zatěžování s těmito okrajovými podmínkami:

$$\begin{aligned} \Delta l_x|_{z=l_x} &= 0,0005 \cdot l_z, \Delta l_z|_{x=l_x} = 0,0005 \cdot l_x \\ \Delta l_z|_{x=0} &= \Delta l_y|_{y=l_y} = \Delta l_y|_{y=0} = \Delta l_z|_{z=l_z} = \Delta l_x|_{z=0} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Postup se obdobně aplikuje i na zatěžování ve zbývajících směrech.

Získanou matici tuhosti  $C$  lze následně přepočítat na matici poddajnosti  $S$  jako její inverzi:

$$\mathbf{S} = \mathbf{C}^{-1} \quad (6)$$

Směrový modul pružnosti  $E_{ijk}$  lze pak spočítat ze složek matice  $S$  a směrových kosinů daného směru [33]:

$$\frac{1}{E_{ijk}} = S_{11} - 2 \left( S_{11} - S_{12} - \frac{1}{2} S_{44} \right) \times (\ell_{i1}^2 \ell_{j2}^2 + \ell_{j2}^2 \ell_{k3}^2 + \ell_{i1}^2 \ell_{k3}^2) \quad (7)$$

kde  $E_{ijk}$  představuje modul pružnosti RVE v příslušném směru,  $S_{11}$ ,  $S_{12}$  a  $S_{44}$  jsou odpovídající prvky matice poddajnosti a  $\ell_{i1}$ ,  $\ell_{j2}$  a  $\ell_{k3}$  jsou směrové kosiny.

Pro zobecnění modulu pružnosti je možné jej normalizovat, čímž se eliminuje závislost na materiálových vlastnostech a hodnota je funkcí pouze geometrie:

$$E_n = \frac{E_{ijk}}{E_S} \quad (8)$$

kde  $E_S$  je modul pružnosti základního materiálu.

Následně lze kvantifikovat míru anizotropie  $A$ . Pro prostorové metamateriály lze stupeň anizotropie vyjádřit pomocí Zenerova poměru [30, 33]:

$$A = \frac{2C_{44}}{C_{11} - C_{12}} \quad (9)$$

kde  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  a  $C_{44}$  jsou odpovídající prvky matice tuhosti.

Pro rovinné metamateriály poté jako podíl maximální a minimální hodnoty modulu pružnosti nebo jeho normalizované hodnoty:

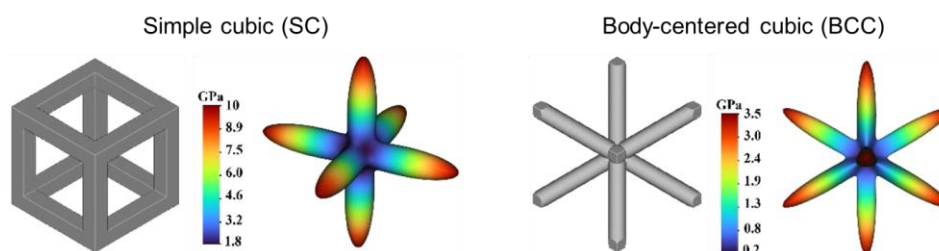
$$A = \frac{E_{max}}{E_{min}} \quad (10)$$

Pokud  $A = 1$ , vykazuje RVE plně izotropní odezvu mechanických vlastností.

## 2.2.6 Faktory ovlivňující anizotropii mechanických vlastností

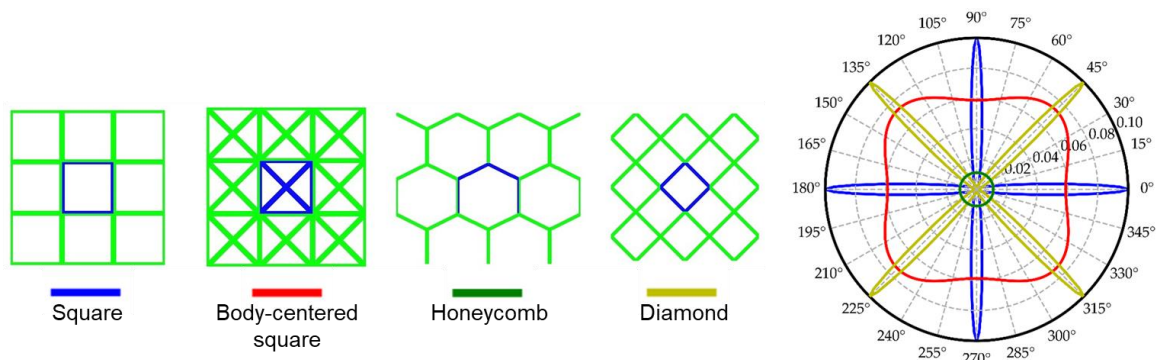
Mechanické vlastnosti metamateriálu jsou výrazně ovlivněny architekturou elementárních buněk. Především topologie a orientace strukturních prvků rozhodují o míře anizotropie či izotropii mechanických vlastností výsledného metamateriálu.

Tradiční elementární buňky, jako simple cubic (SC) nebo body-centered cubic (BCC), vykazují výraznou směrovou závislost mechanických vlastností, neboť jejich tuhost je silně závislá na směru zatížení (viz Obr. 2-14) [34]. U SC buněk dochází primárně k deformaci tahem/tlakem, zatímco u BCC je dominantní ohyb, což vede k vysoké anizotropii modulu pružnosti i pevnosti.



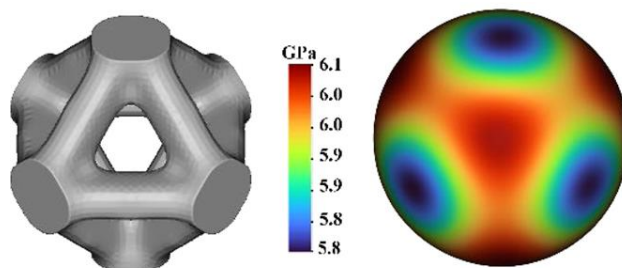
Obr. 2-14 Směrová závislost modulu pružnosti SC a BCC elementárních buněk [34]

Podobné chování zaznamenali také *Thawon a kol.* [35] u 2D konfigurací typu square, body-centered square, honeycomb a diamond. Z jejich zjištění (viz Obr. 2-15) je patrné, že ve směrech orientace stěn elementárních buněk dochází k výraznému nárůstu modulu pružnosti, zatímco nejvíce izotropní mechanické vlastnosti vykazovala buňka typu honeycomb, jejíž orientace stěn umožňuje kombinovanou deformaci tahem/tlakem a ohybem.



Obr. 2-15 Směrová závislost modulu pružnosti elementárních buněk typu square, body-centered square, honeycomb a diamond [35]

*Alkhatib a kol.* [34] navrhli elementární buňku pomocí topologické optimalizace s cílem dosažení izotropní absorpce energie. Izotropní odezvy bylo dosaženo při takové topologii buňky, která vykazovala rovnoměrné rozložení napětí a kombinaci ohybově a tahově/tlakově dominantních mechanismů deformace.



Obr. 2-16 Směrová závislost modulu pružnosti topologicky optimalizované buňky [34]

## 2.3 Shrnutí kritické rešerše

### 2.3.1 Diskuze materiálových modelů

Analýza dostupných materiálových modelů pro simulaci superelastického chování slitin s tvarovou pamětí ukázala, že přesný popis všech relevantních fenoménů – jako je napětím indukovaná fázová transformace, akumulace zbytkového přetvoření nebo vliv historie zatěžování – vyžaduje implementaci pokročilých fenomenologických modelů [11].

Pokročilé fenomenologické modely – zejména *Z-M* modely [16, 17] – umožňují přesný popis napěťově-deformační charakteristiky, vývoje zbytkových deformací a vlivu historie zatěžování. Jejich využití je však limitováno náročnou kalibrací, nutností implementace do výpočetního softwaru a značnými výpočetními nároky.

Naopak *Souza-Auricchio* model [14, 15] představuje kompromis mezi fyzikální věrností a výpočetní efektivitou. Jeho největší předností je především snadná kalibrovatelnost, avšak za cenu nemožnosti predikovat vývoj zbytkových deformací a vliv historie zatěžování. Také tento model je však nutné implementovat do výpočetního softwaru.

Z praktického hlediska proto může být nejvhodnější využití standardních materiálových modelů implementovaných ve výpočetních softwarech. Tyto modely bývají postaveny na podobném principu jako *Souza-Auricchio* model. Jejich předností je především snadné použití, avšak opět za cenu absence predikce některých jevů. Proto je vhodné numerické simulace doplnit experimentálním testováním.

### 2.3.2 Diskuze vlivu aditivní výroby

Rešerše ukázala, že termomechanické vlastnosti slitin NiTi jsou vysoce citlivé na procesní parametry aditivní výroby metodou L-PBF. Kritickými faktory jsou zejména energetická hustota laseru, skenovací rychlost, výška vrstvy, tepelná akumulace a chlazení [18–21].

Na základě studií, které provedli *Tareq a kol.* [18] a *Wang a kol.* [19], se pro dosažení optimálních mechanických vlastností ukazuje být vhodné využití nízké energetické hustoty v rozmezí  $35\text{--}55\text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$  v kombinaci s vysokou skenovací rychlostí  $900\text{--}1200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tyto parametry minimalizují riziko odpařování niklu, které vede ke změně transformačních teplot, a vznik poruch typu *keyholing* či *lack of fusion*. Současně se však ukázalo, že v případě využití Ti substrátu vede nízká energetická hustota k delaminaci prvních vrstev.

Mechanické vlastnosti a kvalita tisku tenkostěnných dílů jsou výrazně ovlivněny také tloušťkou stěn. Studie [22, 23] ukazují, že při tloušťkách menších než 0,5 mm dochází k výraznému nárůstu porozity a při tloušťkách větších než 2 mm dochází vlivem akumulace tepla ke zhoršení homogenity mikrostruktury, vlivem čehož dochází v obou případech k degradaci mechanických vlastností. Pro eliminaci nežádoucí degradace mechanických vlastností je proto vhodné omezit interval tlouštěk stěn na rozmezí  $t = 0,5\text{--}2\text{ mm}$ .

### 2.3.3 Diskuze geometrických a topologických faktorů

Geometrie a topologie metamateriálu zásadně ovlivňují jak rozsah reverzibilní pseudoelastické deformace, tak anizotropii mechanických vlastností. Dosažení vysokého rozsahu pseudolelastických deformací a izotropní odezvy mechanických vlastností však kladou na geometrii odlišné požadavky.

Z rešerše pro vyplynuly dva základní směry návrhu, kdy výsledná geometrie musí být výsledkem jejich kompromisu:

#### *Geometrie pro dosažení vysokého rozsahu reverzibilní pseudoelastické deformace*

Vhodná topologie musí podporovat rovnoměrné rozložení napětí, eliminovat koncentrace napětí a ostré přechody, umožnit předvídatelnou a stabilní deformaci. Inspirace konstrukčními principy koronárních stentů ukázala, že oblá napojení segmentů stěn (kontinuita G2) [24] a proměnná tloušťka stěn [25, 26] snižují koncentraci napětí a podporují jeho rovnoměrné rozložení. Současně se ukazuje být vhodné také využití spojů působících jako ohybově pružný člen [27, 28], které mohou zvyšovat flexibilitu metamateriálu a vést ke snížení únavového poškození.

#### *Geometrie pro dosažení izotropního chování*

Dle Xu a kol. [30] lze k dosažení izotropních mechanických vlastností využít dva přístupy, a to kombinaci různých elementárních buněk nebo symetrické uspořádání shodných buněk s následnou optimalizací tloušťky stěn.

Z dalších studií [34, 35] poté vyplývá, že anizotropie mechanických vlastností je výrazně ovlivněna orientací strukturních prvků buněk a mechanismy jejich deformace. Buňky, u nichž je dominantní jeden mechanismus deformace (tah/tlak či ohyb) vykazují výrazně vyšší anizotropii oproti buňkám s kombinovanou deformací. Pro dosažení nízké míry anizotropie je proto vhodné vyvarovat se rovným stěnám s výraznou orientací do určitých směrů.

### 2.3.4 Souhrn diskutované problematiky

Na základě provedené rešerše a diskuze vyplývají následující poznatky, které budou přímo využity při návrhu, modelování a experimentálním ověření funkce metamateriálu:

#### *Materiálový model pro výpočtové modelování*

Pro účely této práce bude využit materiálový model pro superelastické chování dostupný v softwaru ANSYS, který vychází z modelu Souza-Auricchio a jehož využití nevyžaduje dodatečnou implementaci do softwaru. Fenomény superelastického chování, které tímto modelem není možné predikovat budou poté zkoumány v rámci experimentálního testování, které bude sloužit jako validační nástroj a případně identifikuje limity numerických simulací.

#### *Procesní parametry aditivní výroby technologií L-PBF*

- Energetická hustota laseru v rozsahu  $35\text{--}55\text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$
- Vysoká skenovací rychlost ( $900\text{--}1200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
- Tisk na NiTi substrát z důvodu zajištění stability výroby

Tato kombinace procesních parametrů a podmínek výroby by měla vést k bezproblémovému průběhu výroby a eliminovat ovlivnění výsledných termomechanických vlastností vlivem odpařování Ni.

#### *Omezení geometrie*

- Tloušťky stěn v rozmezí 0,5–2 mm

Tento interval by měl zajistit vhodný kompromis mezi mechanickou pevností, superelastickým chováním a stabilitou výroby.

#### *Architektura elementárních buněk*

- Eliminace přímých stěn ve směru zatěžování kvůli minimalizaci vzpěrné nestability a napěťových špiček
- Využití oblého napojení stěn (kontinuita G2) pro snížení koncentrátů napětí a zvýšení stability deformace
- Optimalizace tloušťky stěn pro rovnoměrné využití materiálu na základě simulací rozložení napětí
- Využití n-shaped spojů jako ohybově pružných členů
- Kombinace více typů elementárních buněk a následná optimalizace tloušťek stěn pro dosažení izotropních mechanických vlastností

## 2.4 Mezera v poznání

Z provedené rešerše vyplývá výrazný nedostatek studií, které by se komplexně zabývaly návrhem a optimalizací mřížkových metamateriálů ze slitin s tvarovou pamětí. Většina dostupných prací je zaměřena buď na konvenční materiály a aplikace (např. absorpce energie, redukce hmotnosti), nebo na biomedicínské aplikace (zejména stenty), jejichž požadavky se však výrazně liší od požadavků na metamateriály pro technické aplikace.

V dostupné literatuře chybí systematická metodika návrhu mřížkových metamateriálů optimalizovaných z hlediska pseudoelastických deformací a řízené anizotropie mechanických vlastností. Tato mezera v poznání představuje motivaci pro výzkum vlivu geometrických parametrů metamateriálu na požadované vlastnosti – rozsah pseudoelastických deformací a anizotropii mechanických vlastností, jehož výsledky by mohly být využity pro efektivní návrh metamateriálů ze slitin s tvarovou pamětí.

## 3 CÍL PRÁCE

Cílem práce je za využití metod výpočtového modelování stanovit závislost míry anizotropie mechanických vlastností a rozsahu pseudoelastických deformací na vnitřním geometrickém uspořádání 2D metamateriálu aditivně vyráběného ze superelastické slitiny Nitinol.

Dílčí cíle diplomové práce:

- rešeršní studie existujících struktur a vlivu jejich geometrického uspořádání na rozsah pseudoelastických deformací a míru anizotropie
- rešeršní studie vlivu aditivní výroby na mechanické vlastnosti superelastické slitiny Nitinol
- identifikace klíčových geometrických prvků s nejvyšším potenciálem pro ovlivnění sledovaných vlastností metamateriálu
- tvorba parametrických výpočtových modelů mechanického zatěžování 2D metamateriálu zohledňujících superelastické chování materiálu
- experimentální testování vybraných konfigurací metamateriálu za účelem pozorování reálných superelastických charakteristik a stanovení jejich vlivu.

Druh výzkumu: orientovaný základní

### 3.1 Výzkumné otázky

Mechanické vlastnosti 2D metamateriálu vyrobeného ze slitiny NiTi jsou zásadně ovlivněny architekturou jeho elementárních buněk. Klíčové požadavky na vysoký rozsah pseudoelastických deformací a zároveň nízkou míru anizotropie však často působí protichůdně. Optimalizace metamateriálu tak představuje vícekritériální problém, který vyžaduje systematické řešení.

Na základě rešerše byly formulovány následující výzkumné otázky:

#### **Otázka 1:**

Jaký je vztah mezi geometrií 2D mřížkového metamateriálu s elementární topologií ze superelastické slitiny NiTi a maximálním rozsahem jeho pseudoelastických deformací?

#### **Otázka 2:**

Jaký je vztah mezi geometrií 2D mřížkového metamateriálu s elementární topologií ze superelastické slitiny NiTi a mírou anizotropie odezvy mechanických vlastností?

## 3.2 Hypotézy

### Hypotéza 1:

Rozsah pseudoelastických deformací je ovlivněn zejména charakterem rozložení redukovaného napětí a deformačním mechanismem metamateriálu. K jeho zvýšení proto povede využití takové morfologie buňky, která:

- Využívá oblé křivky se spojitou křivostí ( $G^2$  kontinuita) [25]
- Eliminuje koncentrátoři napětí
- Bude vykazovat co nejnižší ohybovou tuhost

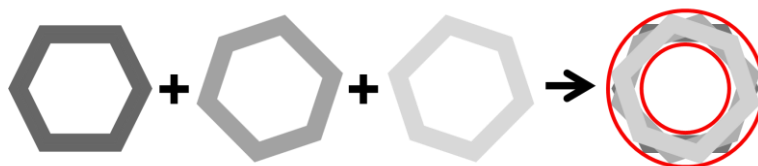
Taková morfologie umožní rovnoměrnější rozložení napětí a snížení celkové tuhosti buňky, což povede k navýšení rozsahu pseudoelastických deformací.

Snížení celkové tuhosti buňky bude možné realizovat zvětšením poměru její velikosti ku tloušťce stěn. K dalšímu navýšení pseudoelastických deformací povede také využití proměnné tloušťky stěn, kdy jejich zúžení v kritických místech bude zlepšovat rozložení napětí a současně snižovat tuhost buňky [25, 26]. Pozitivní vliv bude mít také využití spojů buněk, které budou působit jako pružné členy a zvýší flexibilitu buňky [27, 28].

### Hypotéza 2:

Dle dostupné literatury se z hlediska anizotropie jako nejvhodnější jeví buňky typu honeycomb, které vykazují téměř izotropní mechanické vlastnosti [35]. Současně se však vyznačují vysokou tuhostí, která je nežádoucí z pohledu rozsahu pseudoelastických deformací. Z tohoto důvodu je potřeba navrhnout morfologii s nižší tuhostí.

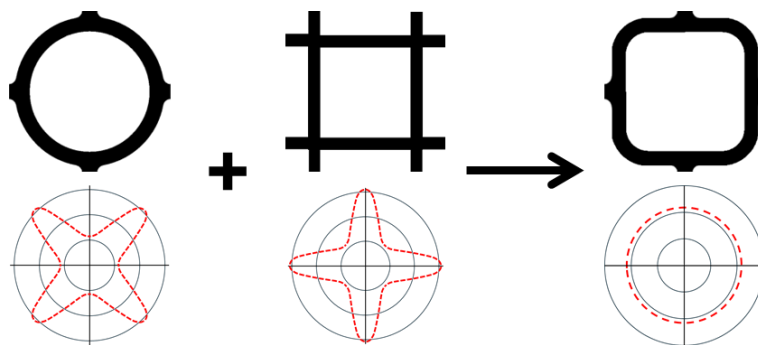
Na základě literatury lze předpokládat, že kombinace více buněk za využití jejich axiální symetrie (např. honeycomb) a jejich vzájemné pootočení povede ke snížení anizotropie vlivem superpozice odezev v různých směrech [30]. Pro dosažení plně izotropních vlastností je nutné využití teoreticky nekonečného počtu těchto buněk, jejichž kombinací zpravidla vznikne kruhová buňka (viz Obr. 3-1).



Obr. 3-1 Kombinace více elementárních buněk stejné geometrie

Tato úvaha je však platná pouze v případě izolovaného výskytu buňky. Při jejím periodickém umístění v mřížce metamateriálu dojde k porušení tohoto předpokladu, a to především vlivem konstrukčních spojů mezi buňkami. Spoje mohou způsobovat lokální změny modulu pružnosti metamateriálů, což povede k vyšší míře anizotropie mechanických vlastností [36].

V místech spojů sousedních buněk bude docházet k výraznému poklesu modulu pružnosti [35]. Z pohledu snížení míry anizotropie mechanických vlastností je možným řešením využití čtvercových buněk, vzájemně napojených ve směrech os x a y (viz Obr. 3-2). Takové uspořádání umožňuje kombinovanou deformaci stěn, což povede k dosažení nízké míry anizotropie. Zaoblení rohů, které je žádoucí pro zvýšení rozsahu pseudoelastických deformací, však současně omezují ohybovou deformaci stěn a dominantním mechanismem se stává tlaková deformace, což opět povede k nárůstu míry anizotropie.



Obr. 3-2 Směrová závislost modulu pružnosti jednotlivých geometrií buněk

Klíčovým prvkem, kterým bude možné řídit směrovou odezvu modulu pružnosti, a tím i míru anizotropie, bude proměnná tloušťka stěn. Zmenšením, respektive zvětšením tloušťky stěn v definovaných místech bude možné lokálně řídit – snižovat, respektive zvyšovat – modul pružnosti v tomto směru [30].

# 4 MATERIÁL A METODY

## 4.1 Metodika

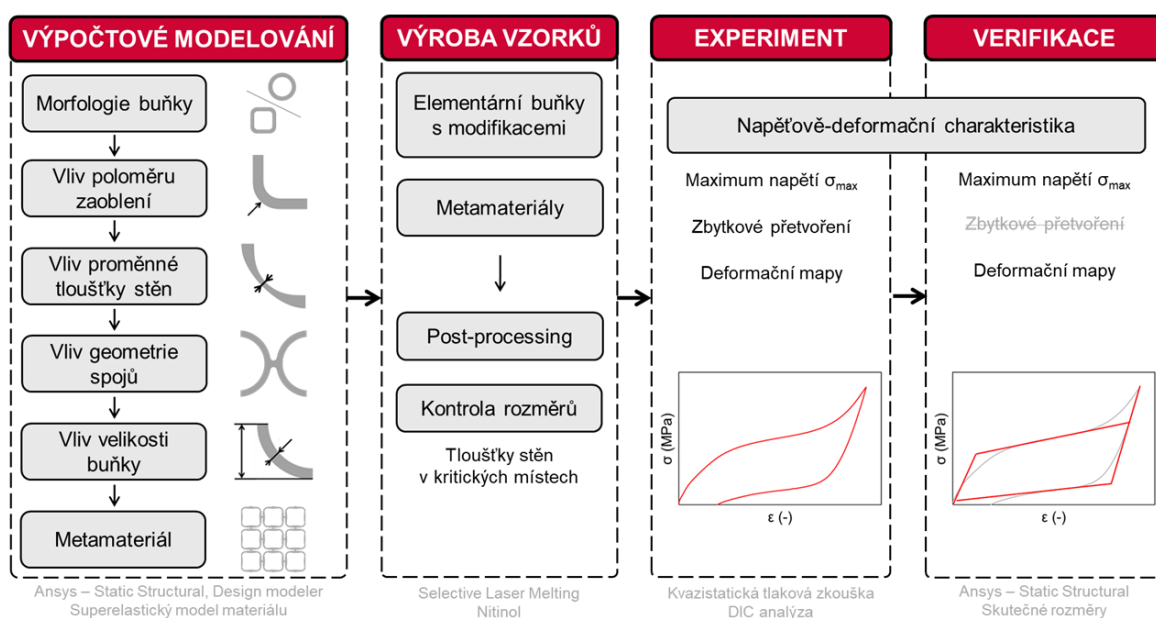
Tato práce řešila kauzální výzkumný problém zaměřený na identifikaci a popis vlivu morfologie elementární buňky a vybraných geometrických parametrů na rozsah reverzibilních pseudoelastických deformací a míru anizotropie mechanických vlastností.

Pro zodpovězení výzkumných otázek byly využity dvě klíčové metodiky:

- *Výpočtové modelování* založené na parametrických analýzách
- *Experimentální testování* zaměřené na ověření výsledků výpočtového modelování

Na základě poznatků získaných z rešerše byly vybrány čtyři potenciálně vhodné morfologie elementárních buněk a provedeny jejich napětově-deformační analýzy. Z následného srovnání těchto výsledků byla vybrána vhodná morfologie buňky pro další pokračování.

Následně bylo identifikováno pět klíčových geometrických parametrů, jejichž vliv byl analyzován ve formě samostatných parametrických studií. Nejperspektivnější konfigurace buněk vedly k vytvoření metamateriálů, které byly aditivně vyrobeny technologií L-PBF a podrobeny kvazistatickému tlakovému testování. Tato fáze sloužila jak k verifikaci výpočtového modelu, tak k identifikaci jevů nepostihnuteľných numerickým modelem, jako je akumulace zbytkové deformace.



Obr. 4-1 Schéma postupu práce

Na závěr byly výsledky experimentálního testování srovnány s výsledky výpočtového modelování. Souhrn všech informací, zjištěných v jednotlivých dílčích částech, umožnil popsat vliv zkoumaných geometrických parametrů a poskytl tak ucelený soubor informací pro efektivní volbu parametrů vnitřního geometrického uspořádání elementárních buněk tak, aby jimi tvořený metamateriál vykazoval požadované vlastnosti.

## 4.2 Přehled výzkumné strategie

Výzkumný postup sestával z následujících kroků:

1. Parametrická numerická analýza vlivu:
  - morfologie elementární buňky
  - velikosti poloměru zaoblení rohů
  - proměnné tloušťky stěn
  - geometrie spojů
  - velikosti elementární buňky
2. Výběr optimálních konfigurací pro výrobu testovacích vzorků
3. Experimentální testování pomocí kvazistatické tlakové zkoušky, doplněné o analýzu digitální korelace obrazu (*Digital Image Correlation, DIC*)
4. Verifikace výpočtového modelu na základě výsledků experimentálního testování

## 4.3 Kritéria geometrie

Na základě systematické rešerše byl rozsah zkoumaných tlouštěk stěn omezen na interval:

$$t \in \langle 1,0; 2,0 \rangle \text{ mm}$$

Horní hranice byla stanovena s ohledem na degradaci mechanických vlastností při větších tloušťkách [22]. Dolní hranice byla stanovena tak, aby umožnila zúžení stěny až na hodnotu 0,5 mm, stanovenou jako limitní hranici pro bezproblémovou vyrobiteľnosť.

## 4.4 Testované predikce

### Testovaná predikce 1:

Maximální rozsah pseudoelastických deformací bude závislý na charakteru rozložení napětí a tuhosti buňky, kdy bude narůstat s rovnoměrnějším rozložením napětí a nižší tuhostí. Nejvhodnější morfologií proto bude *čtverec se zaoblenými rohy*, který umožní dostatečnou ohybovou deformaci stěn, čímž dojde ke snížení tuhosti buňky. Ideální velikost zaoblení bude taková, kdy redukované napětí v zaoblení a v místech zatěžování bude dosahovat stejných hodnot, což zajistí jeho nejrovnoměrnější možné rozložení.

K navýšení rozsahu pseudoelastických deformací povede také využití zúžených stěn v zaoblených rozích, kdy maximální hodnota zúžení bude ležet v intervalu 35-50 % nominální tloušťky. Toto zúžení sníží koncentraci napětí a současně zvýší vnitřní pohyblivost buňky. Současně bude také rozsah narůstat s rostoucím poměrem velikosti buňky ku tloušťce stěny, a to vlivem nižší tuhosti buňky.

Tato predikce bude platná při tlakovém zatěžování ve směrech x a y, působícím v místech teoretických napojení buněk.

### Testovaná predikce 2:

Klíčovým faktorem pro snížení míry anizotropie mechanických vlastností bude kombinovaná tahová/tlaková a ohybová deformace stěn buněk. Nejnižší míru anizotropie proto budou vykazovat morfologie *honeycomb* a *čtverec s ostrými rohy*. Při využití zaoblených rohů bude s rostoucí velikostí tohoto zaoblení narůstat také míra anizotropie, a to z důvodu dominantního tahové/tlakové deformace stěn při velkých zaobleních.

Nejúčinnějším mechanismem pro řízení anizotropie mechanických vlastností bude využití proměnné tloušťky stěn, která umožní lokálně zvyšovat, respektive snižovat modul pružnosti v daném směru zatěžování.

Tab. 4-1 Proměnné veličiny pro testované predikce

Proměnné	Predikce 1	Predikce 2
Kontrolované	Způsob zatěžování, materiál	
Nezávislé	Geometrie (morfologie, tloušťka stěn $t$ , poloměr zaoblení $R$ , zúžení stěn $z$ , velikost buňky)	
Závislé	$\sigma_{RED}$ ; rozsah PE deformací	$A$ ; $E/E_s$

Kde  $\sigma_{RED}$  je maximální hodnota redukovaného napětí,  $A$  je míra anizotropie a  $E/E_s$  je normalizovaný modul pružnosti.

## 4.5 Výpočtové modelování

Numerické simulace byly rozděleny do dvou fází. První fáze se zaměřovala na parametrickou studii vlivu jednotlivých modifikací geometrie elementární buňky. Druhá fáze hodnotila deformační stabilitu celých metamateriálů sestavených z optimalizovaných konfigurací.

Výpočtové modelování bylo provedeno v programu **ANSYS Workbench 2023 R2** (Ansys, Inc., Canonsburg, USA). Napětově-deformační analýzy byly provedeny v modulu *Static Structural*. Pro všechny analýzy bylo použito následující jednotné nastavení:

- 2D geometrie v režimu *Plane Strain*
- Standardní superelastický materiálový model. Mechanické vlastnosti materiálu vycházely z výsledků předchozího výzkumu<sup>3</sup> [37] a jsou uvedeny v Tab. 4-2.
- Konečno-prvková síť byla tvořena prvky typu *PLANE183*. Velikost prvků byla nastavena tak, aby byla tloušťka stěn tvořena alespoň pěti prvky.

Analýzy pro výzkum míry anizotropie mechanických vlastností byly provedeny v programu **ANSYS Workbench 2023 R2** v modulu *Material Designer*. Výstupem analýz byly matice tuhosti elementárních buněk. Ty byly dále analyzovány v prostředí **Matlab R2023b** (MathWorks, Natick, USA), kde byla dopočítána závislost normalizovaného modulu pružnosti na směru zatěžování a míra anizotropie dle rovnic (6-8) a (10). Všechny takto provedené analýzy uvažovaly vliv periodického uspořádání elementárních buněk v mřížkové struktuře metamateriálu.

Tab. 4-2 Mechanické vlastnosti materiálu [37]

$E_A$ (MPa)	$E_S$ (MPa)	$\alpha$ (-)	$e_L$ (mm·mm <sup>-1</sup> )	$\sigma_{SAS}$ (MPa)	$\sigma_{FAS}$ (MPa)	$\sigma_{SSA}$ (MPa)	$\sigma_{FSA}$ (MPa)
35469	57200	0	0,051	365,130	545,452	144,335	10,061

Kde  $E_A$  je modul pružnosti v tahu plně austenitické fáze,  $E_S$  je modul pružnosti v tahu plně martenzitické fáze,  $\alpha$  je parametr určující rozdíl odezvy materiálu v tahu a tlaku,  $e_L$  je transformační přetvoření,  $\sigma_{SAS}$  je počáteční hodnota napětí pro dopřednou fázovou transformaci,  $\sigma_{FAS}$  je koncová hodnota napětí pro dopřednou fázovou transformaci,  $\sigma_{SSA}$  je počáteční hodnota napětí pro zpětnou fázovou transformaci a  $\sigma_{FSA}$  je koncová hodnota napětí pro zpětnou fázovou transformaci.

<sup>3</sup> Použité mechanické vlastnosti odpovídají prvnímu zatěžovacímu cyklu materiálu. S dalšími zatěžovacími cykly se mechanické vlastnosti materiálu mohou měnit [41, 42], a to často v nezanedbatelné míře (viz kapitola 2.2.1). Na řešení výzkumného problému této práce však zmíněná změna vlastností nemá zásadní vliv.

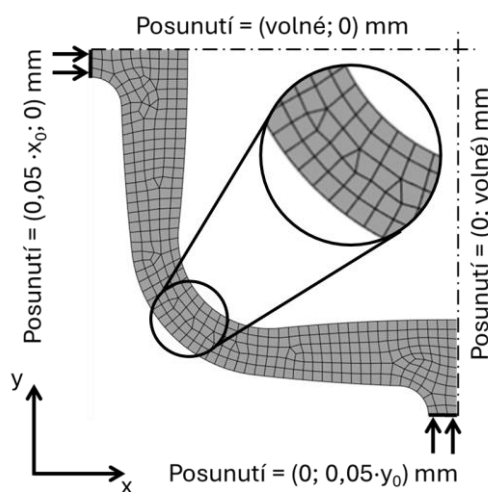
#### 4.5.1 Fáze I – Vliv architektury elementární buňky

V první fázi výpočtového modelování byl zkoumán vliv vnitřního geometrického uspořádání elementárních buněk na míru anizotropie a rozsah pseudoelastické deformace. Aby bylo možné izolovaně popsat vliv jednotlivých modifikací, bylo nutné eliminovat vliv ostatních parametrů. Za tímto účelem byly provedeny samostatné parametrické studie rozdělené do pěti částí:

- Vliv morfologie elementární buňky
- Vliv velikosti poloměru zaoblení rohů elementární buňky
- Vliv proměnné tloušťky stěn
- Vliv geometrie spojů elementárních buněk
- Vliv velikosti buňky

Pro všechny provedené studie, s výjimkou testování vlivu velikosti buňky, byly využity elementární buňky o velikosti 20x20 mm. Vzhledem k osové symetrii buněk byly analýzy provedeny pouze na jejich čtvrtinovém segmentu.

Zatěžování probíhalo za okrajových podmínek zobrazených na Obr. 4-2. Nejprve byla buňka tlakově zatěžována tak, aby bylo dosaženo 5% deformace. Při této deformaci byly odečteny hodnoty redukovaného napětí, přetvoření a reakční síly. Následně byla buňka zatížena do okamžiku lokálního dosažení plně martenzitické struktury.



Obr. 4-2 Okrajové podmínky pro analýzy vlivu modifikací geometrie elementární buňky

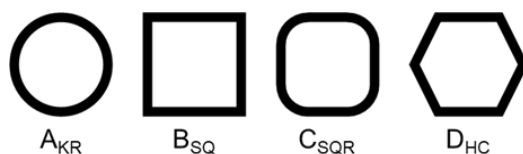
Vyhodnocovanými parametry v této fázi bylo maximální dosažené napětí  $\sigma_{RED}$ , charakter jeho rozložení, deformační mechanismy, míra anizotropie  $A$  a rozsah pseudoelastických deformací<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Vzhledem k obtížnému určení hodnoty meze kluzu martenzitu  $\sigma^{MY}$  byl rozsah PE deformací určován jako hodnota poměrné deformace buňky v okamžiku lokálního dosažení plně martenzitické struktury.

## Vliv morfologie elementární buňky

V této části byly posuzovány čtyři morfologie elementárních buněk (viz Obr. 4-3), z nichž každá byla analyzována pro tloušťky stěn  $t = 1; 1,5$  a  $2$  mm.

- $A_{KR}$  – kruhová buňka
- $B_{SQ}$  – čtverec o ostrými rohy
- $C_{SQR}$  – čtverec se zaoblenými rohy (poloměr zaoblení R5)
- $D_{HC}$  – buňka typu honeycomb

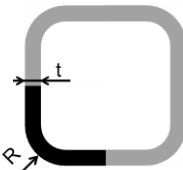
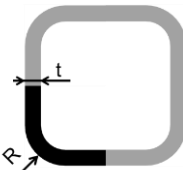
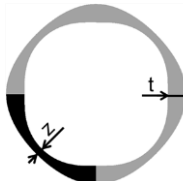
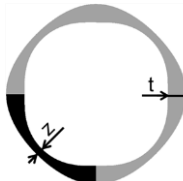
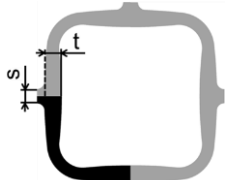
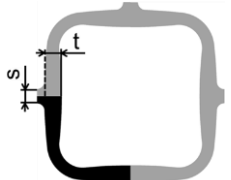
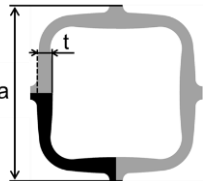
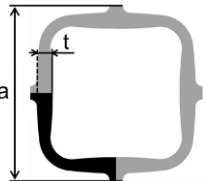


Obr. 4-3 Posuzované geometrie elementární buňky

## Vliv modifikací geometrie

V rámci této části byl posuzován vliv čtyř zmíněných modifikací geometrie. Na základě výsledků předchozí analýzy byla pro tuto část využita buňka  $C_{SQR}$ . Přehled a rozmezí vstupních parametrů jednotlivých analýz jsou uvedeny v Tab. 4-3.

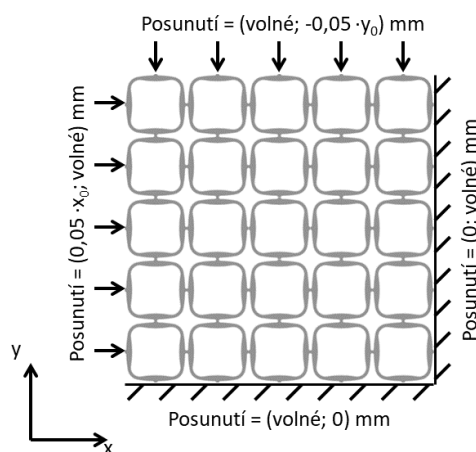
Tab. 4-3 Vstupní parametry pro jednotlivé analýzy

Analýza	Parametr	Rozmezí (mm)	Krok (mm)
Vliv velikosti poloměru zaoblení	Poloměr zaoblení $R$	 $(t + 0,2) - 9,8$	0,2
	Tloušťka stěny $t$	 $1,0 - 2,0$	0,2
Vliv proměnné tloušťky stěn	Zúžení stěny $z$	 $0,25 \cdot t - t$	$0,025 \cdot t$
	Tloušťka stěny $t$	 $1,0 - 2,0$	0,2
Vliv geometrie spojů – přímé napojení buněk	Šířka spoje $s$	 $0,5 - 2$	0,1
	Tloušťka stěny $t$	 $1,0 - 2,0$	0,2
Vliv velikosti elementární buňky	Velikost buňky $a$	 $10 - 20$	5
	Tloušťka stěny $t$	 $1,0 - 2,0$	0,2

## 4.5.2 Fáze II – Analýza metamateriálů

Na základě výsledků získaných v kap. 4.5.1 bylo vybráno šest optimalizovaných konfigurací elementárních buněk s nominálními tloušťkami stěn  $t = 1; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8$  a  $2$  mm, které vykazovaly nejvyšší rozsah pseudoelastických deformací a současně izotropní odezvu mechanických vlastností, a z nich sestaveny metamateriály. Primárním cílem analýzy bylo posouzení dosažitelného rozsahu pseudoelastických deformací bez vlivu hraničního efektu<sup>5</sup> a ověření stability pseudoelastické deformace, tedy stability před dosažením limitu rozsahu pseudoelastických deformací.

Zatěžování probíhalo za okrajových podmínek zobrazených na Obr. 4-4. Při této deformaci byly odečteny hodnoty redukovaného napětí, přetvoření a reakční síly. V případech, kdy při tomto zatížení nebylo lokálně dosaženo plně martenzitické fáze, byly hodnoty posuvu zvětšeny a odečteny hodnoty rozsahu pseudoelastických deformací.



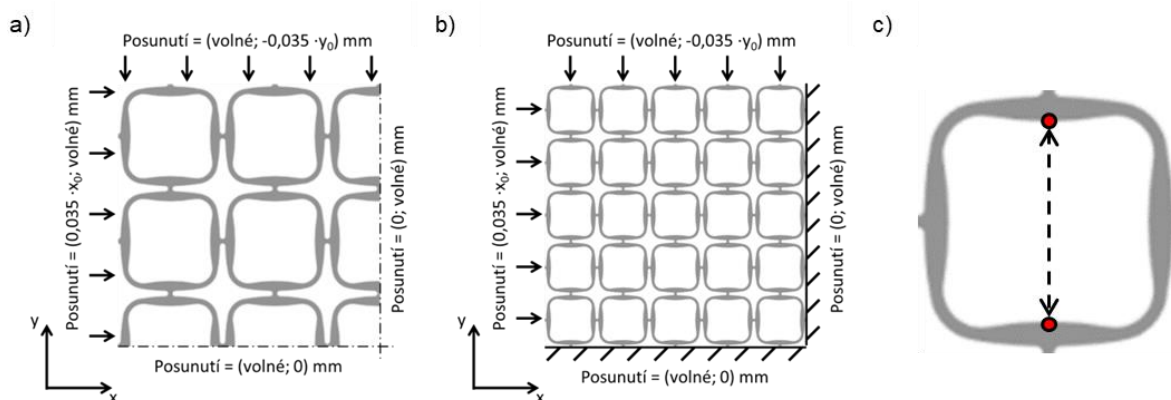
Obr. 4-4 Okrajové podmínky pro fázi testování reprezentativních metamateriálů

Pro dosažení validních výsledků bylo nejprve nutné stanovit minimální počet buněk metamateriálu, aby byl eliminován vliv hraničního efektu. Kritériem pro stanovení dostatečného počtu buněk byla změna sledované veličiny, která se nesměla lišit o více než 10 % při dalším navýšení počtu buněk. Touto sledovanou veličinou byla změna kolmé vzdálenosti dvou bodů středové buňky (viz Obr. 4-5c).

Analýza byla provedena pro  $1 \times 1$ ,  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$  a  $9 \times 9$  buněk, a to ve variantách s využitím čtvrtinové symetrie a bez využití čtvrtinové symetrie. Okrajovými podmínkami bylo zamezení posuvu dvou hran ve směru na ně kolmém a posuv zbylých dvou hran o hodnotu způsobující 3,5% přetvoření struktury<sup>6</sup> (viz Obr. 4-5a, b).

<sup>5</sup> Hraniční efekt označuje jev, kdy buňky umístěné na okrajích metamateriálu vykazují odlišné mechanické chování v důsledku asymetrického okolí a přenosu zatížení. Tento efekt může vést ke zkreslení výsledků simulací nebo experimentů.

<sup>6</sup> Hodnota deformace byla zvolena tak, aby nedošlo k dosažení plně martenzitické oblasti, čímž se eliminovala možnost ztráty stability struktury.



Obr. 4-5 Okrajové podmínky pro stanovení minimálního počtu buněk a) s využitím symetrie, b) bez využití symetrie; c) sledovaná změna vzdálenosti dvou bodů

## 4.6 Experimentální testování

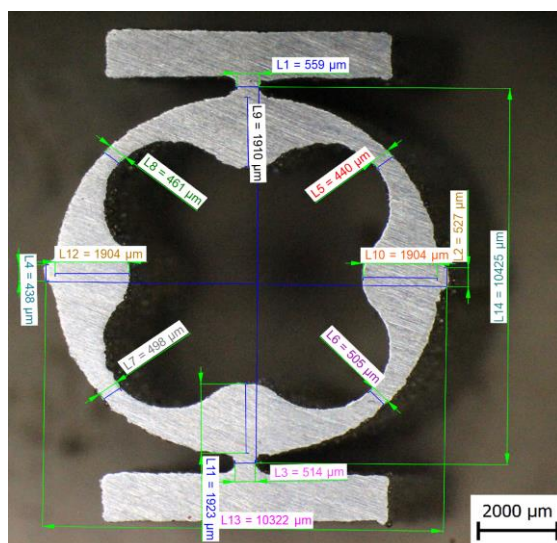
Za účelem ověření výsledků výpočtového modelování byla provedena experimentální verifikace pomocí kvazistatické tlakové zkoušky. Pro zvýšení přesnosti měření deformací byla tato metoda doplněna o DIC analýzu, která umožňuje bezkontaktní sledování deformace vzorků.

### 4.6.1 Testovací vzorky

Pro experimentální testování byly vybrány čtyři sady vzorků tak, aby umožnily validaci obou fází numerického modelování, tedy jak parametrických studií elementárních buněk, tak chování reprezentativních metamateriálů. První sadou byly elementární buňky s optimálními parametry pro šest uvažovaných nominálních tlouštěk stěny, získané na základě výpočtového modelování. Druhá sada vzorků cílila na ověření výsledků vlivu velikosti poloměru zaoblení. Třetí sada byla vybrána pro ověření výsledků vlivu proměnné tloušťky stěn. Vzorky pro druhou a třetí sadu byly voleny tak, aby pokryly analyzované rozmezí parametrů. Poslední sadou poté byly metamateriály tvořené elementárními buňkami s optimálními parametry, opět pro šest uvažovaných nominálních tlouštěk stěn. Vzhledem k omezeným možnostem výroby byly použity vzorky s velikostí buňky 10x10 mm.

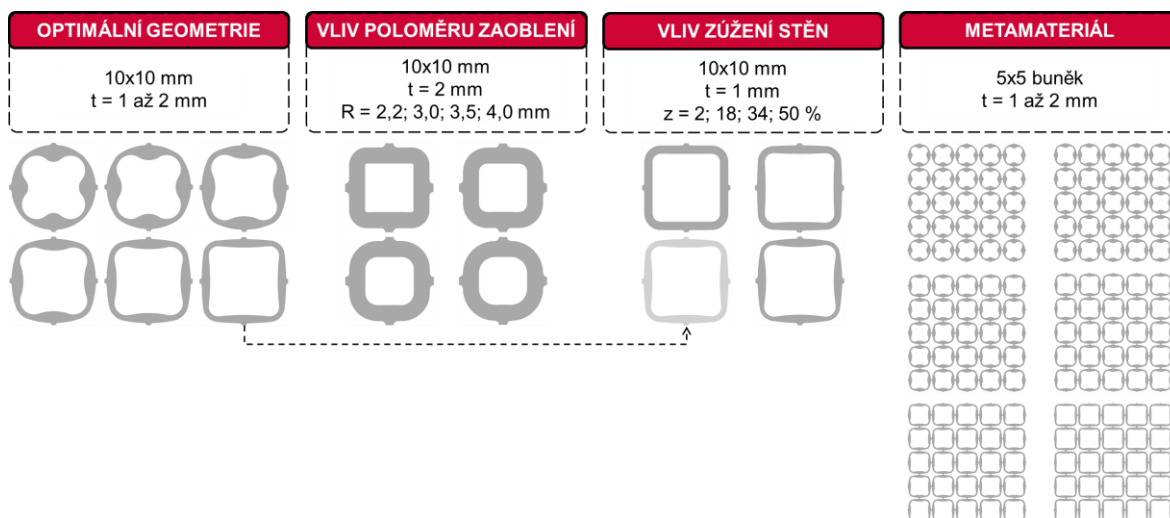
Pro zajištění reprezentativního statistického souboru byla každá zvolená konfigurace elementárních buněk vyrobena v počtu pěti kusů, z nichž tři byly testovány tlakovým zatěžováním v pseudoelastické oblasti a jeden byl testován do porušení. Šest vybraných konfigurací reprezentativních metamateriálů bylo poté vyrobeno a testováno v počtu jednoho kusu. Po dokončení výroby vzorků byl proveden post-processing zahrnující detailní inspekci rozměrů.

Morfologická analýza vzorků byla realizována pomocí mikroskopu **Olympus SZX7** (Evident, Tokio, Japonsko). Každý vzorek byl zdokumentován a byly měřeny čtyři klíčové rozměry (viz Obr. 4-6) – nominální tloušťka stěn, minimální tloušťka ve zúžení, šířka spojů a celkové rozměry buněk.



Obr. 4-6 Kontrolované rozměry vzorků

Grafický přehled vzorků je zobrazen na Obr. 4-7. Značení vzorků je uvedeno v Příloze A.



Obr. 4-7 Přehled vzorků pro experimentální testování

## 4.6.2 Výroba

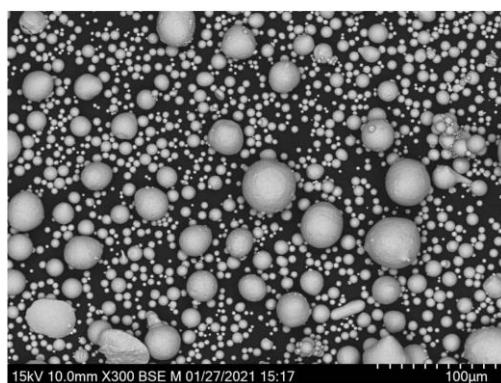
Pro účely experimentálního testování byly použity CAD modely testovacích vzorků, použité ve fázi výpočtového modelování. Výrobní data byla připravena v softwaru **Materialise Magics** (Materialise, Leuven, Belgie).

## Použitý materiál

Pro výrobu testovacích vzorků byl použit kovový prášek slitiny NiTi od společnosti **Carpenter Additive** (Widnes, Spojené království), vyrobený metodou plynového rozprašování [38]. Tvar částic byl analyzován pomocí rastrovací elektronové mikroskopie (SEM, viz Obr. 4-8). Distribuce velikosti částic byla stanovena pomocí laserové velikostní difrakce za použití normy ASTM B822 s následujícím výsledkem:  $Q_{10} = 13,3 \mu\text{m}$ ,  $Q_{50} = 30,0 \mu\text{m}$ ,  $Q_{90} = 51,2 \mu\text{m}$ . Analýzou metodou diferenciální skenovací kalorimetrie byly zjištěny tranzitní teploty surového prášku  $A_s = -49 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $A_p = 17 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $A_f = 41 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>7</sup>. Obdobně byly analyzovány transformační teploty materiálu ve zpracovaném stavu. Ty byly nižší než pokojová teplota, a tudíž lze chování materiálu za pokojové teploty považovat za plně superelastické. Výsledky chemické analýzy materiálu jsou uvedeny v Tab. 4-4.

Tab. 4-4 Chemické složení nitalového prášku [38]

Prvek	C	Cr	Co	Cu	H	Fe	Ni	Nb	N	O	Ti
hm. %	0,0024	0,0042	<0,0010	<0,0035	<0,0005	0,0044	55,750	<0,0010	<0,0005	0,058	Bal.

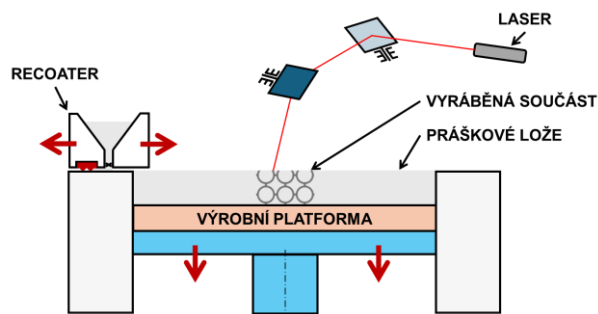


Obr. 4-8 Snímek z elektronové mikroskopie prášku [38]

## Technologie výroby

Pro výrobu testovacích vzorků byla využita aditivní technologie laserové fúze práškového lože (*Laser Powder Bed Fusion, L-PBF*). Princip této technologie spočívá v postupném natavování tenkých vrstev kovového prášku za pomoci výkonného laseru [7]. Materiál se nachází v práškovém loži, které je po natavení dané vrstvy sníženo a je nanášena následující vrstva (viz Obr. 4-9). Takto se proces opakuje až do úplného vytvoření dílu. Jedná se tedy o metodu výroby *layer-by-layer*. Proces obvykle probíhá v uzavřené komoře naplněné inertním plynem. V závislosti na použitém materiálu je možné využít přehřev základové desky a případně také výrobní komory.

<sup>7</sup> Kde  $A_s$  je teplota začátku austenitické transformace,  $A_p$  je teplota austenit peak a  $A_f$  je teplota dokončení austenitické transformace.



Obr. 4-9 Schéma technologie L-PBF (upraveno dle [39])

Výroba proběhla na zařízení **SLM 280<sup>HL</sup>** (SLM Solutions, Lübeck, Německo), vybaveném vláknovým laserem YLR-Faser o maximálním výkonu 400 W a stavební o rozměrech 280x280x350 mm. Procesní parametry byly zvoleny na základě provedené rešerše a předchozího výzkumu, provedeného s totožným materiálem [37] a jsou uvedeny v Tab. 4-5. Pro výrobu byla zvolena skenovací strategie *Stripes*, kdy se směr šrafování s každou vrstvou mění o 67°. Tisk probíhal na NiTi substrát.

Tab. 4-5 Procesní parametry

Parametr	Nastavení	
Předehřev výrobní platformy	200 °C	
Výška vrstvy	50 μm	
Atmosféra výrobní komory	Argon (Ag)	
Hatch distance	0,115 mm	
Výkon laseru; Skenovací rychlost	<i>Borders</i>	360 W; 1250 mm·s <sup>-1</sup>
	<i>Fill Contours</i>	150 W; 450 mm·s <sup>-1</sup>
	<i>Hatching</i>	360 W; 1250 mm·s <sup>-1</sup>

#### 4.6.3 Kvazistatická tlaková zkouška

V rámci experimentálního testování byla provedena kvazistatická tlaková zkouška vzorků na zařízení **SHIMADZU AGX-100kNV2** (Shimadzu Corporation, Japonsko). Hlavním účelem zkoušky byla verifikace výsledků výpočtového modelování a pozorování reálných charakteristik superelastického materiálu, které nebyly postihnuty v rámci výpočtového modelování, tedy především výskytu zbytkových deformací.

Tlaková zkouška byla doplněna DIC analýzou. Průběh zkoušky byl snímán dvěma kamerami systému DIC (5 MPx CMOS kamery USB3, snímkovací frekvence 0,5-2 Hz, software Istra 4D V4.10, Dantec Dynamics, Dánsko). Aby bylo možné snímky vyhodnotit, byly snímané plochy vzorků upraveny pomocí černobílého nástřiku. Výsledky DIC analýzy byly využity pro vyhodnocení deformací vzorků.

Ze získané závislosti síly na deformaci vzorků byla následně získána závislost smluvního napětí na poměrné deformaci dle vztahů (11) a (12)

$$\sigma_i = \frac{F_i}{S} \quad (11)$$

$$\varepsilon_i = \frac{y_i}{a_0} \quad (12)$$

Kde  $\sigma_i$  je okamžité smluvní napětí,  $F_i$  je okamžitá reakční síla,  $\varepsilon_i$  je okamžitá poměrná deformace,  $y_i$  je okamžitá hodnota stlačení a  $a_0$  je původní výška vzorku.

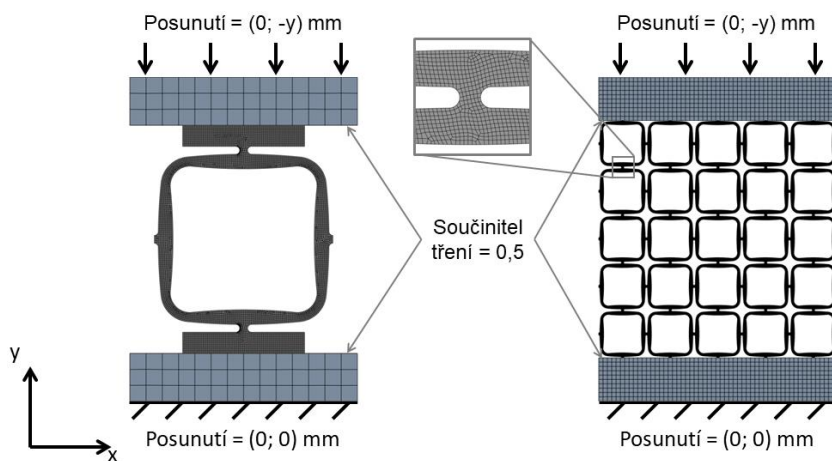
## 4.7 Verifikační analýza

Za účelem verifikace provedených MKP simulací a jejich porovnání s výsledky experimentálního testování byly v programu **ANSYS Workbench 2023 R2** provedeny simulace identické s tlakovými zkouškami vzorků. Pro jejich účely byly rozměry CAD modelů upraveny na základě skutečných naměřených rozměrů vzorků. Současně byly pro tyto analýzy upraveny mechanické vlastnosti superelastického materiálového modelu na základě testů provedených na vzorku vyrobeném současně s testovacími vzorky. Použité mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 4-6. V případech, kdy využití superelastického materiálového modelu neodpovídalo výsledkům experimentálního testování byly využity lineární materiálový model, jehož Youngův modul pružnosti odpovídal modulu pružnosti martenzitické fáze  $E_s$ , případně multilineární materiálový model přesněji kopírující zatěžovací křivku.

Tab. 4-6 Mechanické vlastnosti superelastického materiálu použité pro verifikační analýzy

$E_A$ (MPa)	$E_s$ (MPa)	$\alpha$ (-)	$e_L$ (mm·mm <sup>-1</sup> )	$\sigma_{SAS}$ (MPa)	$\sigma_{FAS}$ (MPa)	$\sigma_{SSA}$ (MPa)	$\sigma_{FSA}$ (MPa)
54421	89444	0	0,036	500,189	757,401	354,006	0,000

Okrajové podmínky (viz Obr. 4-10) byly nastaveny tak, aby odpovídaly podmínkám experimentálního testování. Zatěžování bylo provedeno pomocí tlačných desek, jimž byl přiřazen výchozí materiál *Structural Steel*. Mezi deskami a vzorky byl využit kontakt typu *frictional* s hodnotou součinitele tření 0,5. Hodnota posuvu odpovídala deformaci daného vzorku.



Obr. 4-10 Okrajové podmínky pro verifikační úlohy

## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Výsledky výpočtového modelování

Cílem výpočtového modelování bylo analyzovat vliv zkoumaných parametrů a modifikací geometrie elementární buňky na rozsah pseudoelastických deformací a míru anizotropie mechanických vlastností. Důraz byl kladen zejména na identifikaci mechanismů odpovědných za pozorované závislosti.

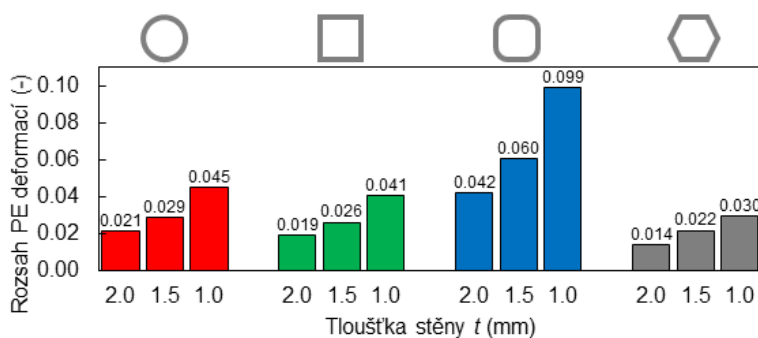
#### 5.1.1 Fáze I – Vliv architektury elementární buňky

Vliv morfologie elementární buňky

V první části výpočtového modelování byl analyzován vztah mezi morfologií čtyř vybraných elementárních buněk – kruhové ( $A_{KR}$ ), čtvercové s ostrými rohy ( $B_{SQ}$ ), čtvercové se zaoblenými rohy ( $C_{SQR}$ ) a honeycomb ( $D_{HC}$ ) – a rozsahem pseudoelastických deformací a mírou anizotropie mechanických vlastností.

*Rozsah pseudoelastických deformací a deformační mechanismy*

Největší rozsah pseudoelastických deformací umožňovala morfologie buňky  $C_{SQR}$ , a to napříč všemi testovanými tloušťkami stěn. Buňky  $A_{KR}$  a  $B_{SQ}$  dosahovaly přibližně o 45-50 % nižších hodnot, zatímco u buňky  $D_{HC}$  byl rozsah PE deformací omezen až o 70 % vůči  $C_{SQR}$ . U všech typů buněk bylo navíc pozorováno, že se snižováním tloušťky stěn docházelo k mírnému nárůstu PE deformací (viz Obr. 5-1).

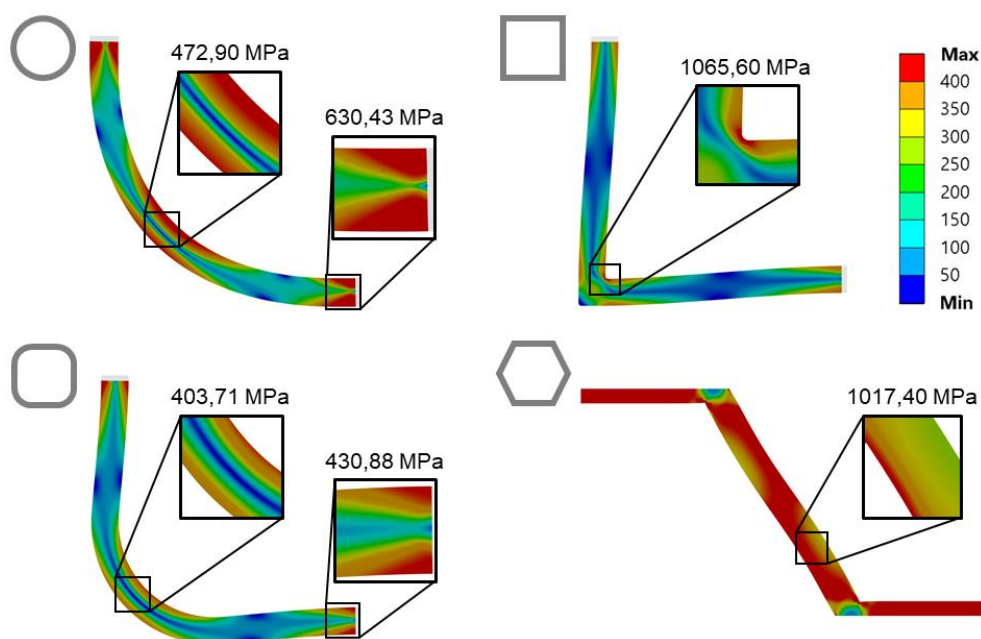


Obr. 5-1 Rozsah pseudoelastických deformací posuzovaných geometrií

Podrobný rozbor výsledků napět'ově-deformačních analýz odhalil dva hlavní faktory ovlivňující rozsah pseudoelastických deformací – rozložení redukovaného napětí  $\sigma_{RED}$  a charakter deformačního režimu stěn (viz Obr. 5-2).

Rozsah pseudoelastických deformací vykazoval výraznou závislost na rozložení  $\sigma_{RED}$ . Přítomnost koncentrátorů napětí, typicky v ostrých rozích buňky  $B_{SQ}$ , vedla k poklesu dosažitelného rozsahu PE deformací. Naproti tomu nejvyššího rozsahu bylo dosaženo v případě buňky  $C_{SQR}$ , která vykazovala nejrovnoměrnější rozložení napětí, které v oblastech zatěžování a v zaoblených rozích dosahovalo srovnatelných hodnot. Současně tato morfologie umožňovala kombinovaný ohybově-tlakový deformační režim stěn, díky němuž buňka vykazovala nižší tuhost a vyšší rozsah PE deformací.

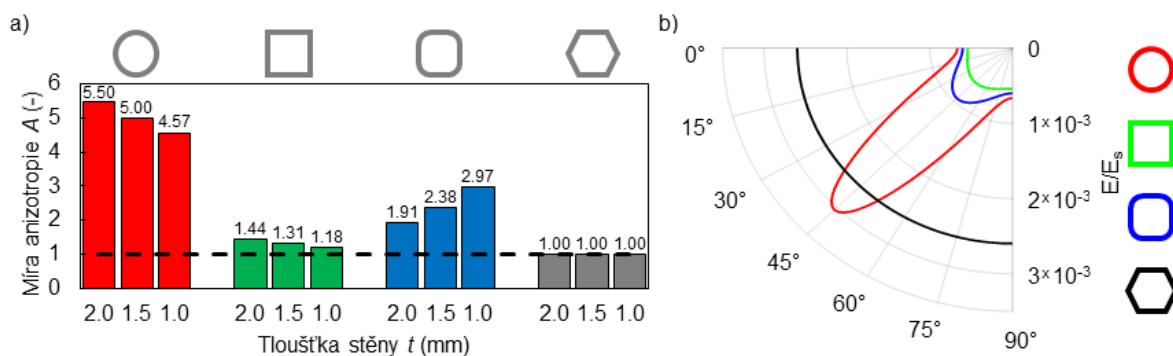
Buňky  $A_{KR}$  a  $D_{HC}$  naopak vykazovaly tlakově dominantní deformační režim stěn, který vedl k vyšší tuhosti. Ačkoliv bylo v těchto případech napětí rozloženo poměrně rovnoměrně a nedocházelo k jeho výrazným koncentracím, zvýšená tuhost značně omezovala rozsah PE deformací.



Obr. 5-2 Rozložení  $\sigma_{RED}$  a deformační mechanismy posuzovaných geometrií

### *Anizotropie mechanických vlastností*

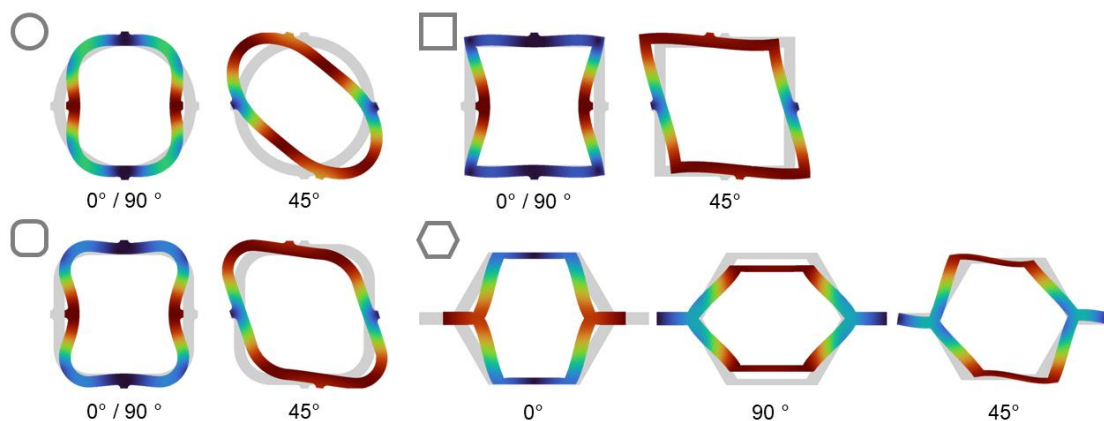
Analýza směrové odezvy modulu pružnosti ukázala, že morfologie  $D_{HC}$  dosahovala plně izotropní odezvy mechanických vlastností (viz Obr. 5-3). Současně však vykazovala až 4,7x vyšší hodnoty modulu pružnosti, což poukazuje na její vysokou tuhost a koresponduje s výsledky napětí-ově-deformační analýzy. Nejvyšší míru anizotropie poté vykazovala morfologie  $A_{KR}$ , jejíž modul pružnosti při smykovém zatěžování ( $45^\circ$ ) dosahoval až 5,5násobku hodnot při tlakovém zatěžování ( $0^\circ$  a  $90^\circ$ ). Buňky  $A_{KR}$ ,  $B_{SQ}$  a  $C_{SQR}$  taktéž dosahovaly velmi podobných hodnot modulu pružnosti při tlakovém zatěžování.



Obr. 5-3 a) Míra anizotropie mechanických vlastností, čárkovaná čára značí izotropní mechanické vlastnosti; b) Směrová odezva modulu pružnosti posuzovaných morfologií

Analýza deformačních mechanismů buněk při jednoosém tlakovém a smykovém zatěžování (viz Obr. 5-4) ukázala, že klíčovým faktorem pro zajištění izotropní odezvy mechanických vlastností je shoda deformačního režimu napříč různými způsoby zatěžování. Zjištěno bylo také, že dominantní režim deformace výrazně ovlivňoval celkovou tuhost buňky. Buňky vykazující při daném namáhání ohybově dominantní deformaci stěn dosahovaly v tomto směru výrazně nižší tuhost než buňky, u nichž byl dominantní tlakový či tlakový režim deformace.

Nejnižší míru anizotropie vykazovaly buňky, jejichž morfologie vykazovala srovnatelné deformační režimy nezávisle na způsobu zatěžování. Toto chování bylo pozorováno v případě morfologie  $B_{SQ}$ , kde uspořádání stěn umožňovalo při jednoosém tlakovém i smykovém zatěžování kombinovanou ohybově-tahovou, resp. ohybově-tlakovou, deformaci. Podobně také morfologie  $D_{HC}$ , která vykazovala tlakově dominantní deformační režim. Naopak výrazný nárůst míry anizotropie byl zaznamenán v případě, kdy se při různých způsobech zatěžování uplatňovala odlišné deformační režimy. Typicky v případě morfologie  $A_{KR}$ , která při jednoosém tlakovém zatěžování vykazovala ohybově dominantní deformaci, zatímco při smykovém zatěžování přešla do tahově dominantního režimu. Tento rozdíl vedl ke směrově závislé změně tuhosti a nárůstu míry anizotropie.



Obr. 5-4 Deformační mechanismy morfologií buněk při tlakovém ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ) a smykovém ( $45^\circ$ ) zatěžování

Optimální kompromis mezi dosažením vysokého rozsahu pseudoelastických deformací při současném zachování nízké míry anizotropie vykazovala morfologie  $C_{SQR}$ . Z tohoto důvodu byla zvolena jako výchozí morfologie pro navazující analýzy.

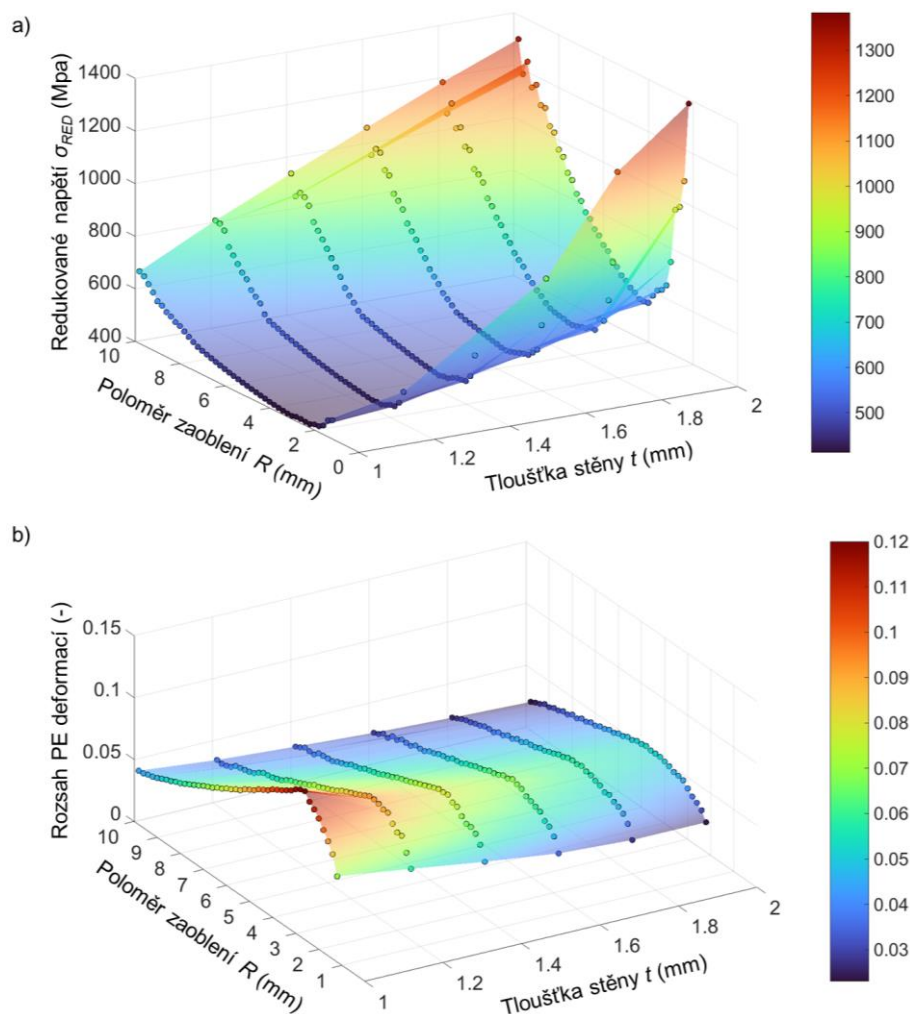
#### Vliv velikosti poloměru zaoblení

Na základě zvolené výchozí morfologie bylo dalším krokem analyzovat vztah mezi velikostí poloměru zaoblení  $R$  a rozsahem pseudoelastických deformací a mírou anizotropie.

#### *Rozsah pseudoelastických deformací a deformační mechanismy*

Závislost rozsahu pseudoelastických deformací na velikosti poloměru zaoblení  $R$  vykazovala nelineární charakter, kdy průběh nebyl monotónní, ale pro každou tloušťku stěny bylo dosaženo lokálního maxima (viz Obr. 5-5b). Tato závislost také vykazovala částečně inverzní vztah k hodnotám  $\sigma_{RED}$ . Nejvyššího rozsahu bylo dosaženo při nižších napětích, nicméně celkový průběh závislosti byl plošší a nárůst  $\sigma_{RED}$  při krajních hodnotách  $R$  se v rozsahu PE deformací výrazně neprojevil. Rozsah PE deformací byl rovněž ovlivněn tloušťkou stěny  $t$ , kdy menší  $t$  vedly k vyšším hodnotám rozsahu.

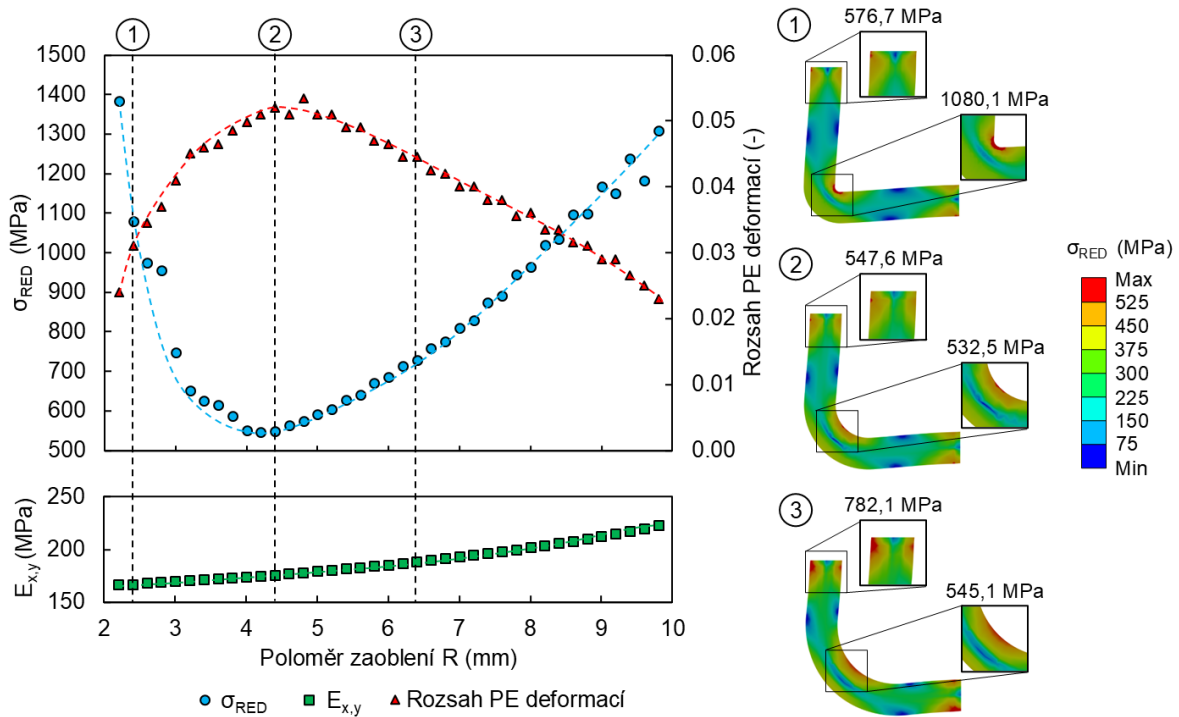
Využití optimální velikosti poloměru zaoblení vedlo k nárůstu rozsahu PE deformací o 130 ( $t = 2,0 \text{ mm}$ ) až 175 % ( $t = 1,0 \text{ mm}$ ) oproti minimálním hodnotám, kterých bylo dosaženo zpravidla při maximálních hodnotách  $R$ .



Obr. 5-5 Průběh a) redukované napětí a b) rozsahu pseudoelastických deformací v závislosti na tloušťce stěny  $t$  a poloměru zaoblení  $R$

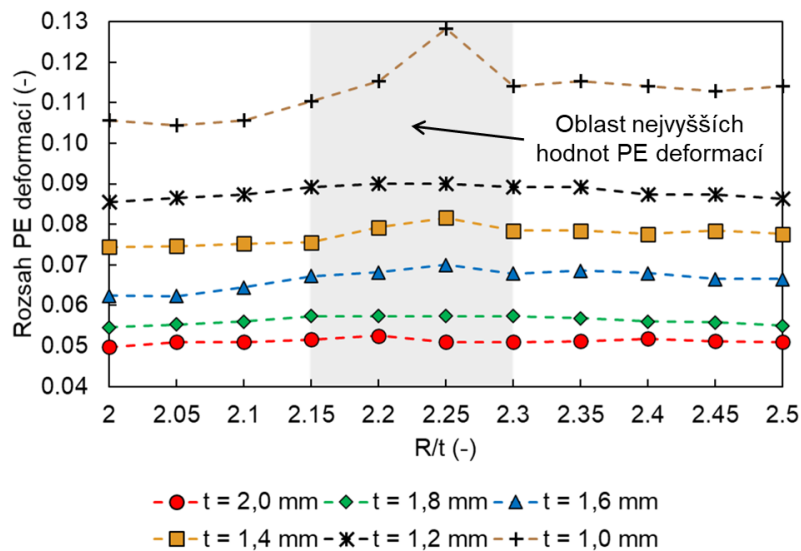
Podrobná analýza (viz Obr. 5-6) ukázala, že menší velikost zaoblení podporovala kombinovaný ohybově-tlakový deformační režim stěn, v důsledku čehož vykazovaly buňky nižší tuhost. V této konfiguraci však byl rozsah pseudoelastických deformací omezen především výskytem lokálních koncentrací napětí v ostrých rozích. S rostoucím poloměrem zaoblení docházelo ke zlepšení rozložení namáhání, což vedlo ke snížení lokálních napět'ových špiček a postupnému nárůstu rozsahu PE deformací. Tento trend kulminoval při optimální hodnotě  $R$ , kdy maximální napětí v zaoblení a v místech zatěžování dosahovaly srovnatelných hodnot, a současně geometrie buňky zachovávala schopnost kombinovaného ohybově-tlakového režimu deformace stěn.

Při dalších nárůstech poloměru zaoblení docházelo ke zvýšení ohybové tuhosti geometrie, což vedlo k přechodu k tlakově dominantnímu deformačnímu režimu. Tato změna způsobila zvýšení celkové tuhosti buňky, globálnímu nárůstu napětí v celém jejím průřezu a následný pokles dosažitelného rozsahu pseudoelastických deformací.



Obr. 5-6 Průběh redukovaného napětí  $\sigma_{RED}$ , modulu pružnosti  $E_{x,y}$  a rozsahu PE deformací na poloměru zaoblení  $R$  pro  $t = 2$  mm

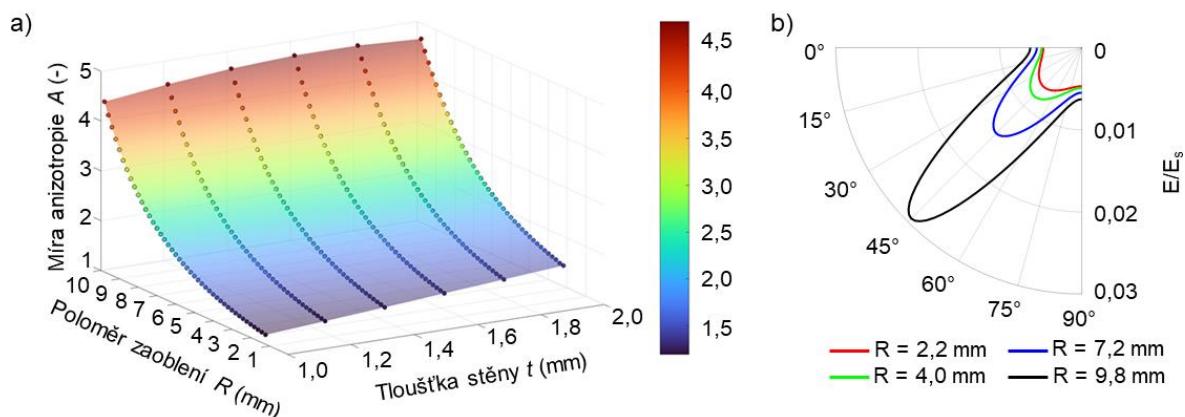
Pro přesnější určení optimální velikosti poloměru zaoblení  $R$  byla provedena detailnější analýza v rozmezí  $R = (2,0-2,5) \cdot t$ , kdy byl měněn poloměr zaoblení s krokem  $0,05 \cdot t$ . Nejvyšších hodnot v závislosti na tloušťce stěny bylo dosaženo pro  $R = (2,15-2,30) \cdot t$  (viz Obr. 5-7).



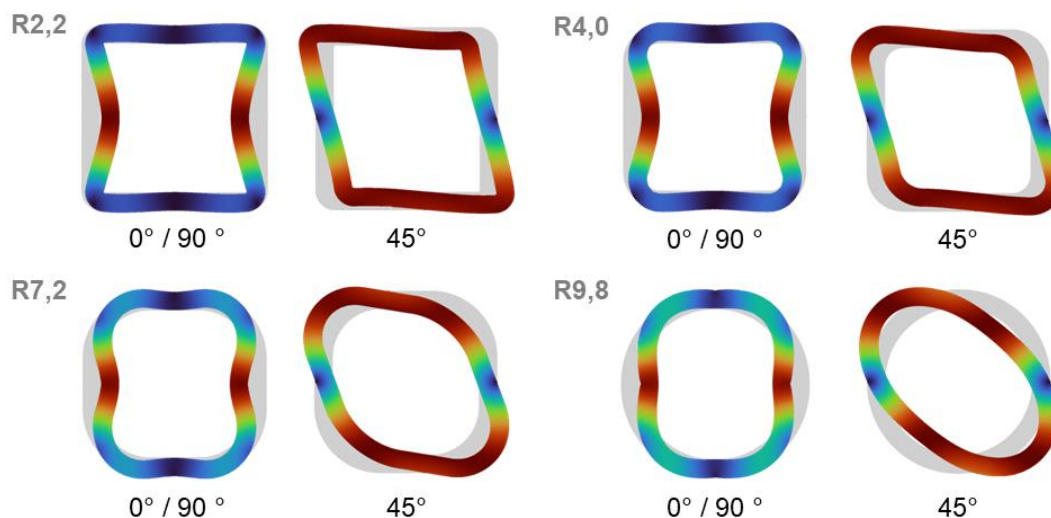
Obr. 5-7 Závislost rozsahu pseudoelastických deformací na poměru  $R/t$  pro podrobněji analyzovanou oblast

## Anizotropie mechanických vlastností

Z hlediska anizotropie mechanických vlastností byl pozorován nelineárně klesající trend míry anizotropie  $A$  při snižujících se hodnotách  $R$  (viz Obr. 5-8). Toto zjištění potvrzuje závěry analýz vlivu morfologie buňky, podle nichž geometrie s menším zaoblením podporovala kombinovaný ohybově-tlakový deformační režim stěn nezávisle na způsobu zatěžování. Naopak s rostoucím poloměrem zaoblení docházelo při smykovém zatěžování k přechodu na tahově dominantní režim deformace stěn, což vedlo k výraznému nárůstu tuhosti ve směru  $45^\circ$  (viz Obr. 5-9).



Obr. 5-8 Průběh míry anizotropie v závislosti na tloušťce stěny  $t$  a poloměru zaoblení  $R$



Obr. 5-9 Deformační mechanizmy buněk s různým poloměrem zaoblení při tlakovém ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ) a smykovém ( $45^\circ$ ) zatěžování

Vzhledem k předpokladu, že pro řízení anizotropie mechanických vlastností bude nejvhodnější modifikací geometrie využití proměnné tloušťky stěn, byly pro následující analýzy využity geometrie s optimální hodnotou  $R$  z pohledu rozsahu pseudoelastických deformací, a to  $R = 2,2 \cdot t$ .

## Vliv proměnné tloušťky stěn

Další krok výpočtového modelování byl zaměřen na analýzu vlivu proměnné tloušťky stěn na sledované veličiny. Výchozí geometrie byla modifikována tak, že tloušťka stěny plynule přecházela z nominální hodnoty  $t$  v místech napojení elementárních buněk na zúženou hodnotu  $z$  v oblastech zaoblení rohů. Parametr  $z$ , vyjadřující poměrné zúžení stěny<sup>8</sup>, byl zkoumán v intervalu  $z = (0,25-1) \cdot t$  s krokem  $0,025 \cdot t$ .

### *Rozsah pseudoelastických deformací a deformační mechanismy*

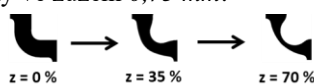
Rozsah pseudoelastických deformací vykazoval, obdobně jako v předchozích případech, částečně inverzní závislost na průběhu  $\sigma_{RED}$  (viz Obr. 5-10). Se zvyšujícím se zúžením byl pozorován nelineární, nemonotónní průběh, přičemž pro každou hodnotu nominální tloušťky  $t$  bylo dosaženo lokálního maxima rozsahu PE deformací.

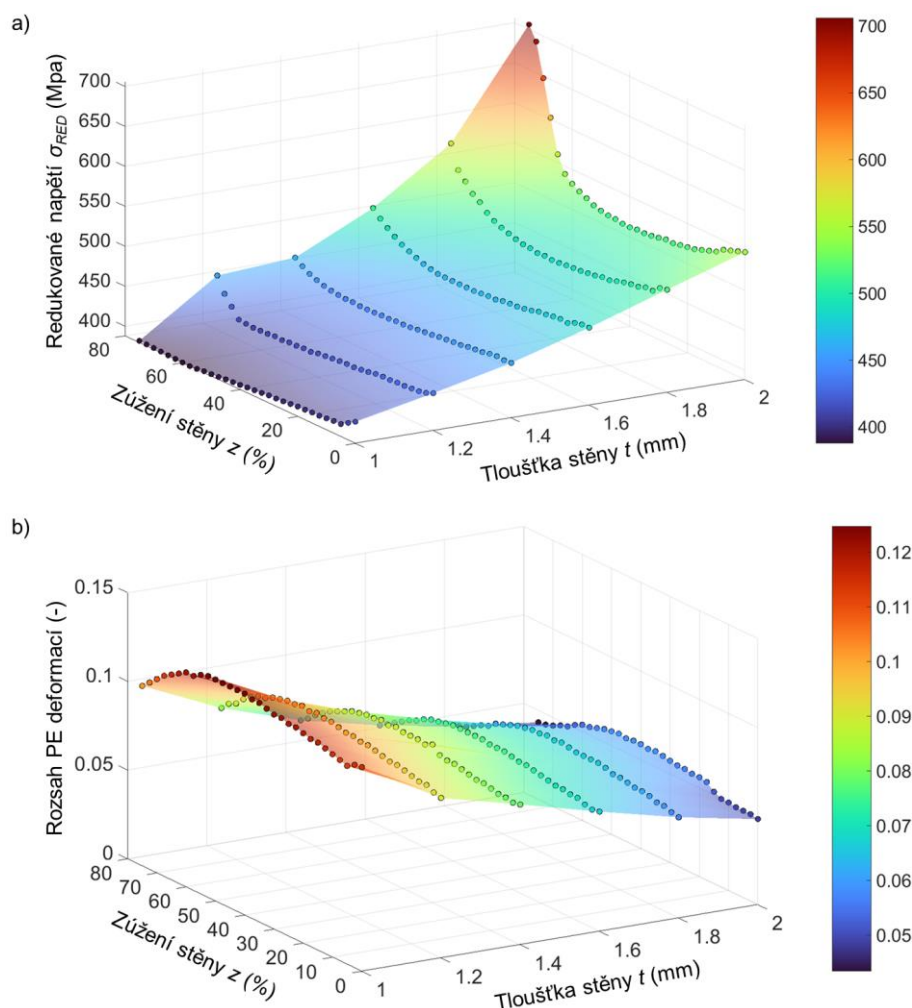
Přestože u některých konfigurací s vysokou hodnotou  $t$  a současně výrazným zúžením stěn docházelo k nárůstu maximálního napětí, tento efekt se neprojevil ve výrazném snížení rozsahu PE deformací. Patrný byl také trend závislosti na tloušťce stěny, kdy snižující se nominální tloušťka  $t$  vedla ke snížení ohybové tuhosti buněk, a tím dosažení vyššího rozsahu PE deformací.

Optimálním zúžením stěny bylo možné navýšit dosažitelný rozsah pseudoelastických deformací o 23 ( $t = 1,0 \text{ mm}$ ) až 35 % ( $t = 2,0 \text{ mm}$ ) oproti minimálním hodnotám, kterých zpravidla dosahovaly konfigurace s nezúženými stěnami.

---

<sup>8</sup> Značení  $z$  je nastaveno způsobem, kdy uvedená hodnota  $z$  značí o kolik procent je stěna zúžena. Například při  $z = 25 \%$  a  $t = 1 \text{ mm}$  je tloušťka stěny ve zúžení  $0,75 \text{ mm}$ .

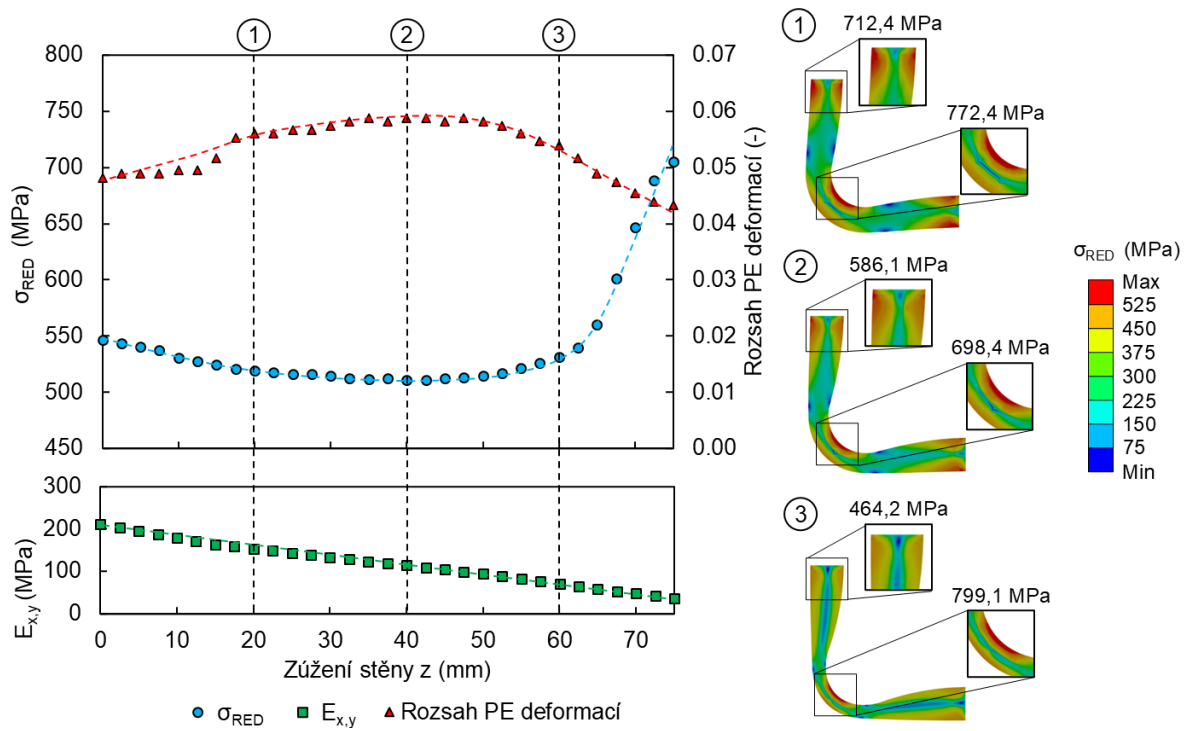




Obr. 5-10 Průběh a) redukovaného napětí a b) rozsahu pseudoelastických deformací v závislosti na tloušťce stěny  $t$  a zúžení stěny  $z$

Analýza rozložení napětí (viz Obr. 5-11) umožnila identifikovat mechanismus odpovědný za výše popsany průběh závislosti. Se zvětšujícím se zúžením stěn  $z$  rostla efektivní velikost poloměru zaoblení na vnitřních a vnějších hranách stěn, což vedlo ke snížení koncentrace napětí v těchto oblastech a přispívalo k rovnoměrnějšímu rozložení napětí. Zároveň menší tloušťka stěn snižovala ohybovou tuhost buňky, čímž docházelo k poklesu její celkové tuhosti. Kombinace těchto jevů vedla k postupnému nárůstu rozsahu PE deformací. Tento trend kulminoval v rozmezí zúžení  $z = 35-45\%$ , kde bylo dosaženo nejnižších hodnot  $\sigma_{RED}$  a nejrovnoměrnější distribuce napětí.

Při větších hodnotách zúžení docházelo k opačnému efektu, kdy se napětí začalo koncentrovat v nejužších místech stěn, zatímco v oblastech s menším zúžením, zejména v okolí středové osy, docházelo k jeho poklesu. To vedlo k celkovému zhoršení rovnoměrnosti napětí a nárůstu jeho maximálních hodnot. Výsledkem byl pokles rozsahu pseudoelastických deformací v těchto konfiguracích.

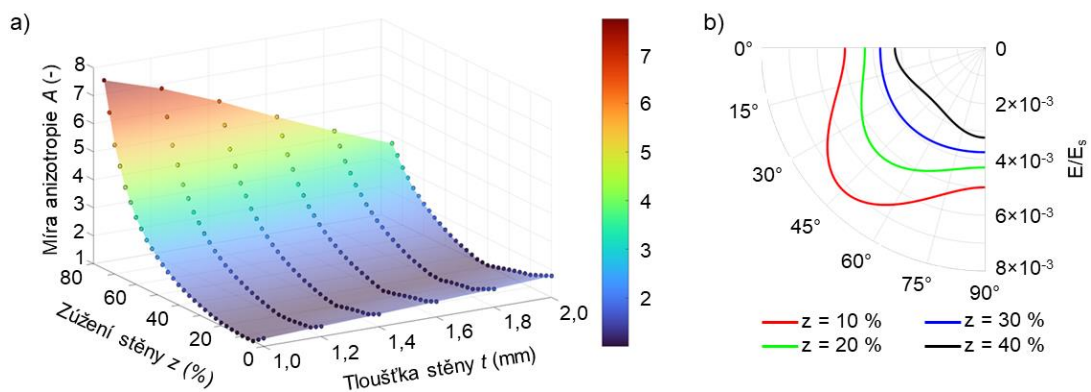


Obr. 5-11 Průběh redukovaného napětí  $\sigma_{RED}$ , modulu pružnosti  $E_{x,y}$  a rozsahu PE deformací na zúžení stěny  $z$  pro  $t = 2 \text{ mm}$

### Anizotropie mechanických vlastností

Míra anizotropie mechanických vlastností vykazovala nelineární a nemonotónní závislost na hodnotě zúžení  $z$  (viz Obr. 5-12). Pro každou nominální tloušťku  $t$  byla identifikována specifická hodnota zúžení, při které buňky vykazovaly izotropní odezvu, tj.  $A \approx 1$ ). Tato hodnota se systematicky posouvala od  $z = 30\%$  ( $t = 2 \text{ mm}$ ) k  $z = 10\%$  ( $t = 1 \text{ mm}$ ).

Podrobnější analýza vlivu zúžení na hodnoty normalizovaného modulu pružnosti  $E/E_s$  odhalila klesající trend se zmenšující se tloušťkou stěny v příslušné oblasti. Současně bylo zřejmé, že úpravou zúžení bylo možné účinně řídit hodnoty modulu pružnosti ve směru  $45^\circ$ , kdy s rostoucím zúžením docházelo ke snížení ohybové tuhosti buňky v tomto směru, čímž se vyrovnávala směrová mechanická odezva.



Obr. 5-12 a) Průběh míry anizotropie  $A$  v závislosti na tloušťce stěny  $t$  a zúžení stěny  $z$ ; b) Směrová odezva modulu pružnosti pro  $t = 2 \text{ mm}$

Vzhledem k tomu, že rozsah pseudoelastických deformací vykazoval poměrně plochou závislost na hodnotách zúžení stěn, byly pro další analýzy zvoleny hodnoty  $z$ , při kterých buňky vykazovaly izotropní odezvu mechanických vlastností (viz Tab. 5-1).

Tab. 5-1 Hodnoty poloměru zaoblení  $R$  a zúžení stěny  $z$  pro dosažení izotropních mechanických vlastností

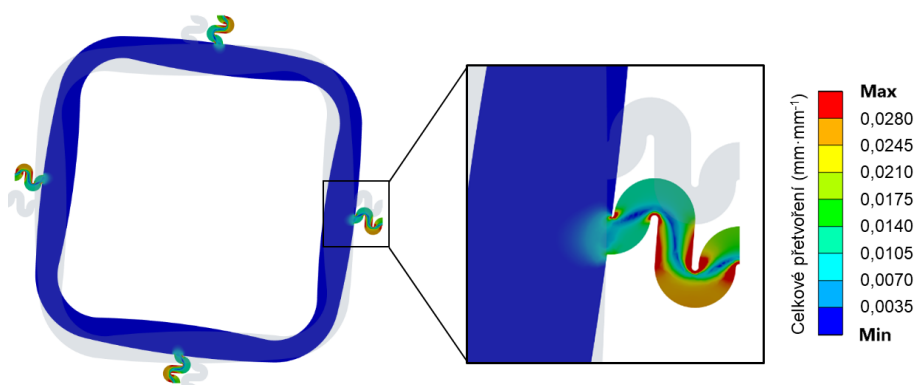
Tloušťka stěny $t$ (mm)	Poloměr zaoblení $R = 2,2 \cdot t$ (mm)	Zúžení stěny $z$ (%)
2,0	4,40	30,0
1,8	3,96	25,0
1,6	3,52	25,0
1,4	3,08	20,0
1,2	2,64	17,5
1,0	2,20	10,0

### Vliv geometrie spojů elementárních buněk

Dále byla provedena analýza vlivu geometrie spojů buněk s cílem stanovit, jakým způsobem ovlivňují rozsah pseudoelastických deformací a míru anizotropie mechanických vlastností. Testovány byly dvě varianty spojení: n-shaped spoje a přímé napojení buněk.

#### N-shaped spoje

Analýza n-shaped spojů ukázala, že n-shaped spoje nejsou pro daný typ aplikace vhodné. Deformace i napětí se koncentrovaly téměř výhradně v oblasti spoje, zatímco tělo buňky zůstávalo prakticky nevyužité (viz Obr. 5-13). Tato lokalizace zatížení vedla ke ztrátě stability buněk a zásadně narušila očekávaný mechanismus pseudoelastické deformace v těle buňky.

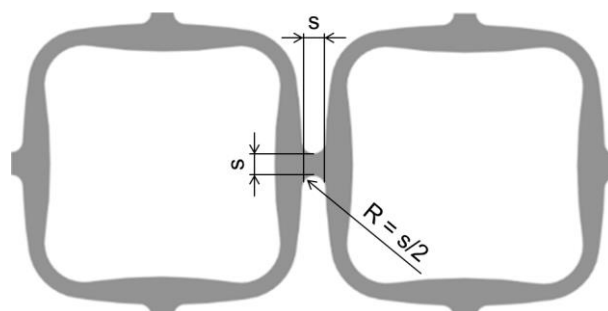


Obr. 5-13 Rozložení celkového přetvoření a ztráta stability při využití n-shaped spojů

Na základě těchto zjištění bylo od použití n-shaped spojů upuštěno a byla provedena analýza varianty s přímým napojením buněk, u které bylo očekáváno rovnoměrnější rozložení zatížení a stabilnější mechanická odezva.

## Přímé napojení buněk

Při přímém napojení buněk byla analyzována kombinace nominální tloušťky stěn v rozsahu  $t = 1,0-2,0 \text{ mm}$  a šířka spoje v rozsahu  $s = 0,5-2,0 \text{ mm}$  s krokem  $0,1 \text{ mm}$ . Geometrie a rozměry spojů byly odvozena od hodnoty  $s$  a jsou znázorněny na Obr. 5-14.



Obr. 5-14 Geometrie a rozměry přímého napojení buněk

### *Rozsah pseudoelastických deformací a deformační mechanismy*

Vzhledem k tomu, že v této fázi již byla posuzována kompletní geometrie buňky, bylo zavedeno nové kritérium pro omezení rozsahu PE deformací, a to okamžik kontaktu stěn sousedních buněk. Výsledná hodnota rozsahu byla stanovena na základě kritéria, k jehož naplnění došlo dříve (lokální výskyt plně martenzitické fáze nebo kontakt stěn).

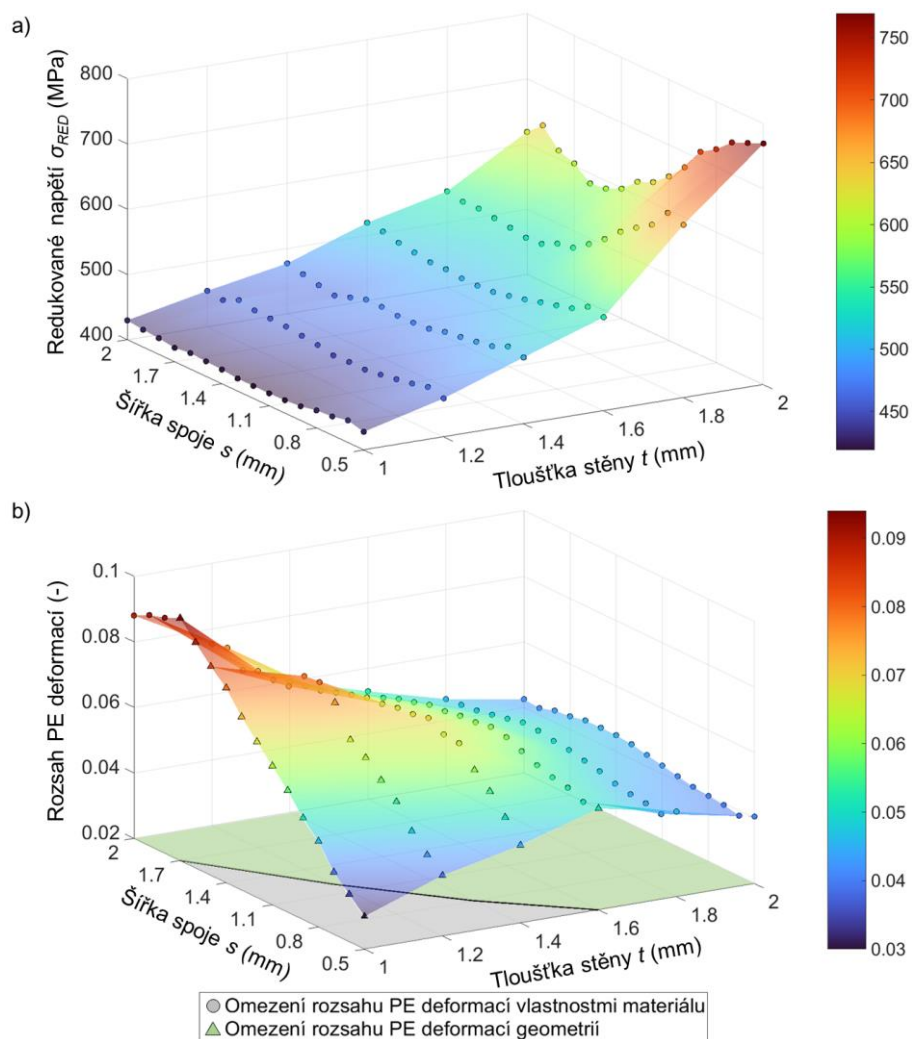
Rozsah pseudoelastických deformací vykazoval nelineární, nemonotónní závislost na šířce spoje  $s$ , přičemž průběh byl opět částečně inverzní k průběhu redukovaného napětí  $\sigma_{RED}$ . Zároveň byl pozorován rostoucí trend se snižující se tloušťkou stěny  $t$  (viz Obr. 5-15).

Konfigurace s menší nominální tloušťkou stěn ( $t < 1,6 \text{ mm}$ ) vykazovaly výrazné snížení ohybové tuhosti buněk, což v kombinaci se spoji menších šířek vedlo ke kontaktu stěn buněk ještě před lokálním dosažením plně martenzitické fáze. Z grafického vyhodnocení je zřejmé, že naplnění tohoto kritéria vedlo k výraznému omezení rozsahu PE deformací.

Optimalizací velikosti spoje bylo možné navýšit rozsah pseudoelastických deformací až o 11 % v případech, kdy byl omezen kritériem lokálního dosažení plně martenzitické fáze ( $t = 2,0 \text{ mm}$ ), a až o 213 % v případech, kdy byl omezen kritériem kontaktu stěn ( $t = 1,0 \text{ mm}$ ). Vlivem přidání spojů<sup>9</sup> taktéž došlo k omezení rozsahu pseudoelastických deformací průměrně o 24 % oproti konfiguracím bez uvažovaných spojů.

---

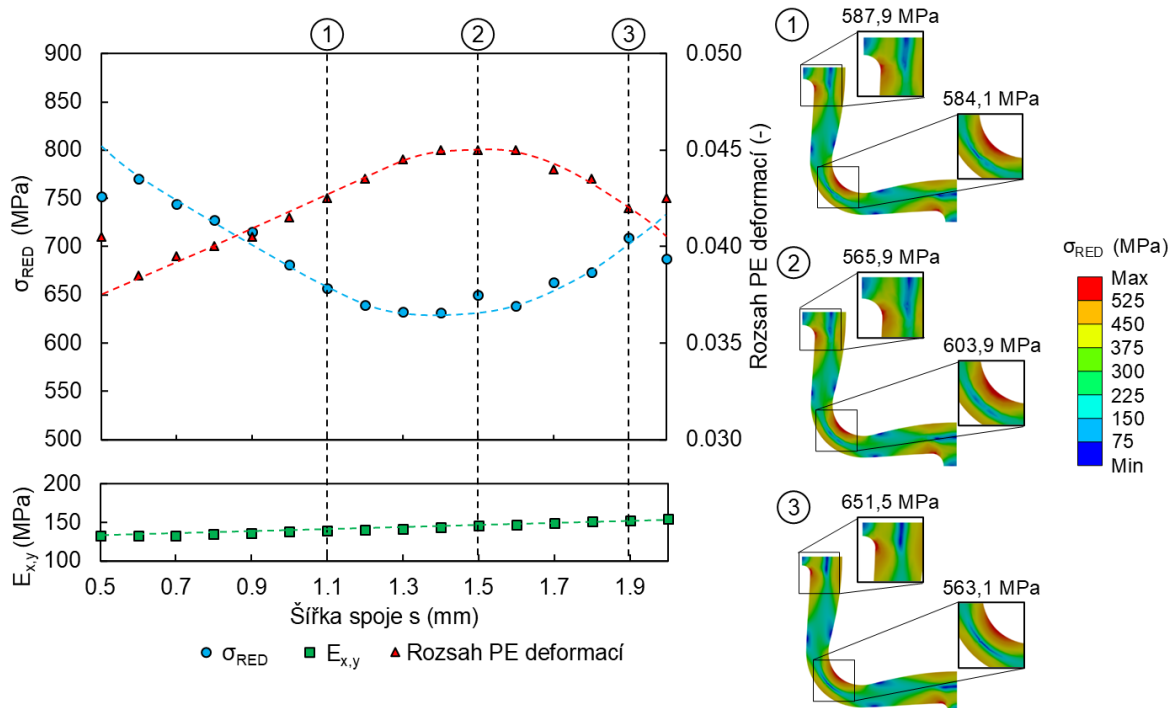
<sup>9</sup> Při uvažování spojů optimální šířky



Obr. 5-15 Průběh a) redukovaného napětí a b) rozsahu PE deformací v závislosti na tloušťce stěny  $t$  a šířce spoje  $s$

Analýza rozložení redukovaného napětí  $\sigma_{RED}$  a deformačních mechanismů ukázala, že spoje s malou šířkou působili jako koncentrátoři napětí, což vedlo k nárůstu  $\sigma_{RED}$  a následnému omezení rozsahu pseudoelastických deformací. Naopak s rostoucí šířkou spoje  $s$  docházelo ke snižování koncentrace napětí v oblasti spoje a rovnoměrnějšímu rozložení napětíového pole, což vedlo ke zvýšení dosažitelného rozsahu PE deformací. Tento trend pokračoval až do okamžiku dosažení optimální šířky spoje, při které došlo k vyrovnání hodnot napětí v oblastech spojů a oblastech zaoblení. Tím bylo dosaženo nejrovnoměrnějšího rozložení napětí v rámci celé buňky.

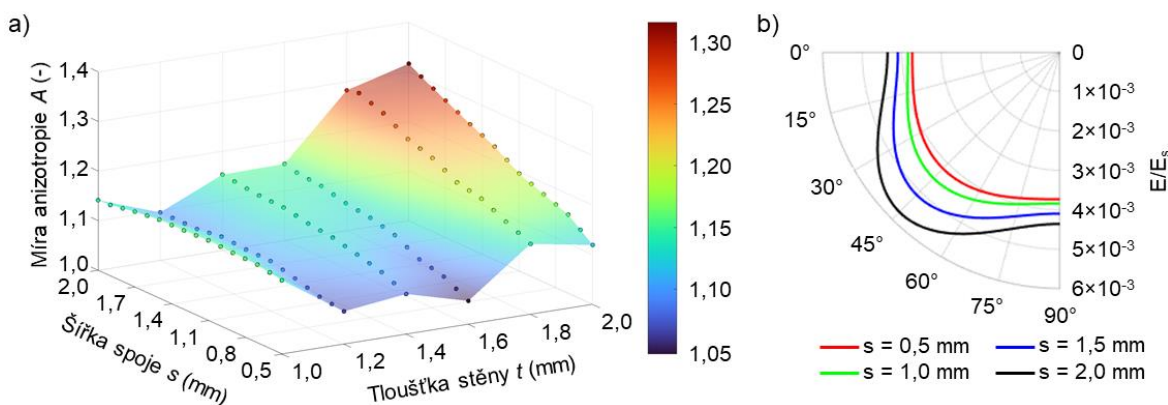
Při dalším zvětšování šířky spojů však docházelo ke zvýšení ohybové tuhosti buňky, v důsledku čehož se maximum napětí přesunulo do oblasti zaoblení. To vedlo ke zhoršení rovnoměrnosti rozložení napětíového pole, zvýšení celkové tuhosti buňky a způsobilo opětovný pokles dosažitelného rozsahu PE deformací (viz Obr. 5-16).



Obr. 5-16 Průběh závislosti  $\sigma_{RED}$ , modulu pružnosti  $E_{x,y}$  a rozptylu PE deformací na šířce spoje pro  $t = 2 \text{ mm}$

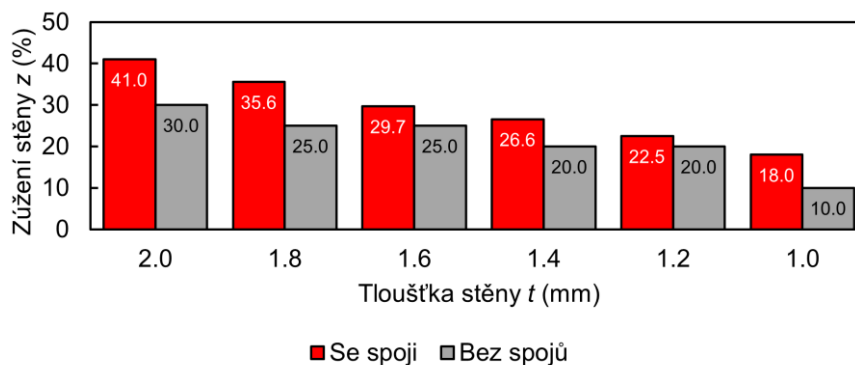
### Anizotropie mechanických vlastností

Z pohledu anizotropie bylo zjištěno, že přítomnost spojů způsobovala mírný nárůst míry anizotropie mechanických vlastností ve srovnání s konfiguracemi bez uvažovaných spojů. V závislosti na nominální tloušťce stěny byl tento nárůst 2-12,5 % v případě  $s = 0,5 \text{ mm}$ , respektive 11,5-21,1 % v případě  $s = 2,0 \text{ mm}$ . To bylo způsobeno tím, že s rostoucí šířkou spoje docházelo k omezení ohybově dominantní deformace stěn při smykovém zatěžování, což vedlo k nárůstu tuhosti ve směru 45° (viz Obr. 5-17b). Tento efekt byl výraznější u buněk s větší nominální tloušťkou stěn. U tlouštěk  $t = 1,4-2,0 \text{ mm}$  rostla míra anizotropie s rostoucí šířkou spoje, zatímco pro  $t = 1,0$  a  $1,2 \text{ mm}$  byla míra anizotropie prakticky konstantní bez ohledu na šířku spoje.



Obr. 5-17 a) Průběh míry anizotropie  $A$  v závislosti na tloušťce stěny  $t$  a šířce spoje  $s$ ; b) Směrová odezva modulu pružnosti pro  $t = 2 \text{ mm}$

Na základě těchto poznatků byly pro každou hodnotu  $t$  vybrány ideální hodnoty  $s$  na základě nejvyšších hodnot rozsahu pseudoelastických deformací. Pro tyto parametry bylo následně modifikováno zúžení stěny  $z$  tak, aby bylo dosaženo plně izotropní odezvy mechanických vlastností elementárních buněk. Porovnání vlivu spojů na požadované hodnoty zúžení stěn vedoucí k dosažení izotropní odezvy mechanických vlastností je znázorněno na Obr. 5-18.



Obr. 5-18 Vliv spojů na hodnoty zúžení stěn pro dosažení izotropních mechanických vlastností

#### Vliv velikosti elementární buňky

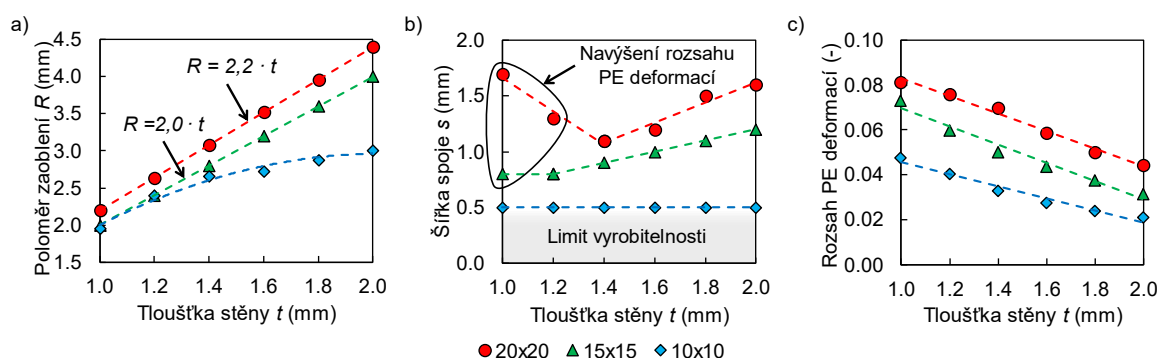
V přechozích částech výpočtového modelování byl vliv parametrů geometrie hodnocen na základě analýz elementárních buněk o rozměrech  $20 \times 20$  mm. Cílem této části bylo stanovit, jak velikost buňky, respektive poměr její velikosti  $a$  ku nominální tloušťce stěny  $t$ , ovlivňuje rozsah pseudoelastických deformací, deformační mechanismy a optimální hodnoty sledovaných geometrických parametrů.

Porovnávají konfigurace buněk o rozměrech  $20 \times 20$ ,  $15 \times 15$  a  $10 \times 10$  mm v kombinaci s nominální tloušťkou stěn v rozsahu  $t = 1,0-2,0$  mm. V případě velikosti poloměru zaoblení a šířky spojů byly optimální hodnoty určovány na základě maximálního dosažitelného rozsahu PE deformací, zatímco v případě zúžení stěny byly jako optimální označeny takové hodnoty, které vedly k izotropní odezvě mechanických vlastností.

#### Rozsah pseudoelastických deformací

Velikost buňky ve vztahu k tloušťce stěny měla zásadní vliv na dominantní deformační režim a celkovou mechanickou odezvu. Buňky s vyšším poměrem  $a/t$  vykazovaly kombinovaný ohybově-tlakový režim deformace, což vedlo ke snížení ohybové tuhosti buňky a umožnilo dosažení většího rozsahu PE deformací. S klesajícím poměrem  $a/t$  docházelo k postupnému omezení ohybové složky deformace stěn a přechodu na tlakově dominantní režim deformace, což se projevilo zvýšením jejich celkové tuhosti a poklesem dosažitelného rozsahu PE deformací (viz Obr. 5-19c).

Převládající tlaková deformace stěn vedla ke globálnímu nárůstu  $\sigma_{RED}$  v celém průřezu buněk. V těchto případech došlo ke snížení vlivu lokálních koncentrací napětí v oblastech zaoblení (viz Obr. 5-20) a nejrovnoměrnějšího rozložení napětíového pole bylo dosaženo při menších hodnotách poloměru zaoblení  $R$  (viz Obr. 5-19a).

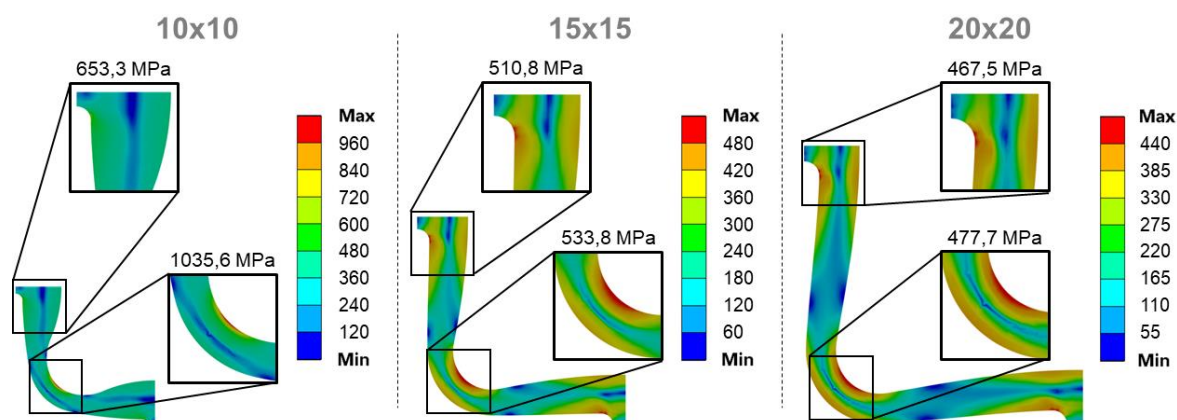


Obr. 5-19 Vliv velikosti buňky; a) optimální hodnoty  $R$ ; b) optimální hodnoty  $s$ ; c) rozsah PE deformací

Zvyšující se tuhost buňky a přechod k tlakově dominantnímu deformačnímu režimu měly přímý vliv také na optimální hodnotu šířky spoje  $s$ , která s klesajícím poměrem  $a/t$  systematicky klesala (viz Obr. 5-19b). Také v tomto případě vedly globálně vyšší hodnoty napětí ke snížení vlivu jeho lokálních koncentrací v oblastech spojů a nejrovnoměrnějšího rozložení napětíového pole bylo proto dosaženo při menších hodnotách  $s$ .

Pokud by bylo při vyhodnocování rozsahu pseudoelastických deformací zohledněno pouze první kritérium – tj. lokální dosažení plně martenzitické fáze – vykazovala optimální šířka spoje monotónně rostoucí závislost s větší  $t$  napříč všemi velikostmi buněk. V případě větší velikosti buněk v kombinaci s menšími  $t$  však docházelo k omezení rozsahu PE deformací v důsledku druhého kritéria – kontaktu stěn. Tento jev si vyžádal navýšení optimálních hodnot  $s$  u těchto konfigurací, aby ke kontaktu stěn nedocházelo předčasně.

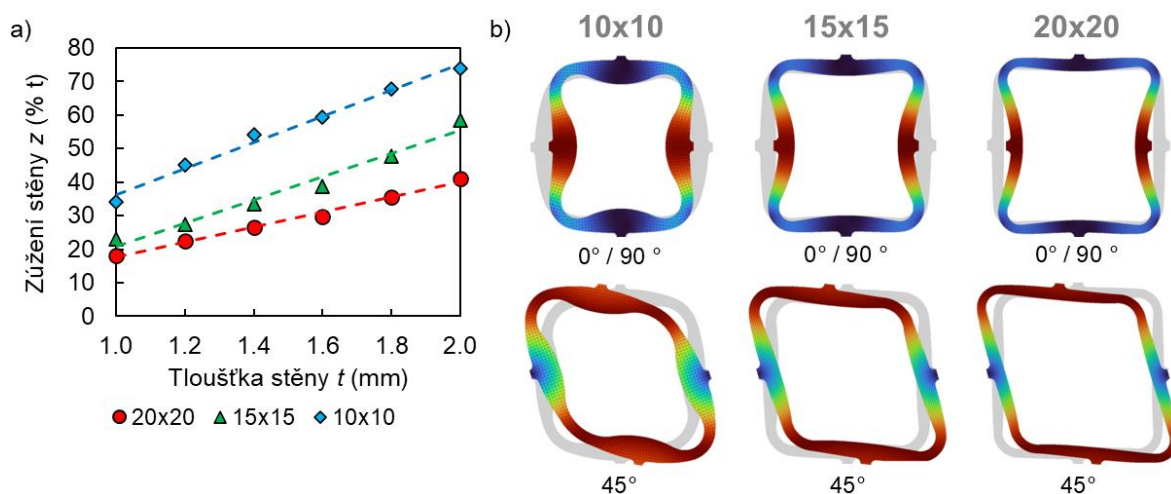
U buněk o rozměru  $10 \times 10$  mm vyplývalo z kombinovaného působení obou kritérií, že by optimální šířka spoje měla být nižší než  $0,5$  mm. V jejich případě proto musela být minimální šířka omezena stanoveným limitem vyrobitelnosti na  $s = 0,5$  mm.



Obr. 5-20 Vliv velikosti buňky na rozložení redukovaného napětí ( $t = 1,4$  mm)

## Anizotropie mechanických vlastností

Obdobně jako v případě rozsahu pseudoelastických deformací byla také směrová odezva mechanických vlastností výrazně ovlivněna změnou deformačního režimu stěn v závislosti na poměru  $a/t$ . S klesajícím poměrem docházelo k omezení ohybové složky deformace, což vedlo k přechodu na tahově dominantní režim deformace stěn při smykovém zatěžování (viz Obr. 5-21b). Tento jev měl přímý vliv na nárůst směrové tuhosti a tím i zvýšení míry anizotropie. Pro dosažení shodného deformačního režimu při jednoosém tlakovém a smykovém zatěžování, a tím izotropní odezvy, bylo nutné provést kompenzaci tohoto efektu prostřednictvím většího zúžení stěn  $z$ , jehož hodnoty s klesajícím poměrem  $a/t$  monotónně rostly (viz Obr. 5-21a).



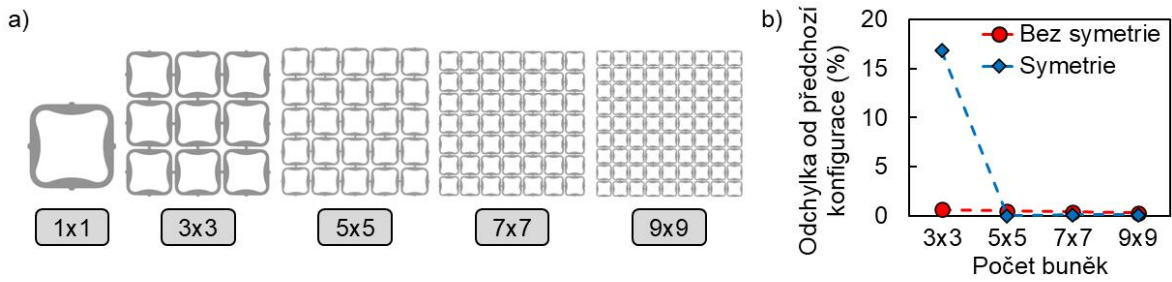
Obr. 5-21 Vliv velikosti buňky; a) optimální hodnota zúžení stěny; b) deformace při tlakovém a smykovém zatěžování ( $t = 1,4 \text{ mm}$ )

### 5.1.2 Fáze II – Analýza metamateriálů

Na základě výsledků první fáze výpočtového modelování byly pro každou kombinaci testované velikosti buněk a nominální tloušťky stěn sestaveny elementární buňky s optimálními parametry geometrie. Z těchto buněk byly následně vytvořeny reprezentativní metamateriály, jejichž mechanická odezva byla dále podrobena detailní analýze.

#### Stanovení minimálního počtu buněk

Výsledky analýz s využitím čtvrtinové symetrie ukázaly, že metamateriál o velikosti 3x3 buněk vykazoval odchylku sledované veličiny 16,8 % oproti konfiguraci tvořené jedinou buňkou (viz Obr. 5-22b). Při dalším navýšení počtu buněk již odchylka klesla pod 1 %. Při analýze bez využití symetrie byla odchylka již pro uspořádání 3x3 buněk nižší než 1 %, což indikovalo dostatečnou reprezentativnost této konfigurace. S ohledem na konzervativní přístup a zajištění robustnosti výstupů však byl pro všechny následující analýzy použit metamateriál o velikosti 5x5 buněk.



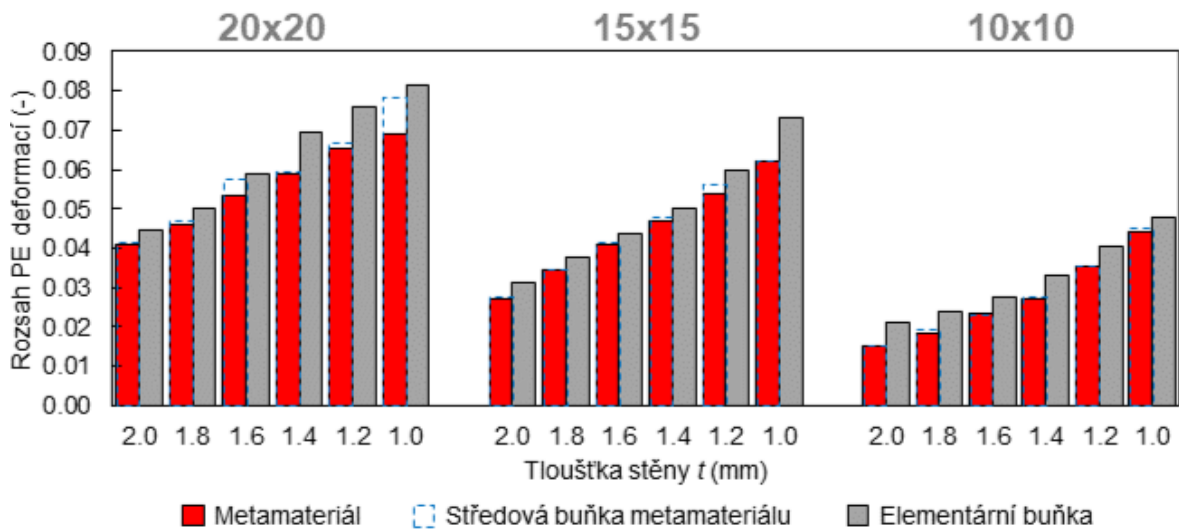
Obr. 5-22 a) Deformace metamateriálu; b) Odchylka sledované veličiny od předchozí konfigurace

### Rozsah pseudoelastických deformací a stabilita pseudoelastické deformace

Testované metamateriály byly nejprve hodnoceny jako celek. Při tomto vyhodnocení dosahovaly průměrně o 12 % nižšího rozsahu pseudoelastických deformací ve srovnání s výsledky elementárních buněk shodné geometrie, testovaných samostatně. Tuto odchylku lze přičíst vlivu hraničního efektu.

Následně byly analyzovány pouze středové buňky uvnitř metamateriálů, které lze považovat za neovlivněné hraničním efektem. Zde bylo ve většině případů dosaženo podobných hodnot rozsahu pseudoelastických deformací, jakých metamateriály dosahovaly jako celek, což potvrzuje obecně nižší míru ovlivnění hraniční efektem. Větší odchylky byly zaznamenány pouze pro metamateriály tvořené buňkami o rozměrech 20x20 mm, kdy největší zaznamenaný rozdíl činil 13,6 % (viz Obr. 5-23).

Tyto odchylky byly způsobeny tím, že k lokálnímu dosažení plně martenzitické fáze docházelo nejprve v krajních či rohových buňkách metamateriálu, jejichž průběh deformace byl ovlivněn působením hraničního efektu.

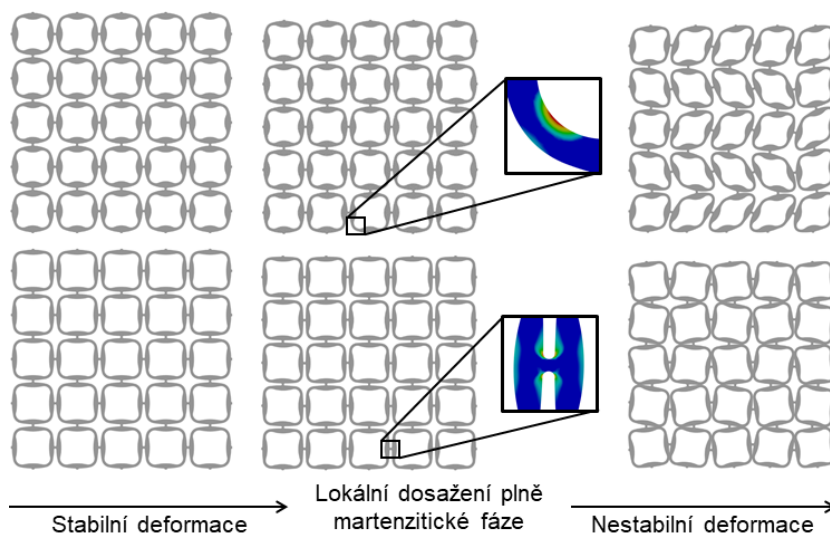


Obr. 5-23 Rozsah pseudoelastických deformací metamateriálů v porovnání s výsledky testování elementárních buněk

Většina metamateriálů vykazovala stabilní průběh pseudoelastické deformace s rovnoměrnou deformací všech buněk. Výjimku tvořily konfigurace s rozměry buněk  $10 \times 10 \text{ mm}$  a nominální tloušťkou stěn  $t = 1,8$  a  $2,0 \text{ mm}$ , u nichž došlo k výskytu nestabilit ještě před dosažením limitu pseudoelastické deformace. V obou případech byla jako příčina této nestability identifikována kombinace buněk vysoké tuhosti spolu se spoji příliš malé šířky a malou tloušťkou stěn ve zúžených oblastech. U obou metamateriálů byl poměr šířky spojů a tloušťky stěn ve zúžených oblastech k nominální tloušťce stěn menší než  $0,3$ , což lze považovat za kritickou hranici pro vznik předčasné ztráty stability. Navzdory těmto nestabilitám však nebyl významně ovlivněn dosažený rozsah pseudoelastických deformací.

U ostatních metamateriálů bylo pozorováno, že nestabilní deformace nastupovala až po překročení limitu rozsahu pseudoelastické deformace, kdy v určitých oblastech došlo k lokálnímu nárůstu tuhosti v důsledku výskytu plně martenzické fáze. To vedlo k narušení kontinuity deformace a vzniku lokálních nestabilit, které lze rozdělit na dva typy (viz Obr. 5-24):

- Nestabilita vlivem zúžení stěn, ke které docházelo v případech, kdy tloušťka stěn v oblastech zúžení byla menší než šířka spoje – v takovém případě docházelo k lokálnímu přetížení a selhání nejtěsnějšího úseku stěny.
- Nestabilita vlivem spojů, která nastávala, pokud byla šířka spojů menší než tloušťka stěn ve zúžených oblastech – to vedlo k lokálnímu přetížení a selhání spojů buněk.

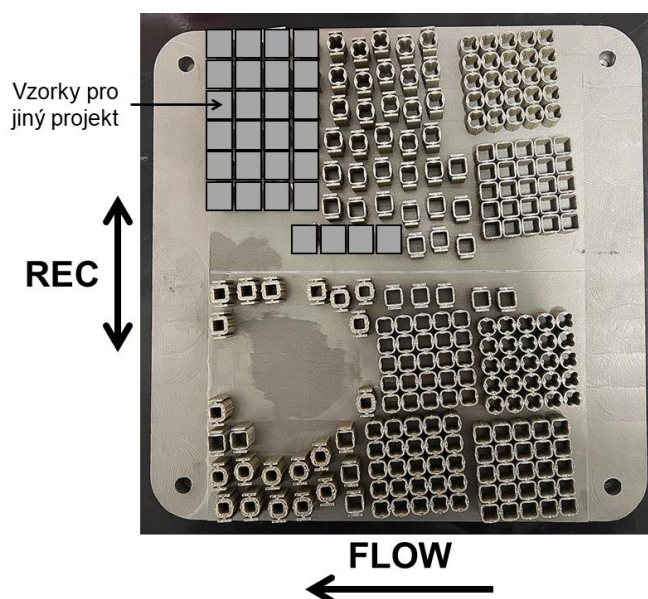


Obr. 5-24 Ztráta stability metamateriálu vlivem lokálního dosažení plně martenzické fáze

Výjimku představoval metamateriál tvořený buňkami o rozměru  $15 \times 15 \text{ mm}$  s nominální tloušťkou stěn  $t = 1,4 \text{ mm}$ , který vykazoval stabilní průběh deformace i po překročení limitu pseudoelastické deformace. Jeho stabilita pravděpodobně souvisela s tím, že tloušťka stěn ve zúžených oblastech byla téměř shodná se šířkou spojů, a tedy nedocházelo k lokálnímu přetížení izolované oblasti.

## 5.2 Výsledky experimentálního testování

### 5.2.1 Vyrobené vzorky



Obr. 5-25 Vyrobené vzorky se zaznačeným směrem pohybu recoateru (REC) a proudění atmosféry (FLOW)

U vyrobených vzorků byla provedena kontrola rozměrové přesnosti, kdy byly kontrolovány velikost buňky, nominální tloušťka stěn, tloušťka stěn ve zúžení a šířka spojů. Porovnání průměrných naměřených hodnot s odpovídajícími rozměry CAD modelů jsou uvedeny v Tab. 5-2. Kompletní přehled rozměrů jednotlivých vzorků je poté uveden v Příloze B.

Tab. 5-2 Průměrné odchylky skutečných rozměrů vzorků

<b>Rozměr</b>	<b>Odchylka (%)</b>
Velikost buňky	$-1,03 \pm 0,82$
Nominální tloušťka stěny	$-7,37 \pm 2,92$
Tloušťka stěny ve zúžení	$-11,24 \pm 4,07$
Šířka spoje	$0,09 \pm 5,86$

## 5.2.2 Fáze I – Vliv architektury elementární buňky

Testované vzorky vykazovaly během zatěžování odlišný průběh smluvního napětí, než bylo předpokládáno na základě výpočtového modelování, kdy vzorky dosahovaly obecně vyšších hodnot smluvního napětí. Při následném odtížení poté průběh smluvního napětí netvořil zřetelnou hysterezní smyčku, typickou pro superelastické materiály (viz Obr. 5-26, Obr. 5-29 a Obr. 5-32). U vzorků zatěžovaných do porušení byl sice pozorován předpokládaný pokles nárůstu smluvního napětí, avšak k porušení vzorků podstatně dříve, než předpokládal výpočtový model.

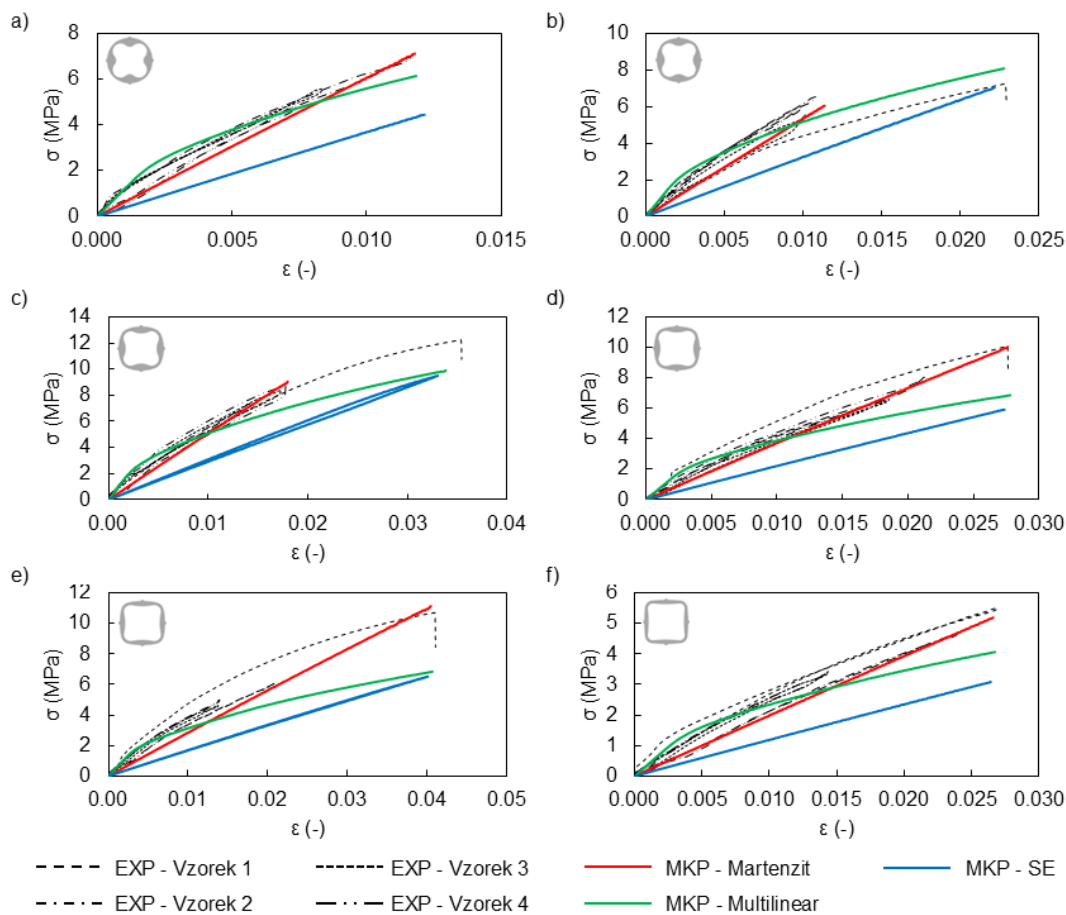
Verifikační analýzy ukázaly, že testované vzorky nevykazovaly odezvu odpovídající superelastickému modelu, ale průběh smluvního napětí odpovídal spíše materiálu s mechanickými vlastnostmi plně martenzitické fáze.

Tato změna materiálových vlastností, který zřejmě nevykazoval superelastické chování, se promítla také do výsledků zbytkových deformací, které nevykazovaly žádnou zřetelnou závislost na geometrii vzorků. Hodnoty zbytkové deformace byly relativně náhodně a taktéž mezi vzorky se stejnou geometrií nebyla pozorována uspokojivá opakovatelnost (viz Obr. 5-27d, Obr. 5-30d a Obr. 5-33d).

V průběhu testování bylo dále zjištěno, že přítomnost vůlí v testovacím zařízení vedla k nestejně deformaci jednotlivých vzorků. Odchytky se výrazněji projeví především u vzorků s vyšší tuhostí. Navzdory těmto odchylkám bylo u testovaných vzorků dosaženo dobré opakovatelnosti a odlišné hodnoty deformace tak neměly zásadní vliv na získané výsledky.

Verifikační analýzy provedené s nekorigovanými rozměry ukázaly výrazný vliv odchylky skutečných rozměrů od nominálních rozměrů CAD modelů na hodnoty modulu pružnosti buněk v tlaku. Oproti vzorkům s korigovanou geometrií byl pozorován nárůst hodnot modulu pružnosti průměrně o 50,4 %. Výrazně menší vliv poté měly odchylky rozměrů na hodnoty Poissonova poměru, kde byl pozorován pokles průměrně o 1,5 % oproti vzorkům s korigovanou geometrií (viz Obr. 5-27b, c; Obr. 5-30b, c a Obr. 5-33b, c).

## Buňky s optimálními parametry



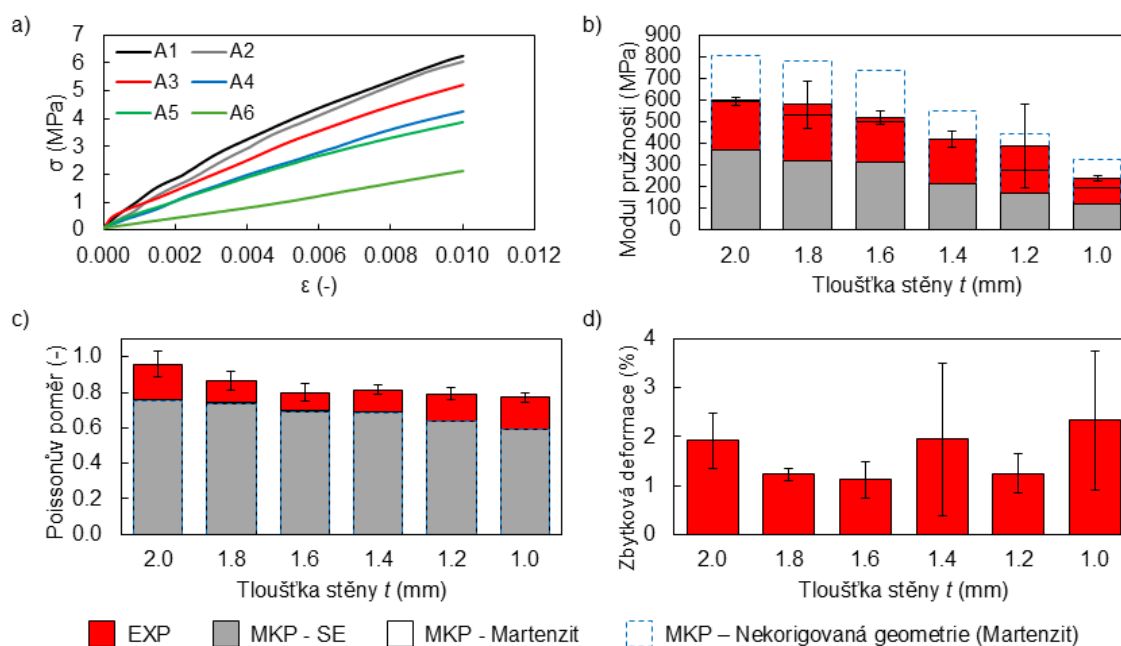
Obr. 5-26 Průběh smluvního napětí; a)  $t = 2,0 \text{ mm}$ ; b)  $t = 1,8 \text{ mm}$ ; c)  $t = 1,6 \text{ mm}$ ; d)  $t = 1,4 \text{ mm}$ ; e)  $t = 1,2 \text{ mm}$ ; f)  $t = 1,0 \text{ mm}$ <sup>10</sup>

Průběhy smluvního napětí (viz Obr. 5-27a) a závislosti modulu pružnosti buněk v tlaku na nominální tloušťce stěn  $t$  (viz Obr. 5-27b) potvrdily očekávanou klesající závislost obou veličin s klesající hodnotou  $t$ . S výjimkou vzorků s nominální tloušťkou stěn  $t = 1,2 \text{ mm}$ , u nichž byla zaznamenána vysoká směrodatná odchylka, vykazovaly experimentálně zjištěné hodnoty modulů pružnosti dobrou shodu s výsledky verifikačních analýz.

V případě Poissonova poměru byla rovněž pozorována klesající závislost s klesající hodnotou  $t$ , avšak byly zaznamenány částečné odchylky od výsledků verifikační úlohy, kdy simulace predikovaly nižší hodnoty Poissonova poměru v celém rozsahu  $t$  (viz Obr. 5-27c). Tyto odchylky mohly být způsobeny nepřesnou korekcí odchylek skutečných rozměrů, která vycházela z měření v izolovaných bodech.

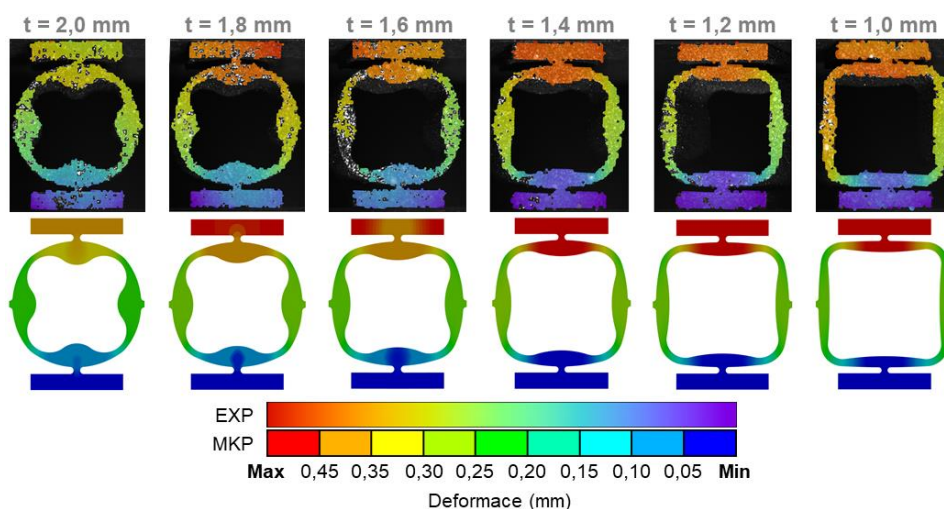
<sup>10</sup> V případě vzorku s nominální tloušťkou stěny  $t = 2 \text{ mm}$  zatěžovaném do porušení chybí data z DIC, tudíž tento vzorek nemohl být vyhodnocen. V případě vzorku s nominální tloušťkou stěny  $t = 1 \text{ mm}$  zatěžovaném do porušení poté nedošlo k porušení vzorku.

Klesající závislost modulu pružnosti byla způsobena nižší tuhostí buněk s klesající  $t$ , kdy tyto geometrie umožňovaly vyšší míru ohybové deformace stěn orientovaných kolmo na směr zatěžování. Tím docházelo k menšímu vybočení vertikálních stěn, což mělo za následek nižší hodnoty příčného pretvoření buněk.



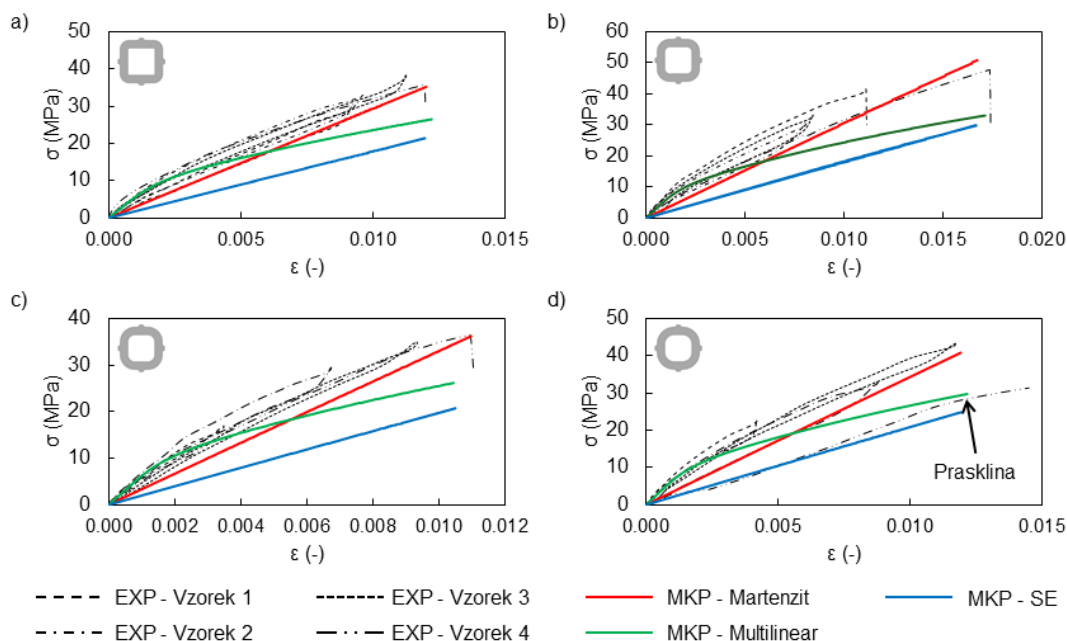
Obr. 5-27 Srovnání měřených veličin – buňky s optimálními parametry

Výše popsané deformační mechanismy jsou patrné ze srovnání deformačních map na Obr. 5-28. U buněk s větší nominální tloušťkou stěn  $t$  docházelo, v důsledku výraznějšího rozdílu mezi nominální a zúženou tloušťkou, k lokalizaci deformace převážně do zúžených oblastí, což vedlo k většímu vybočení vertikálních stěn. S klesající hodnotou  $t$  se deformace rovnoměrněji rozložila napříč celými horizontálními stěnami, což vedlo k účinnějšímu využití ohybové deformace, lepšímu rozložení napětového pole a taktéž k menšímu vybočení vertikálních stěn.



Obr. 5-28 Srovnání deformačních map – buňky s optimálními parametry; experiment (nahore) a MKP (dole)

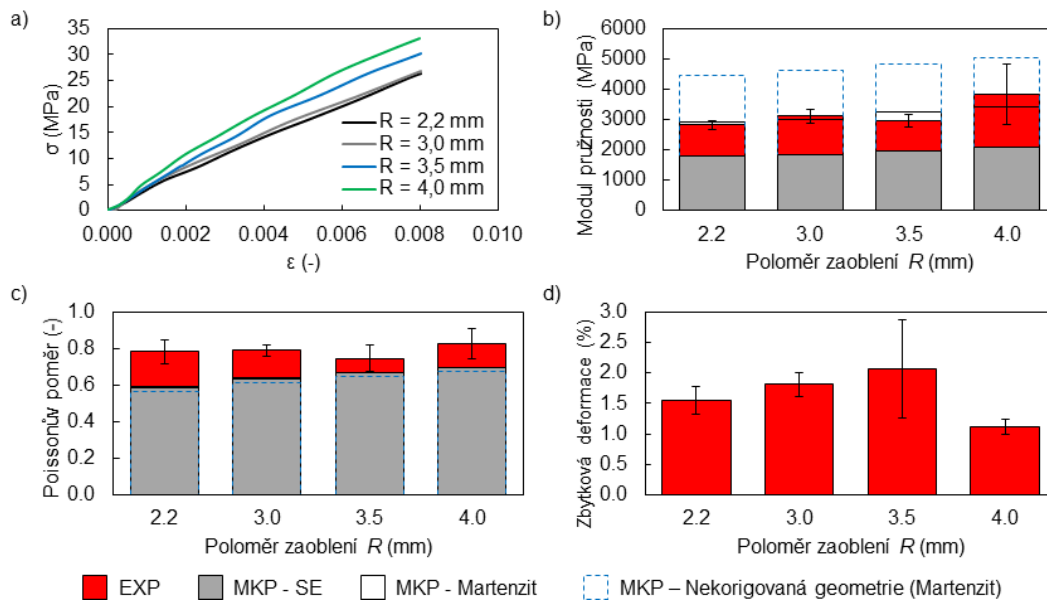
## Vliv velikosti poloměru zaoblění



Obr. 5-29 Průběh smluvního napětí; a)  $R = 2,2 \text{ mm}$ ; b)  $R = 3,0 \text{ mm}$ ; c)  $R = 3,5 \text{ mm}$ ; d)  $R = 4,0 \text{ mm}$

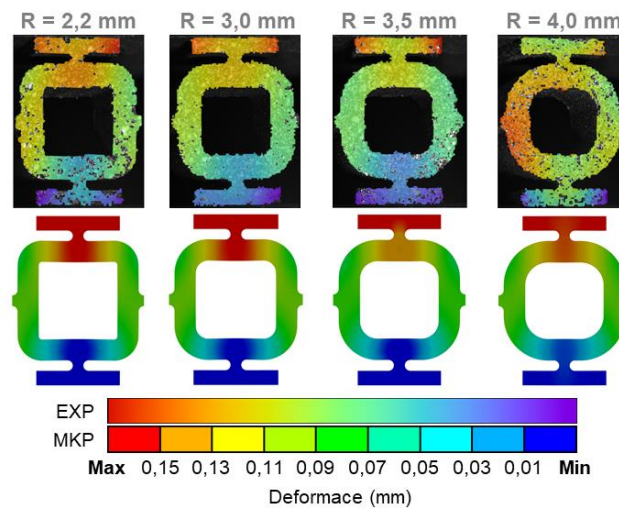
Ze vzájemného porovnání jednotlivých konfigurací vyplývá, že velikost poloměru zaoblění měla vliv na celkovou tuhost buňky, kdy s rostoucím  $R$  docházelo k mírnému nárůstu smluvního napětí (viz Obr. 5-30a) a modul pružnosti buněk (viz Obr. 5-30b). Tento vliv byl však ve srovnání s ostatními parametry relativně nízký, kdy rozdíl mezi moduly pružnosti konfigurací s  $R = 2,2 \text{ mm}$  a  $R = 4,0 \text{ mm}$  činil 26,2 %. Experimentálně získané hodnoty modulu pružnosti taktéž vykazovaly dobrou shodu s výsledky verifikačních analýz.

Naopak horší shoda experimentálních výsledků a verifikačních analýz byla pozorována při porovnání hodnot Poissonova poměru, kdy experimentálně získané hodnoty byly až o 25 % vyšší, a to především u vzorků s malým poloměrem zaoblění  $R$  (viz Obr. 5-30c). Zatímco Poissonův poměr experimentálně testovaných vzorků nevykazoval výrazný trend s ohledem na velikost  $R$ , jeho hodnoty dle verifikační analýzy vykazovaly mírný růst s rostoucím  $R$ .



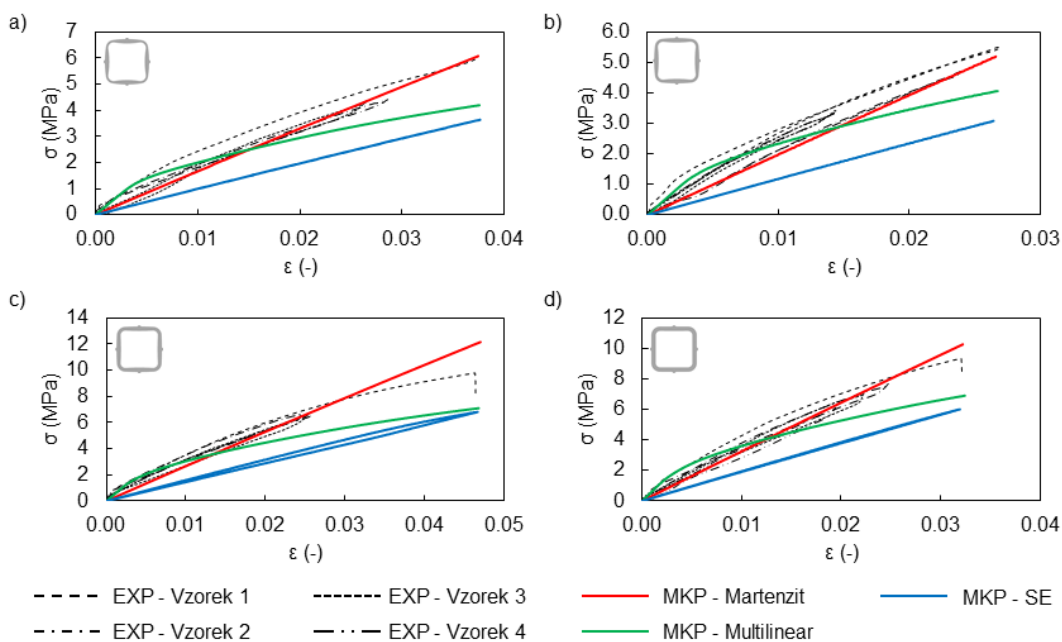
Obr. 5-30 Srovnání měřených veličin – vliv velikosti poloměru zaoblení

Stejně jako v předchozím případě lze rostoucí závislost Poissonova poměru s narůstajícím poloměrem zaoblení  $R$  zdůvodnit rostoucí celkovou tuhostí buněk. S rostoucím  $R$  docházelo ke zmenšení efektivní plochy stěn orientovaných kolmo na směr zatěžování, která umožňovala jejich ohybovou deformaci. V důsledku toho byla ohybová složka deformace potlačena a buňky přecházely do tlakově dominantního deformačního režimu. Tato změna vedla k nárůstu příčného přetvoření buněk, které se projevilo vyššími hodnotami Poissonova poměru.



Obr. 5-31 Srovnání deformačních map – vliv velikosti poloměru zaoblení; experiment (nahore) a MKP (dole)

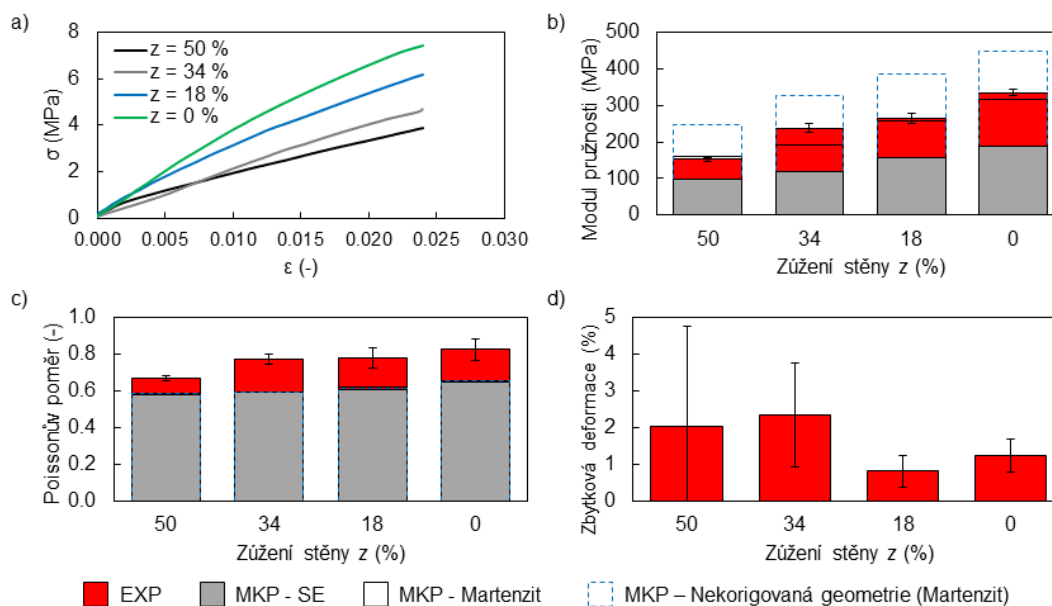
## Vliv proměnné tloušťky stěn



Obr. 5-32 Průběh smluvního napětí; a)  $z = 50\%$ ; b)  $z = 34\%$ ; c)  $z = 18\%$ ; d)  $z = 0\%$

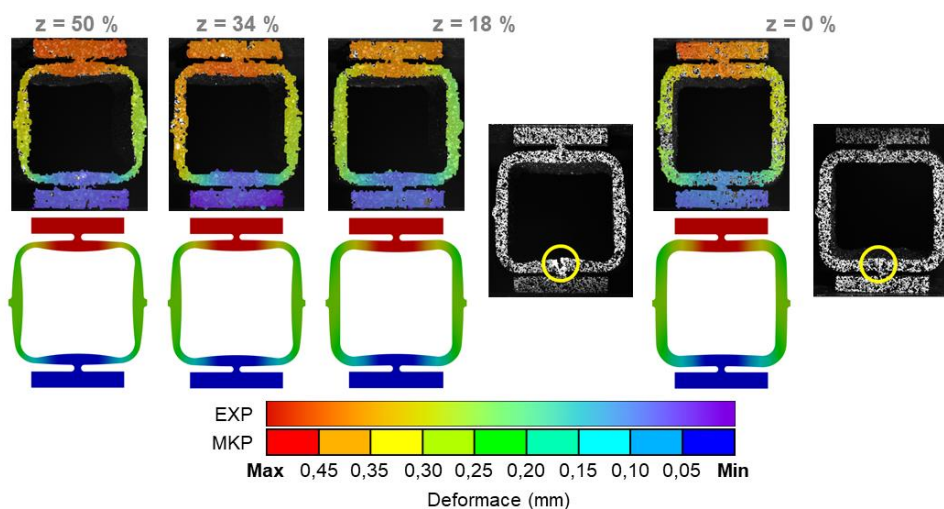
Ze srovnání průběhů smluvního napětí (viz Obr. 5-33a) je patrný výrazný vliv zúžených stěn na celkovou tuhost buňky. S rostoucím zúžením docházelo k systematickému poklesu dosažených hodnot smluvního napětí, a tedy i modulu pružnosti (viz Obr. 5-33b). Také v tomto případě vykazovaly experimentálně zjištěné hodnoty dobrou shodu s výsledky verifikační analýzy.

Z hlediska Poissonova poměru byl pozorován rostoucí trend s klesajícím zúžením stěn, přičemž výjimku představoval vzorek se zúžením  $z = 34\%$ , který vykazoval odlišené hodnoty (viz Obr. 5-33c). Tento vztah lze přisuzovat výraznému vlivu zúžení na deformační režim buněk, kdy větší zúžení umožňovalo vyšší míru ohybové deformace stěn orientovaných kolmo na směr zatěžování, vlivem čehož docházelo k menšímu vychýlení vertikálních stěn a nižšímu příčnému pretvoření buněk.



Obr. 5-33 Srovnání měřených veličin – vliv proměnné tloušťky stěn

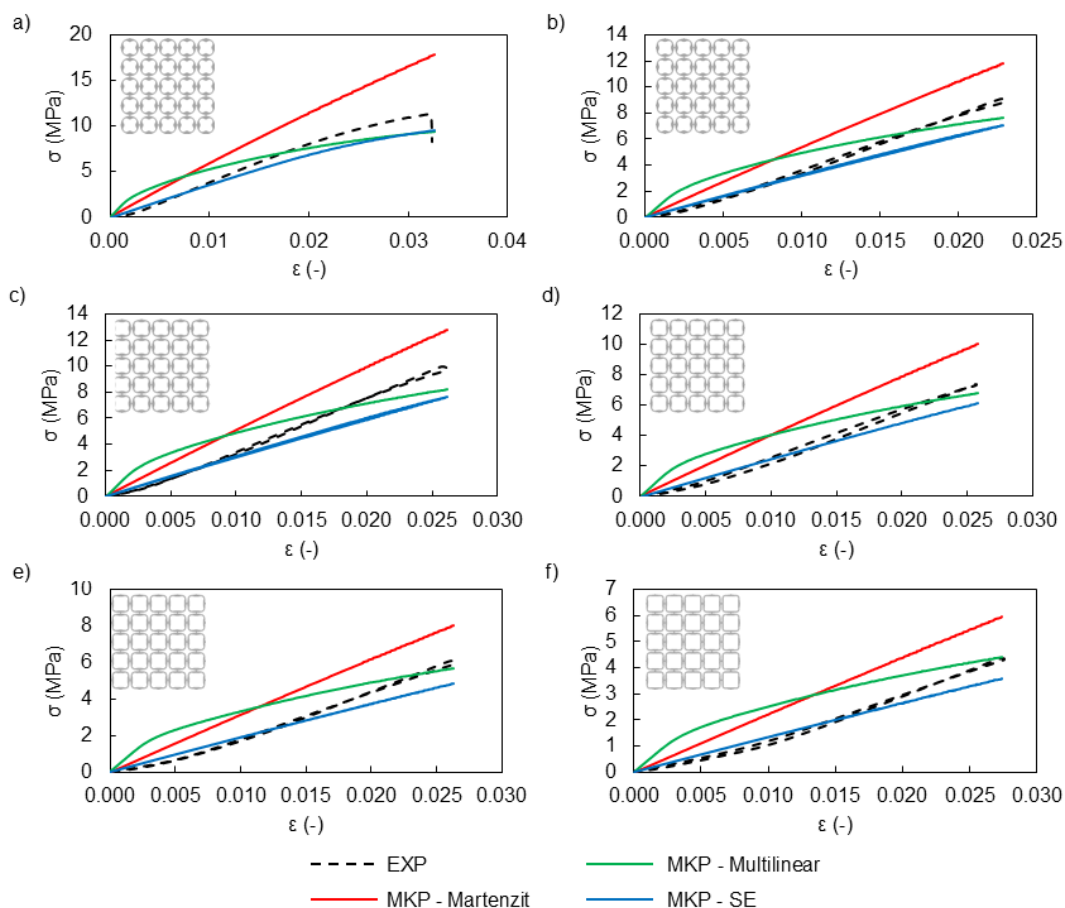
Z analýzy rozložení deformací, a zejména lokalizace míst porušení, vyplynul pozitivní vliv využití vhodně navrženého zúžení stěn na distribuci napětí a eliminace kritických oblastí. U vzorku s největším zúžením stěn ( $z = 50\%$ ) došlo k selhání v oblasti zúžení (samotné porušení nebylo zachyceno systémem DIC). Naopak u vzorků s malým nebo žádným zúžením stěn ( $z = 18$  a  $0\%$ ) došlo k iniciaci trhlin v oblastech spojů (viz Obr. 5-34). Tento rozdíl souvisel s deformačním režimem, kdy u vzorků s větším zúžením docházelo k výraznější ohybové deformaci stěn kolmých na směr zatěžování a vhodnější distribuci napětí, čímž byly eliminovány kritická místa v oblastech spojů.



Obr. 5-34 Srovnání deformačních map – vliv proměnné tloušťky stěn; experiment (nahore) a MKP (dole)

### 5.2.3 Fáze II – Analýza metamateriálů

Testované metamateriály vykazovaly výrazně nižší hodnoty modulu pružnosti ve srovnání s testovanými elementárními buňkami se stejnou geometrií. Dle provedené verifikační analýzy průběh smluvního napětí již blíže odpovídal superelastickému materiálovému modelu, avšak modul pružnosti experimentálně testovaných metamateriálů dosahoval průměrně o 31,03 % vyšších hodnot.

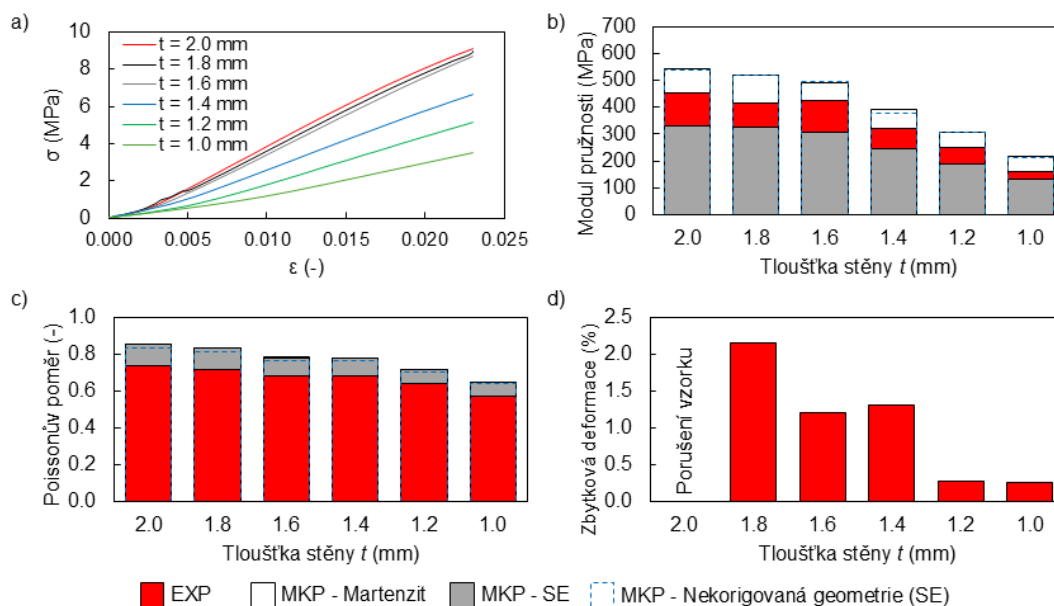


Obr. 5-35 Průběh smluvního napětí metamateriálů s nominálními tloušťkami stěn a)  $t = 2,0 \text{ mm}$ ; b)  $t = 1,8 \text{ mm}$ ; c)  $t = 1,6 \text{ mm}$ ; d)  $t = 1,4 \text{ mm}$ ; e)  $t = 1,2 \text{ mm}$ ; f)  $t = 1,0 \text{ mm}$

Porovnání průběhů smluvního napětí pro jednotlivé metamateriály potvrdilo stejný trend, jako byl pozorován u elementárních buněk. Tedy klesající závislost hodnot smluvního napětí a modulu pružnosti s klesající nominální tloušťkou stěn  $t$ . V případě elementárních buněk však měla tato závislost téměř lineární charakter, zatímco u metamateriálů byl u vzorků s  $t = 2,0, 1,8$  a  $1,6 \text{ mm}$  pozorován pouze mírný pokles obou veličin, a to jak v případě experimentálního testování, tak také při verifikačních analýzách.

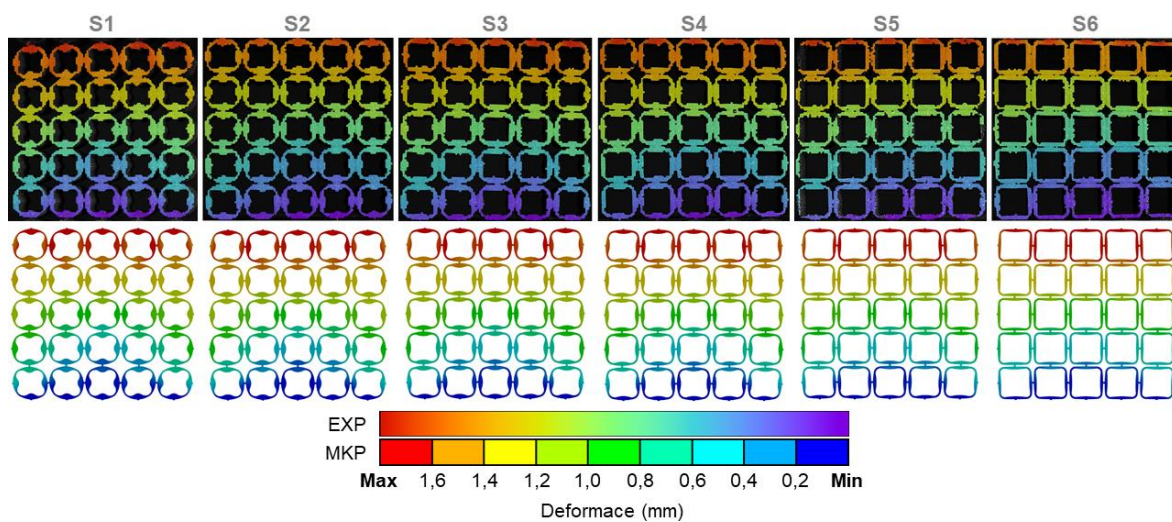
Poissonův poměr vykazoval klesající trend s klesající hodnotou  $t$  (viz Obr. 5-36c). Oproti výsledkům testování elementárních buněk zde byla závislost monotónně klesající v celém rozsahu  $t$ , a to jak v případě experimentálně testovaných vzorků, tak také při verifikačních analýzách.

Na rozdíl od vzorků elementárních buněk, které nevykazovaly známky superelastického chování, bylo u testovaných metamateriálů možné kvantifikovat také hodnoty zbytkové deformace. Ty vykazovaly klesající závislost s klesající nominální tloušťkou stěn  $t$ , kdy v případě vzorku s  $t = 1,8 \text{ mm}$  dosahovala zbytková deformace 2,15 %, zatímco u metamateriálu s  $t = 1,0 \text{ mm}$  dosahovala pouze 0,25 % (viz Obr. 5-36d). Výjimku tvořil metamateriál s  $t = 1,4 \text{ mm}$ , kde byl zaznamenán nárůst zbytkové deformace. To však mohlo být způsobené tím, že z každé konfigurace byl testován pouze jeden vzorek, a tedy nelze vyloučit vliv statistické odchylky.



Obr. 5-36 Srovnání měřených veličin – metamateriály

Průběh deformace metamateriálů vykazoval dobrou shodu s výsledky MKP analýz. Byla pozorována rovnoměrná deformace všech buněk, a to s výjimkou metamateriálu  $SI$  ( $t = 2 \text{ mm}$ ) (viz Obr. 5-37). V jeho případě došlo ke ztrátě deformační stability a porušení vzorku. Příčinou ztráty stability byla kombinace vysoké tuhosti buněk spolu s malou šířkou spojů a malou tloušťkou stěn v oblastech zúžení, což vedlo k nerovnoměrné deformaci, přetížení rohových buněk a jejich následnému selhání.



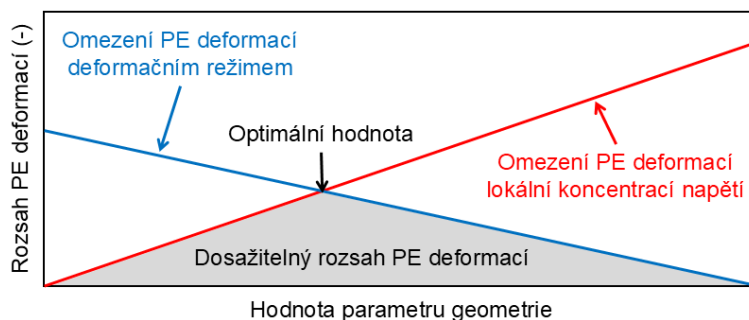
Obr. 5-37 Srovnání deformačních map – metamateriály; experiment (nahore) a MKP (dole)

## 6 DISKUZE

### 6.1 Interpretace výsledků

#### 6.1.1 Rozsah pseudoelastických deformací

Výsledky výpočtového modelování a experimentálního testování umožnily identifikovat dva klíčové faktory ovlivňující rozsah pseudoelastických deformací, jejichž vliv byl zřetelný v rámci všech provedených analýz. Prvním faktorem byl *deformační režim buněk*, který určoval jejich celkovou tuhost. Druhým faktorem byl poté *charakter rozložení napětového pole*, zejména výskyt lokálních koncentrací napětí. Oba faktory přitom kladly odlišné nároky na geometrii a působily protichůdně, což se projevilo nemonotónním průběhem závislosti rozsahu pseudoelastických deformací na hodnotách analyzovaných parametrů. Maximální rozsah PE deformací byl vždy dosažen při optimálním kompromisu mezi nízkou ohybovou tuhostí a rovnoměrností napětového pole (schematicky zobrazeno na Obr. 6-1).

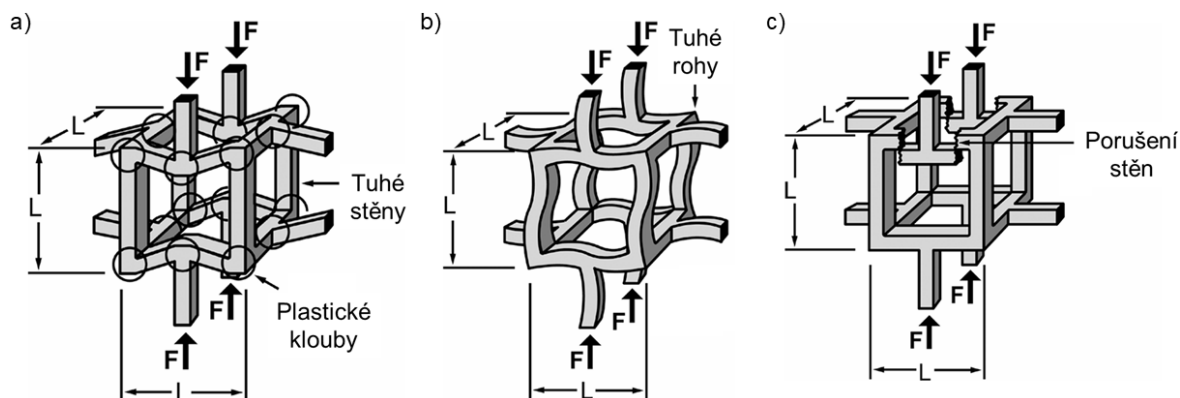


Obr. 6-1 Schéma závislosti rozsahu pseudoelastických deformací na hodnotách analyzovaných parametrů s vyznačenou jejich optimální hodnotou

Z hlediska deformačního režimu se ukázalo jako klíčové zachování nízké ohybové tuhosti buněk, umožňující výraznější rozvoj ohybově dominantní deformace stěn. Tento režim přispíval ke snížení celkové tuhosti buněk, a tím ke snížení hodnot napětí v celém průřezu. Opačný extrém, tedy tlakově dominantní deformace, vedl ke globálnímu nárůstu tuhosti a současně i napětí, což následně omezovalo rozsah PE deformací. Tlakové namáhání by navíc v kombinaci v případě stěn malé tloušťky mohlo vést ke ztrátě vzpěrné stability.

Zde se jako nevhodné ukázaly morfologie s velkým poloměrem křivosti stěn, jejichž použití je sice doporučováno pro zlepšení únavové odolnosti [25], avšak v tomto kontextu vedlo ke zvýšení ohybové tuhosti a omezení pseudoelastické deformace. To bylo zřetelné v případě morfologie  $A_{KR}$  (viz Obr. 5-1), která umožňovala nižší rozsah PE deformací i přes poměrně homogenní rozložení napětí.

Nejnižší ohybovou tuhost z analyzovaných morfologií naopak vykazovala morfologie  $B_{SQ}$  (viz Obr. 5-2), jejíž deformační mechanismus odpovídal mechanismu „ohyb kolem plastických kloubů“, který popsali Gibson a Ashby [40] (viz Obr. 6-2a). Tento mechanismus sice umožňoval nízkou ohybovou tuhost, ale zároveň vedl k nadměrné koncentraci napětí v rozích buňky, kde docházelo k plastickému přetvoření – tedy jevu, který je z hlediska pseudoelastické deformace nežádoucí. Rozsah PE deformací byl tedy omezen právě výskytem lokálních špiček napětí, nikoliv globální tuhostí.



Obr. 6-2 Mechanismy deformace metamateriálů: a) ohyb kolem plastických kloubů; b) buckling; c) křehký lom [40]

Z tohoto důvodu bylo nutné zavést kompromis mezi ohybově dominantním a tlakově dominantním deformačním režimem stěn – kombinovaný ohybově-tlakový deformační režim. Ten poskytla morfologie  $C_{SQR}$  (viz Obr. 5-2), v jejímž případě zůstala zachována dostatečná míra ohybové deformace stěn při současném eliminování nežádoucí koncentrace napětí v rozích buňky.

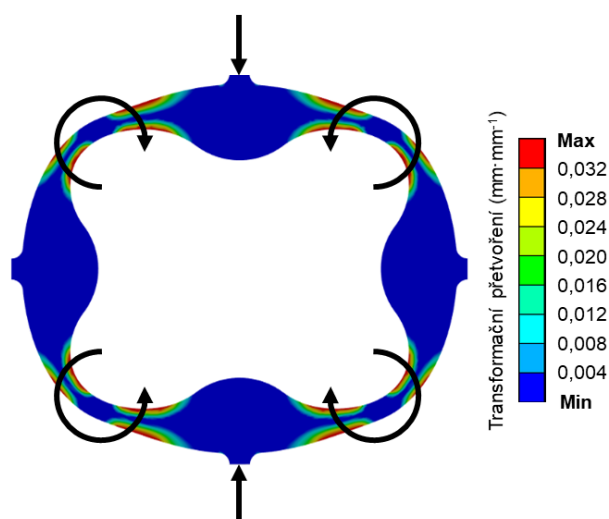
Vhodnost tohoto deformačního režimu byla potvrzena také v rámci analýzy vlivu velikosti poloměru zaoblení. Na grafickém znázornění závislosti rozsahu pseudoelastických deformací na velikosti poloměru zaoblení (Obr. 5-5b) bylo zřetelné omezení tohoto rozsahu vlivem lokálních koncentrací v rozích buňky při malých poloměrech zaoblení a na druhé straně omezení vlivem rostoucí tuhosti buňky a přechodu na tlakově dominantní deformační režim při velkých poloměrech zaoblení, což mělo za následek globální nárůst napětí v celém průřezu buňky.

Při dosažení optimální velikosti poloměru zaoblení bylo možné pozorovat ideální rozložení napěťového pole, kdy byl potlačen vliv lokálních koncentrací napětí, a napětí dosahovalo téměř shodných hodnot v obou kritických místech – v zaoblení rohů a v oblastech zatěžování (viz Obr. 5-6). Právě tento stav lze považovat za ideální kompromis zachovávající relativně nízkou ohybovou tuhost buňky a současně potlačující negativní vliv lokálních koncentrací napětí.

Taktéž bylo pozorováno, že rostoucí tuhost buňky omezovala dosažitelný rozsah pseudoelastických deformací výrazněji, kdy oproti maximálnímu rozsahu pseudoelastických deformací při optimální hodnotě poloměru zaoblení došlo k jeho omezení o 56,9-63,8 % v závislosti na tloušťce stěny. Vlivem lokální koncentrace napětí při malých poloměrech zaoblení poté docházelo k jeho omezení o 42,3-55,1 %.

Efektivním prvkem pro navýšení rozsahu pseudoelastických deformací se ukázalo být také využití zúžených stěn v zaoblených rozích, které mělo dvojí efekt. Jednak vedlo k rovnoměrnějšímu rozložení napětí a eliminaci kritických míst v souladu se studii *Alaimo a kol.* [25] a *Gu a kol.* [26]. Dle těchto studií měla být ideální hodnota zúžení stěn o 35-50 % nominální tloušťky, což se také potvrdilo, kdy z hlediska rozsahu PE deformací byly zjištěné optimální hodnoty zúžení o 35-45 % nominální tloušťky.

Současně se díky oslabenému průřezu stěn v těchto oblastech právě zde iniciovala napětím indukovaná martenzitická transformace, charakteristická výrazným snížením modulu pružnosti transformační fáze. Díky tomu působily zúžené rohy buněk jako pseudoelastické klouby, čímž docházelo k výraznému snížení ohybové tuhosti buněk (viz Obr. 6-3). To vedlo k navýšení rozsahu PE deformací o 8,5-21,7 % v porovnání s geometrií bez zúžení, kdy k většímu navýšení docházelo s rostoucí nominální tloušťkou stěn  $t$ .

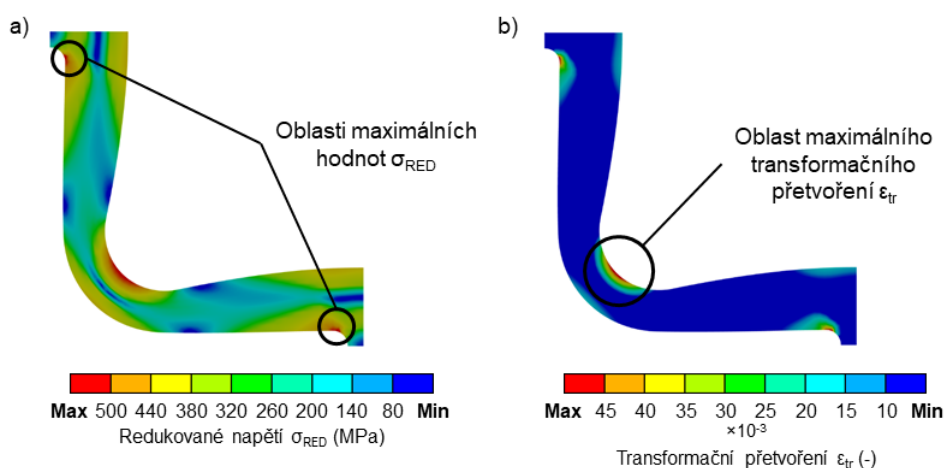


Obr. 6-3 Zúžené stěny působící jako pseudoelastické klouby

Nicméně při příliš velkém zúžení docházelo k přetěžování nejtěsnějších oblastí stěn. To vedlo ke vzniku nových koncentrátorů napětí a zhoršené distribuci namáhání. V takovém případě byly aktivní pouze zúžené oblasti, zatímco zbylé části stěn zůstávaly nevyužity, což se projevovalo poklesem dosažitelného rozsahu pseudoelastických deformací.

Nezbytnou součástí metamateriálu představují také spoje buněk. Ty však ze své povahy na rozdíl od velikosti poloměru zaoblení či zúžení stěn zpravidla vždy vedly k mírnému zhoršení mechanických vlastností a rozsahu pseudoelastických vlastností metamateriálu. Spoje typu *n-shaped*, využívané v konstrukci koronárních stentů, byly v rámci několika studií [27, 28] hodnoceny jako vhodné pro zvýšení flexibility a eliminaci kritických míst. Jejich pozitivní přínos však vycházel ze specifických požadavků a vlastností stentů, zejména jejich válcové geometrie a vystavení radiálnímu tlakovému namáhání. V rámci této práce bylo naopak zjištěno, že při rovinném tlakovém zatěžování docházelo vlivem těchto spojů ke značně nestabilní deformaci metamateriálu a zásadnímu narušení mechanismu pseudoelastické deformace. Z těchto důvodů proto *n-shaped* spoje nelze využít v aplikacích, požadujících stabilní a předvídatelnou deformaci při rovinném tlakovém zatěžování.

Druhý analyzovaný typ spojení – *přímé napojení buněk* – umožňoval kontrolovaný přenos zatížení, avšak vedl ke snížení dosažitelného rozsahu pseudoelastických deformací průměrně o 24 % při využití jeho optimálních rozměrů. Také v tomto případě to bylo působením dvou výše zmíněných mechanismů. V ideálním případě by spoje měly působit jako pseudoelastický kloub umožňující ohybovou deformaci stěn (viz Obr. 6-2a). K tomuto efektu docházelo při využití spojů optimálních rozměrů, což zajišťovalo jejich dostatečnou poddajnost. Příliš velké spoje poté působily spíše jako tuhý člen a vedly ke zvýšení ohybové tuhosti buňky. Při příliš malých spojích naopak docházelo ke koncentraci napětí v jejich okolí, vlivem čehož by nepůsobily jako pseudoelastické klouby, ale jako nežádoucí plastické klouby. Současně však bylo pozorováno, že lokální koncentrace napětí v oblastech spojů nemusely nutně vést k výraznému omezení rozsahu pseudoelastických deformací, a to v případech, kdy se vyskytovaly mimo hlavní oblast transformačního přetvoření (viz Obr. 6-4).



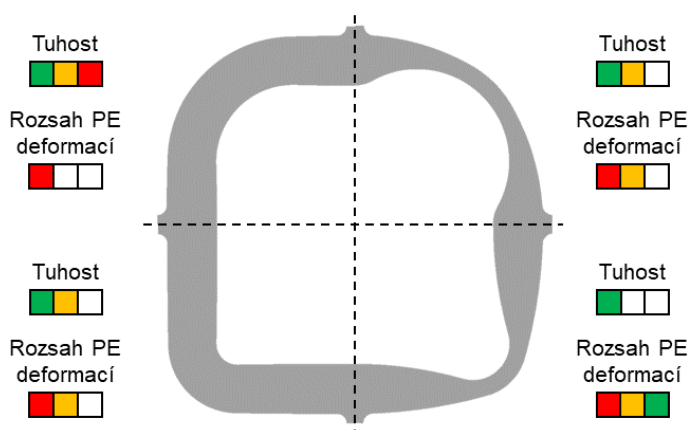
Obr. 6-4 Oblasti maximálních hodnot a) redukovaného napětí; b) transformačního přetvoření

Následnou analýzou metamateriálů byly poté identifikovány některé kritické konfigurace buněk z hlediska stability průběhu deformace. Zde bylo zjištěno, že pro zajištění stabilního průběhu deformace v pseudoelastické oblasti je nutné, aby šířka spojů a minimální tloušťka stěn ve zúžených oblastech dosahovaly alespoň  $0,3$ násobku nominální tloušťky stěn. V případech, kdy tyto rozměry byly nižší docházelo k nežádoucí ztrátě stability buněk, která vedla ke kolapsu metamateriálu ještě před dosažením limitu pseudoelastické deformace.

Současně v případech, kdy by byl požadován stabilní průběh deformace také v plastické oblasti, by poté bylo nutné, aby šířka spojů a minimální tloušťka stěn ve zúžených oblastech byly shodných rozměrů. Tento poměr zajišťoval rovnoměrné zpevnění metamateriálu v důsledku dosažení plně martenzitické fáze a bránil vzniku lokálních oblastí s výrazně vyšší tuhostí. V opačných případech vždy docházelo k nestabilní deformaci právě v důsledku lokálního zpevnění, a to zpravidla v oblastech spojů nebo zúžených částí stěn podle toho, která z těchto oblastí byla menších rozměrů.

Po shrnutí veškerých výsledků lze konstatovat, že nejefektivnějším prostředkem pro řízení rozsahu pseudoelastických deformací a mechanické odezvy metamateriálu je modifikace velikosti poloměru zaoblení a zúžení stěn. V součtu lze modifikací těchto parametrů řídit rozsah pseudoelastických deformací v rozmezí až  $183,6$  %. Vzhledem k jejich izolované lokalizaci do rohů buňky je navíc možné v každém rohu nastavit jejich parametry individuálně, což poskytuje vysoce efektivní prostředek pro řízení mechanické odezvy metamateriálu pro široké spektrum aplikací dle jejich požadavků (viz Obr. 6-5).

Z konstrukčního hlediska je poté vhodné vyvarovat se výrazným rozdílům tloušťek stěn a spojů buněk, které byly příčinou nestabilního průběhu deformace. Pro zajištění stabilní deformace a eliminaci kritických míst je vhodné využití menší nominální tloušťky stěn v kombinaci se spoji, jejichž šířka je shodná s minimální tloušťkou stěn ve zúžených oblastech.



Obr. 6-5 Vliv velikosti poloměru zaoblení a zúžených stěn na výslednou tuhost buňky a rozsah pseudoelastických deformací

## 6.1.2 Anizotropie mechanických vlastností

Provedené analýzy umožnily identifikovat hlavní mechanismus ovlivňující anizotropní odezvu mechanických vlastností. Na základě studie [34] bylo předpokládáno, že pro dosažení nejnižší míry anizotropie je klíčová kombinovaná ohybová a tahová/tlaková deformace stěn. Výsledky provedených analýz však ukázaly, že klíčem k dosažení izotropní odezvy mechanických vlastností nebyl samotný deformační režim, ale jeho konzistence napříč různými způsoby zatěžování.

Již analýzy vlivu morfologie buňky odhalily, že plně izotropní odezvy mechanických vlastností dosahovala morfologie  $D_{HC}$ , která vykazovala při jednoosém tlakovém i smykovém zatěžování tlakově, respektive tahově dominantní deformaci stěn. Nejvyšší míru anizotropie naopak vykazovala morfologie  $A_{KR}$ , která při jednoosém tlakovém zatěžování vykazovala větší míru ohybové deformace stěn než při smykovém zatěžování, kdy byla dominantní tahová deformace.

Taktéž nebyl pozorován výrazný nárůst tuhosti buňky ve směrech orientace stěn, jak uváděla studie [35], což bylo patrné na průběhu směrové závislosti modulu pružnosti morfologie  $B_{SQ}$  a v analýze vlivu velikosti poloměru zaoblení (viz Obr. 5-3 a Obr. 5-8 Obr. 5-7). Vliv orientace stěn byl zřejmě do velké míry potlačen vhodnou polohou spojů buněk. Tato poloha vedla k tomu, že zatížení nebylo přenášeno přímo přes stěny rovnoběžné se směrem zatěžování, ale docházelo primárně k ohybové deformaci stěn kolmých na směr zatěžování. To bylo možné pozorovat v případě morfologie  $C_{SQR}$ , která umožňovala stejnou míru ohybové deformace stěn při jednoosém tlakovém i při smykovém zatěžování, díky čemuž vykazovala téměř izotropní odezvu mechanických vlastností (viz Obr. 5-4).

Tyto mechanismy byly opět potvrzeny analýzou vlivu velikosti poloměru zaoblení, kdy míra anizotropie vykazovala rostoucí závislost s větším poloměrem zaoblení  $R$ . To bylo způsobeno právě zmíněným rozdílem deformačních mechanismů při jednoosém tlakovém a při smykovém zatěžování, kdy s rostoucím  $R$  byla při smykovém zatěžování dominantní tahová deformace stěn, což vedlo k nárůstu modulu pružnosti při tomto zatěžování.

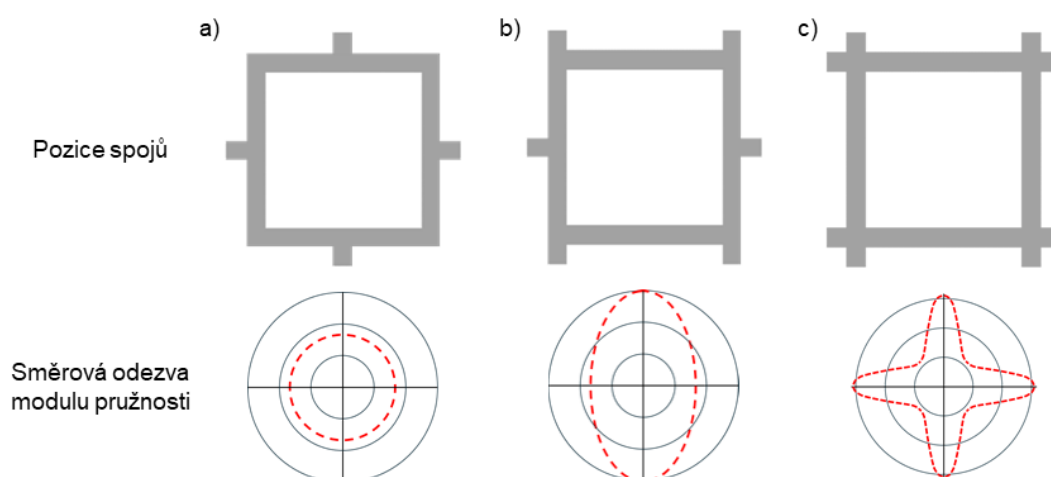
Zásadní roli měla především proměnná tloušťka stěn. Tento přístup byl inspirovaný studií *Xu a kol.* [30], kteří využili rozdílné průměry prutů pro dosažení izotropní odezvy prostorových mikroprutových metamateriálů. Provedené analýzy potvrdily vhodnost tohoto přístupu taktéž pro 2D metamateriály s diametrálně odlišnými parametry topologie a geometrie. Lokální modifikace tloušťky stěn umožnila lokálně řídit jejich tuhost, a tím i směrovou odezvu mechanických vlastností. Menší tloušťka stěn v zaobleních vedla k navýšení míry jejich ohybové deformace při smykovém zatěžování, čímž došlo ke snížení modulu pružnosti ve směru  $45^\circ$  při současném minimálním ovlivnění modulu pružnosti při jednoosém tlakovém zatěžování (viz Obr. 5-12). Naopak s rostoucí tloušťkou stěny v těchto místech docházelo k omezení ohybové deformace při smykovém zatěžování a nárůstu modulu pružnosti při tomto způsobu zatěžování.

Při zahrnutí spojů buněk opět docházelo k mírnému omezení ohybové deformace při smykovém zatěžování s rostoucí šířkou spojů (viz Obr. 5-17). Jejich vliv však nebyl výrazný a pro dosažení izotropní odezvy postačovalo využití mírně většího zúžení stěn.

Z pohledu vlivu poměru velikosti buňky ku tloušťce stěn bylo předpokládáno, že jeho změna nebude mít vliv na míru anizotropie. Při provedených analýzách však byl opět pozorován vliv omezení ohybové deformace při smykovém zatěžování s klesajícím poměrem  $a:t$  a s tím spojený nárůst míry anizotropie mechanických vlastností. Tento nárůst byl však opět relativně mírný a bylo možné jej opět kompenzovat pomocí většího zúžení stěn.

Stejně jako v případě rozsahu pseudoelastických deformací, také zde lze po shrnutí veškerých výsledků konstatovat, že nejefektivnějšími prostředky pro řízení anizotropie odezvy mechanických vlastností jsou modifikace velikosti poloměru zaoblení a proměnná tloušťka stěn. V součtu bylo možné modifikací těchto parametrů řídit míru anizotropie v rozsahu  $A = 1-7,74$ , a to pouze při využití zúžených stěn. Lokálním zesílením stěn by poté bylo možné horní hranici míry anizotropie dále navýšit. Limity tohoto přístupu jsou dány pouze minimální vyrobitelnou tloušťkou stěn a případně zahrnutím dalších požadavků na mechanické vlastnosti metamateriálu. Opět také vzhledem k jejich izolované lokalizaci do rohů buňky je navíc možné v každém rohu nastavit jejich parametry individuálně, což poskytuje vysoce efektivní prostředek pro řízení anizotropní odezvy metamateriálu pro široké spektrum aplikací dle jejich požadavků.

Zásadním prvkem pro řízení anizotropní odezvy je také uspořádání buněk, respektive poloha spojů. Nejnížší tuhosti a současně nejnížší míry anizotropie lze dosáhnout při umístění spojů do středů stěn. Naopak umístěním spojů blíže k rohům buněk lze zvýšit jejich tuhost využitím tlakové deformace stěn rovnoběžných se směrem zatěžování (viz Obr. 6-6). Touto modifikací je taktéž možné řídit tuhost buňky izolovaně pro každý směr zatěžování, což opět umožňuje efektivní řízení anizotropní odezvy dle požadavků specifických aplikací.



Obr. 6-6 Vliv polohy spojů buněk na směrovou závislost modulu pružnosti: a) izotropní odezva; b) zvýšení tuhosti v jednom směru; c) zvýšení tuhosti ve dvou směrech

### 6.1.3 Materiálové vlastnosti

Přestože byly materiálové vlastnosti, využití pro verifikační analýzy, kalibrovány na základě provedeního testu mechanických vlastností materiálu, byly zaznamenány výrazné odchylky mezi simulovanou a experimentální odezvou. Nejvýraznější rozdíly byly zaznamenány u vzorků elementárních buněk, které při experimentálním testování nevykazovaly očekávané superelastické chování. Průběh deformace i absence hysterezní smyčky při odtížení odpovídaly spíše mechanické odezvě plně martenzitické fáze.

To bylo potvrzeno také pomocí verifikačních analýz provedených s odlišnými materiálovými vlastnostmi, kde bylo prokázáno, že odezva testovaných vzorků nejlépe odpovídala martenzitickému modelu s výrazně vyšším Youngovým modulem pružnosti. Naproti tomu testované vzorky metamateriálů vykazovaly chování, které již blíže odpovídalo predikcím superelastického modelu. Tento rozdíl poukazuje na pravděpodobné rozdíly termomechanických vlastností mezi jednotlivými typy vzorků.

Pravděpodobnou příčinou těchto rozdílů byla změna termomechanických vlastností materiálu v důsledku výrobního procesu. Studie [18, 22] uvádí, že vysoké teploty při výrobě mohou vést k odpařování niklu, vlivem čehož dochází ke zvýšení transformačních teplot, především teplot  $A_f$  a  $M_s$ . Pokud k tomuto jevu došlo v průběhu výroby, je velice možné, že materiál vzorků elementárních buněk, a to především v oblastech primární deformace, byl za pokojové teploty dominantně tvořen termodynamicky stabilní martenzitickou fází, čímž by došlo ke ztrátě superelastických vlastností. Tomu by odpovídal také výskyt křehkých lomů, které jsou pro martenzit charakteristické.

Možným vysvětlením tohoto jevu by mohlo být odlišné množství energie přijaté objemem materiálu pro tenkostěnné vzorky v porovnání s objemovým dílem. Vliv mohla mít také pozice vzorků při výrobě. Vzorky metamateriálů, které více vykazovaly superelastické vlastnosti, byly při výrobě umístěny na okraji platformy ve směru proudění atmosféry, zatímco vzorky elementárních buněk byly zastíněny za nimi. Vlivem toho mohlo být omezeno proudění atmosféry na tyto vzorky, což by vedlo k omezenému odvodu tepla.

Je však třeba zdůraznit, že tyto předpoklady jsou založeny na nepřímé interpretaci výsledků experimentálního testování a verifikačních analýz, a nebyly řádně experimentálně ověřeny. Pro jejich validaci by bylo nezbytné provedení diferenciální snímkoací kalorimetrie, případně chemické analýzy vzorků, které by umožnily stanovit transformační teploty a chemické složení.

## 6.2 Verifikace hypotéz

Verifikace první hypotézy

**Na základě uvedených zjištění byla hypotéza pro první výzkumnou otázku**

*Jaký je vztah mezi geometrií 2D mřížkového metamateriálu s elementární topologií ze superelastické slitiny NiTi a maximálním rozsahem jeho pseudoelastických deformací?*

### ČÁSTEČNĚ POTVRZENA

Jako hlavní mechanismy ovlivňující rozsah pseudoelastických deformací byly potvrzeny kombinovaný ohybově-tlakový deformační režim stěn a rovnoměrné rozložení redukovaného napětí s eliminací jeho lokálních koncentrací. Tyto mechanismy bylo možné efektivně dosáhnout využitím vhodné morfologie a následnou optimalizací poloměru zaoblení, implementací zúžených stěn a vhodného poměru velikosti buňky ku tloušťce stěn.

Naopak využití stěn s velkým poloměrem křivosti pro navýšení rozsahu pseudoelastických deformací však bylo platné pouze do určitého bodu. To při příliš vysokých hodnotách vedlo k nárůstu ohybové tuhosti a tím i k poklesu rozsahu pseudoelastických deformací. Stejně tak použití pružných spojů buněk, inspirované konstrukcí stentů, se ukázalo jako nevhodné. Tyto spoje přenášely veškeré zatížení, čímž docházelo ke ztrátě rovnoměrného namáhání buňky a deformační stability metamateriálu.

Verifikace druhé hypotézy

**Na základě uvedených zjištění byla hypotéza pro druhou výzkumnou otázku**

*Jaký je vztah mezi geometrií 2D mřížkového metamateriálu s elementární topologií ze superelastické slitiny NiTi a mírou anizotropie odezvy mechanických vlastností?*

### ČÁSTEČNĚ POTVRZENA

Využití buněk čtvercové morfologie, vzájemně napojených ve středech stěn vedlo k nízké míře anizotropní odezvy mechanických vlastností. Současně bylo potvrzeno, že zvětšení poloměru zaoblení rohů buněk a šířky spojů vedlo k nárůstu míry anizotropie. Klíčovým prvkem pro řízení anizotropní odezvy mechanických vlastností se ukázalo být využití proměnné tloušťky stěn, což umožnilo lokálně řídit tuhost metamateriálu ve specifických směrech zatížení, aniž by došlo k negativnímu ovlivnění tuhosti v ostatních směrech.

Avšak z hlediska míry anizotropie nebyla klíčovým mechanismem kombinovaná deformace stěn jako taková, ale především rozdílný deformační režim při jednotlivých způsobech zatěžování. Buňky, které vykazovaly při jednoosém tlakovém a smykovém zatěžování odlišné deformační režimy, dosahovaly výrazně vyšší míry anizotropie než ty, u nichž byl režim obdobný.

## 7 ZÁVĚR

Tato práce se zabývala analýzou vlivu geometrie 2D metamateriálu, aditivně vyráběného ze superelastické slitiny NiTi, na jeho mechanickou odezvu. Hlavním cílem bylo prostřednictvím výpočtového modelování identifikovat vztah mezi geometrií, rozsahem pseudoelastických deformací a mírou anizotropie odezvy mechanických vlastností. Hlavním přínosem práce byl detailní popis klíčových mechanismů, ovlivňujících obě sledované vlastnosti, systematický popis vlivu geometrických parametrů a návrh optimalizovaných konfigurací metamateriálů, které dosahovaly nejvyššího rozsahu pseudoelastických deformací a plně izotropní odezvy mechanických vlastností.

Hlavními zjištěními této práce byly:

- Hlavními mechanismy ovlivňujícími rozsah pseudoelastických deformací byly deformační režim stěn a charakter rozložení redukovaného napětí. K dosažení vyššího rozsahu PE deformací vedl kombinovaný ohybově-tlakový deformační režim, který zajišťoval nízkou tuhost buněk a vedl k eliminaci koncentrátorů napětí.
- Anizotropní odezva mechanických vlastností byla určena primárně rozdílem deformačních režimů při různých způsobech zatěžování, kdy s jejich klesající odlišností klesala také míra anizotropie.
- Z hlediska obou sledovaných vlastností byly nejvýznamnějšími prvky geometrie: *Poloměr zaoblení*, ovlivňující ohybovou tuhost buněk a umožňující řízení rozsahu pseudoelastických deformací v rozmezí až 122,5 %.  
*Zúžení stěn*, umožňující řízení anizotropie v rozsahu  $A = 1-7,74$  a aktivaci martenzitické transformace v přesně definovaných oblastech,  
*Poloha spojů*, která určovala způsob přenosu zatížení a tím i tuhost buněk.
- Mírně negativní vliv spojů buněk na sledované vlastnosti bylo možné efektivně kompenzovat za pomoci modifikace zúžení stěn.

Uvedené výsledky jsou limitovány na použité způsoby zatěžování a rozmezí testovaných parametrů. Přesto však poskytují ucelený přehled vlivu geometrie na rozsah pseudoelastických deformací a anizotropii mechanických vlastností superelastických 2D metamateriálů. Tyto informace mohou sloužit k efektivnějšímu návrhu nejen superelastických 2D metamateriálů, u nichž je požadován konkrétní rozsah elastických deformací či řízená anizotropní odezva mechanických vlastností.

Další výzkum v této oblasti by měl být orientován na optimalizaci geometrických parametrů z hlediska únavové životnosti při cyklickém zatěžování, implementaci pokročilých materiálových modelů, umožňujících popis vlivu cyklického zatěžování, včetně analýzy akumulace zbytkových deformací, a podrobnou analýzu vztahu mezi procesními parametry výroby, tepelným zpracováním a termomechanickými vlastnostmi materiálu.

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

## 8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Výsledky této práce rozšiřují oblast poznání o popis vztahů mezi vnitřním geometrickým uspořádáním a pseudoelastickými vlastnostmi a anizotropní odezvou mechanických vlastností 2D metamateriálů ze slitin s tvarovou pamětí. Za účelem publikace výsledků vznikl manuskript pro odborný článek.

**Název:** Effect of Geometry on the Pseudoelastic Behavior and Anisotropy of NiTi-Based 2D Metamaterials

**Autoři:** K. Brulík, O. Červínek, D. Koutný

**Abstrakt (anglická verze):**

The use of shape memory alloys in combination with the complex geometry of additively manufactured metamaterials enables the design of morphable segments capable of continuously changing their shape while maintaining structural integrity. These may find applications, e.g. in the field of aviation as a more efficient replacement for conventional flaps and contribute to higher flight efficiency and lower environmental burden. The advantage of these solutions is not only the high degree of reversible deformation, exceeding the capabilities of conventional materials by many times, but also the possibility of targeted control of directional stiffness through optimization of the internal geometry. In this work, the effect of the internal geometry of a superelastic 2D NiTi alloy metamaterial on the extent of pseudoelastic deformation and the anisotropy of the mechanical response was analyzed. The obtained results allowed to identify the major influence of the deformation mode and stress distribution on the extent of pseudoelastic deformations. The key elements proved to be the size of the fillet radius and the tapered walls, which could be optimised to increase the extent by up to 183 %. In terms of the anisotropic response, the size of the fillet radius and the tapered walls were again found to be key elements, which allowed to control the deformation modes under the different loading conditions and thus the degree of anisotropy in the range  $A = 1-7.74$ , as well as the position of the joints, which determined the overall load transfer.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] GANGIL, Namrata, Arshad Noor SIDDIQUEE a Sachin MAHESHWARI. Towards applications, processing and advancements in shape memory alloy and its composites. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2020, **59**, 205–222 [vid. 2025-02-09]. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/J.JMAPRO.2020.09.048
- [2] MOHD JANI, Jaronie, Martin LEARY, Aleksandar SUBIC a Mark A. GIBSON. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design (1980-2015)* [online]. 2014, **56**, 1078–1113 [vid. 2023-11-08]. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATDES.2013.11.084
- [3] PARVIZI, Soroush, Seyed Mahdi HASHEMI a Sanaz MOEIN. NiTi shape memory alloys: properties. In: Sabu THOMAS, Ajit BEHERA a Tuan Anh NGUYEN, ed. *Nickel-Titanium Smart Hybrid Materials* [online]. B.m.: Elsevier, 2022, s. 399–426. ISBN 978-0-323-91173-3. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91173-3.00021-3
- [4] LIU, Yinong a S. P. GALVIN. Criteria for pseudoelasticity in near-equiatomic NiTi shape memory alloys. *Acta Materialia* [online]. 1997, **45**(11), 4431–4439 [vid. 2025-03-23]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:10.1016/S1359-6454(97)00144-4
- [5] FARBER, Eduard, Jia Ning ZHU, Anatolij POPOVICH a Vera POPOVICH. A review of NiTi shape memory alloy as a smart material produced by additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, **30**, 761–767 [vid. 2023-11-08]. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATPR.2020.01.563
- [6] XIONG, Zhiwei, Zhonghan LI, Zhen SUN, Shijie HAO, Ying YANG, Meng LI, Changhui SONG, Ping QIU a Lishan CUI. Selective laser melting of NiTi alloy with superior tensile property and shape memory effect. *Journal of Materials Science & Technology* [online]. 2019, **35**(10), 2238–2242 [vid. 2024-03-20]. ISSN 1005-0302. Dostupné z: doi:10.1016/J.JMST.2019.05.015
- [7] ALAGHA, Ali N., Shahadat HUSSAIN a Wael ZAKI. Additive manufacturing of shape memory alloys: A review with emphasis on powder bed systems. *Materials and Design* [online]. 2021, **204** [vid. 2024-03-11]. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATDES.2021.109654

- [8] GU, Xiaojun, Yinfeng CAO, Jihong ZHU, Jun WANG, Weihong ZHANG a Ziad MOUMNI. Shape optimization of SMA structures with respect to fatigue. *Materials & Design* [online]. 2020, **189**, 108456 [vid. 2023-11-08]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATDES.2019.108456
- [9] MCKELVEY, A. L. a R. O. RITCHIE. Fatigue-crack propagation in Nitinol, ashape-memory and superelastic endovascular stent material. *Journal of Biomedical Materials Research* [online]. 1999, **47**(3), 301–308. ISSN 00219304. Dostupné z: doi:10.1002/(SICI)1097-4636(19991205)47:3<301::AID-JBM3>3.0.CO;2-H
- [10] MURASAWA, Go, Satoru YONEYAMA, Toshio SAKUMA a Masahisa TAKASHI. Influence of cyclic loading on inhomogeneous deformation behavior arising in NiTi shape memory alloy plate. *Materials Transactions* [online]. 2006, **47**(3), 780–786. ISSN 13459678. Dostupné z: doi:10.2320/matertrans.47.780
- [11] CISSE, Cheikh, Wael ZAKI a Tarak BEN ZINEB. A review of constitutive models and modeling techniques for shape memory alloys. *International Journal of Plasticity* [online]. 2016, **76**, 244–284 [vid. 2024-03-10]. ISSN 0749-6419. Dostupné z: doi:10.1016/J.IJPLAS.2015.08.006
- [12] AURICCHIO, Ferdinando, Robert L TAYLOR a Jacob LUBLINER. Shape-memory alloys: macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1997, **146**, 281–312.
- [13] SOUZA, Angela C, Edgar N MAMIYA a Nestor ZOUAIN. Three-dimensional model for solids undergoing stress-induced phase transformations. *European Journal of Mechanics, A/Solids*. 1998, **17**(5), 789–806.
- [14] AURICCHIO, Ferdinando a Lorenza PETRINI. Improvements and algorithmical considerations on a recent three-dimensional model describing stress-induced solid phase transformations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* [online]. 2002, **55**(11), 1255–1284 [vid. 2024-03-23]. ISSN 00295981. Dostupné z: doi:10.1002/NME.619
- [15] GRANDI, Diego a Ulisse STEFANELLI. The souza-auricchio model for shape-memory alloys. *Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series S* [online]. 2015, **8**(4), 723–747. ISSN 19371179. Dostupné z: doi:10.3934/dcdss.2015.8.723

- [16] ZAKI, Wael a Ziad MOUMNI. A 3D model of the cyclic thermomechanical behavior of shape memory alloys. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* [online]. 2007, **55**(11), 2427–2454 [vid. 2024-03-11]. ISSN 00225096. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmps.2007.03.011
- [17] ZAKI, Wael, Ziad MOUMNI a Claire MORIN. Modeling tensile-compressive asymmetry for superelastic shape memory alloys. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* [online]. 2011, **18**(7), 559–564 [vid. 2024-03-11]. ISSN 15376494. Dostupné z: doi:10.1080/15376494.2011.605016
- [18] TAREQ, Sarower, Bibek POUDEL, Hoa NGUYEN, Haseung CHUNG a Patrick KWON. Laser powder bed fusion of nitinol shape memory alloy with superelastic characteristics on Ti substrate. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2024, **119**, 964–974 [vid. 2025-03-12]. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/J.JMAPRO.2024.04.005
- [19] WANG, Xiebin, Jingya YU, Jiangwei LIU, Liugang CHEN, Qin YANG, Huiliang WEI, Jie SUN, Zuocheng WANG, Zhihui ZHANG, Guoqun ZHAO a Jan VAN HUMBEECK. Effect of process parameters on the phase transformation behavior and tensile properties of NiTi shape memory alloys fabricated by selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2020, **36**, 101545 [vid. 2025-03-12]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/J.ADDMA.2020.101545
- [20] XUE, L., K. C. ATLI, C. ZHANG, N. HITE, A. SRIVASTAVA, A. C. LEFF, A. A. WILSON, D. J. SHARAR, A. ELWANY, R. ARROYAVE a I. KARAMAN. Laser Powder Bed Fusion of Defect-Free NiTi Shape Memory Alloy Parts with Superior Tensile Superelasticity. *Acta Materialia* [online]. 2022, **229**, 117781 [vid. 2025-03-12]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:10.1016/J.ACTAMAT.2022.117781
- [21] XUE, L., K. C. ATLI, S. PICAK, C. ZHANG, B. ZHANG, A. ELWANY, R. ARROYAVE a I. KARAMAN. Controlling martensitic transformation characteristics in defect-free NiTi shape memory alloys fabricated using laser powder bed fusion and a process optimization framework. *Acta Materialia* [online]. 2021, **215**, 117017 [vid. 2025-05-03]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:10.1016/J.ACTAMAT.2021.117017
- [22] JIANG, H., X. WANG, R. XI, G. LI, H. WEI, J. LIU, B. ZHANG, S. KUSTOV, K. VANMEENSEL, J. VAN HUMBEECK, J. VAN HUMBEECK a G. ZHAO. Size effect on the microstructure, phase transformation behavior, and mechanical properties of NiTi shape memory alloys fabricated by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Science and Technology* [online]. 2023, **157**, 200–212. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmst.2023.02.026

- [23] FARJAM, Nazanin, Mohammadreza NEMATOLLAHI, Mohsen Taheri ANDANI, Mohammad J. MAHTABI a Mohammad ELAHINIA. Effects of size and geometry on the thermomechanical properties of additively manufactured NiTi shape memory alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, **107**(7–8), 3145–3154 [vid. 2024-04-17]. ISSN 14333015. Dostupné z: doi:10.1007/S00170-020-05071-W/FIGURES/10
- [24] ABAD, Ehsan Masoumi Khalil, Damiano PASINI a Renzo CECERE. Shape optimization of stress concentration-free lattice for self-expandable Nitinol stent-grafts. *Journal of Biomechanics* [online]. 2012, **45**, 1028–1035 [vid. 2024-03-24]. Dostupné z: doi:10.1016/j.jbiomech.2012.01.002
- [25] ALAIMO, Gianluca, Ferdinando AURICCHIO, Michele CONTI a Massimiliano ZINGALES. Multi-objective optimization of nitinol stent design. *Medical Engineering & Physics* [online]. 2017, **47**, 13–24 [vid. 2023-11-09]. ISSN 1350-4533. Dostupné z: doi:10.1016/J.MEDENGPHY.2017.06.026
- [26] GU, Xiaojun, Yinfeng CAO, Jihong ZHU, Jun WANG, Weihong ZHANG a Ziad MOUMNI. Shape optimization of SMA structures with respect to fatigue. *Materials & Design* [online]. 2020, **189**, 108456 [vid. 2023-11-08]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATDES.2019.108456
- [27] PANT, Sanjay, Georges LIMBERT, Nick P CURZEN a Neil W BRESSLOFF. Multiobjective design optimisation of coronary stents. *Biomaterials* [online]. 2011, **32**(31), 7755–7773 [vid. 2024-04-09]. Dostupné z: doi:10.1016/j.biomaterials.2011.07.059
- [28] PANT, S, · N W BRESSLOFF a G LIMBERT. Geometry parameterization and multidisciplinary constrained optimization of coronary stents Sanjay Pant · Neil W. Bressloff · Georges Limbert. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology* [online]. 2012, **11**(1–2), 61–82 [vid. 2024-04-10]. Dostupné z: doi:10.1007/s10237-011-0293-3
- [29] MUNFORD, Maxwell, Umar HOSSAIN, Shaaz GHOUSE a Jonathan R.T. JEFFERS. Prediction of anisotropic mechanical properties for lattice structures. *Additive Manufacturing* [online]. 2020, **32**, 101041 [vid. 2025-01-25]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/J.ADDMA.2020.101041
- [30] XU, Shanqing, Jianhu SHEN, Shiwei ZHOU, Xiaodong HUANG a Yi Min XIE. Design of lattice structures with controlled anisotropy. *Materials & Design* [online]. 2016, **93**, 443–447 [vid. 2025-01-25]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATDES.2016.01.007

- [31] COWIN, Stephen C. The relationship between the elasticity tensor and the fabric tensor. *Mechanics of Materials* [online]. 1985, **4**(2), 137–147 [vid. 2025-01-25]. ISSN 0167-6636. Dostupné z: doi:10.1016/0167-6636(85)90012-2
- [32] STEVEN, Grant P. Homogenization of multicomponent composite orthotropic materials using FEA. *Communications in numerical methods in engineering* [online]. 1997, **13**, 517–531 [vid. 2025-01-25]. ISSN 10698299. Dostupné z: doi:10.1002/(SICI)1099-0887(199707)13:7<517::AID-CN74>3.0.CO;2-L
- [33] MEYERS, Marc A. a Krishan Kumar CHAWLA. *Mechanical Behavior of Materials*. 2. vyd. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [34] ALKHATIB, Sami E., Ali KARRECH a Timothy B. SERCOMBE. Isotropic energy absorption of topology optimized lattice structure. *Thin-Walled Structures* [online]. 2023, **182**, 110220 [vid. 2025-03-23]. ISSN 0263-8231. Dostupné z: doi:10.1016/J.TWS.2022.110220
- [35] THAWON, Itthidet, Thongchai FONGSAMOOTR, Ramnarong WANISON a Pana SUTTAKUL. Mechanical anisotropy of 2D lattice structures. *AIP Conference Proceedings* [online]. 2024, **3086**(1), 48 [vid. 2025-03-19]. ISSN 15517616. Dostupné z: doi:10.1063/5.0204774/3294083
- [36] XU, Shanqing, Jianhu SHEN, Shiwei ZHOU, Xiaodong HUANG a Yi Min XIE. Design of lattice structures with controlled anisotropy. *Materials & Design* [online]. 2016, **93**, 443–447 [vid. 2024-09-21]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATDES.2016.01.007
- [37] LUKAČOVIČ, Samuel. *Zpracování NiTi slitiny technologií SLM*. Brno, 2023. 73 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
- [38] *Carpenter Additive* [online]. 2022 [vid. 2024-10-19]. Dostupné z: <https://www.carpenteradditive.com/>
- [39] VÉLE, Filip, Michal ACKERMANN, Václav BITTNER a Jiří ŠAFKA. Influence of Selective Laser Melting Technology Process Parameters on Porosity and Hardness of AISI H13 Tool Steel: Statistical Approach. *Materials* [online]. 2021, **14**(20), 6052 [vid. 2024-10-18]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/MA14206052
- [40] GIBSON, Lorna J. a Michael F. ASHBY. Cellular Solids: Structure and Properties. *Cellular Solids: Structure and Properties, Second Edition* [online]. 1997, 1–510 [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781139878326

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka	Význam
2D	Dvojměrný
BCC	Body-centered cubic, typ metamateriálu
CAD	Computer Aided Design, počítačové modelování
DIC	Digital image Correlation, technologie vyhodnocení obrazového záznamu
EXP	Experiment
L-PBF	Laser Powder Bed Fusion, technologie aditivní kovové výroby
MKP	Metoda konečných prvků
NiTi	Nikl-Titanová slitina
PE	Pseudoelasticita
RVE	Reprezentative Volume Element, reprezentativní objemový prvek
SC	Simple cubic, typ metamateriálu
SE	Superelasticita
SEM	Rastrovací elektronová mikroskopie
SMA	Shape Memory Alloy, slitina s tvarovou pamětí
SME	Shape Memory Effect, efekt tvarové paměti
Z-M	Zaki a Moumni materiálové modely

Symbol	Jednotka	Veličina
$A$	-	Míra anizotropie
$a$	mm	Velikost buňky
$a_0$	mm	Původní výška vzorku
$A_f$	°C	Teplota ukončení austenitické transformace
$A_p$	°C	Teplota austenit peak
$A_s$	°C	Teplota počátku austenitické transformace
$C$	MPa	Matice tuhosti
$E_A$	MPa	Modul pružnosti austenitu
$ED$	J·mm <sup>-3</sup>	Energetická hustota laseru
$E_{ijk}$	MPa	Směrový modul pružnosti
$e_L$	-	Transformační přetvoření
$E_n$	-	Normalizovaný modul pružnosti
$E_S$	MPa	Modul pružnosti martenzitu
$E_s$	MPa	Modul pružnosti základového materiálu
$F_i$	N	Okamžitá reakční síla
$l_x, l_y, l_z$	mm	Rozměry RVE

$\ell_{i1}, \ell_{i2}, \ell_{i3}$	-	Směrové kosiny
$M_s$	°C	Teplota počátku martenzitické transformace
$Q_{10}, Q_{50}, Q_{90}$	μm	Distribuční funkce velikosti částic prášku
$R$	mm	Poloměr zaoblení rohů buňky
$S$	MPa <sup>-1</sup>	Matice poddajnosti
$s$	mm	Šířka spoje buněk
$T$	°C	Teplota prostředí
$t$	mm	Nominální tloušťka stěn
$y_i$	mm	Okamžitá hodnota stlačení vzorku
$z$	%	Zúžení stěny
$\alpha$	-	Parametr určující rozdíl odezvy materiálu v tahu a tlaku
$\Delta l_x, \Delta l_y, \Delta l_z$	-	Deformace RVE
$\varepsilon$	-	Poměrná deformace
$\boldsymbol{\varepsilon}$	-	Vektor přetvoření
$\varepsilon_i$	-	Okamžitá poměrná deformace
$\boldsymbol{\sigma}$	MPa	Vektor napětí
$\sigma_{AY}$	MPa	Mez kluzu austenitu
$\sigma_{FAS}$	MPa	Koncové napětí pro dopřednou fázovou transformaci
$\sigma_{FSA}$	MPa	Koncové napětí pro zpětnou fázovou transformaci
$\sigma_i$	MPa	Okamžité smluvní napětí
$\sigma_{MY}$	MPa	Mez kluzu martenzitu
$\sigma_{RED}$	MPa	Redukované napětí
$\sigma_{SAS}$	MPa	Počáteční napětí pro dopřednou fázovou transformaci
$\sigma_{SIM}$	MPa	Kritické napětí pro spuštění martenzitické transformace
$\sigma_{SSA}$	MPa	Počáteční napětí pro zpětnou fázovou transformaci

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	PRISMA diagram selekce publikací .....	16
Obr. 2-2	Efekt tvarové paměti a superelasticita u SMA [1].....	18
Obr. 2-3	Vliv historie zatěžování na napěťově-deformační charakteristiku: a) McKelvey a kol. [9]; b) Murasawa a kol. [10].....	19
Obr. 2-4	Auricchiův materiálový model: a) Namáhání trojbodým ohybem; b) Namáhání jednoosým tahem [12] .....	20
Obr. 2-5	Napěťově-deformační charakteristika dle Souza-Auricchio modelu [15] .....	21
Obr. 2-6	Z-M model – porovnání experimentálních a numerických výsledků při tahovém zatěžování: a) První cyklus; b) Dvacátý cyklus; c) Vývoj zbytkového přetvoření [16] ....	22
Obr. 2-7	Závislost kvality výroby na procesních parametrech; isočáry značí hodnotu hatch distance ( $\mu\text{m}$ ) [21].....	23
Obr. 2-8	Vliv tloušťky stěny: a) Vliv na porozitu; b) Vliv na teplotu $M_s$ ; c) Vliv na teplotu $A_f$ [22] .....	24
Obr. 2-9	Optimalizovaná geometrie: a) elementární buňka; b) parametry pro návaznost G2; c) porovnání výchozího a optimalizovaného tvaru [24] .....	25
Obr. 2-10	Zúžený profil prutu: a) Geometrie parabolického profilu; b) Průběh cyklického přetvoření [25].....	26
Obr. 2-11	Porovnání hodnot faktoru bezpečnosti vůči únavovému porušení: a) Původní segment; b) Optimalizovaný segment [26] .....	26
Obr. 2-12	N-shaped spoj elementárních buněk [27].....	26
Obr. 2-13	Strategie návrhu elementárních buněk s kontrolovanou anizotropií: a) kombinace dvou typů elementárních buněk; b) optimalizace průměrů prutů [30] .....	27
Obr. 2-14	Směrová závislost modulu pružnosti SC a BCC elementárních buněk [34] ...	29
Obr. 2-15	Směrová závislost modulu pružnosti elementárních buněk typu square, body-centered square, honeycomb a diamond [35].....	30
Obr. 2-16	Směrová závislost modulu pružnosti topologicky optimalizované buňky [34]	30
Obr. 3-1	Kombinace více elementárních buněk stejné geometrie .....	35
Obr. 3-2	Směrová závislost modulu pružnosti jednotlivých geometrií buněk.....	36
Obr. 4-1	Schéma postupu práce.....	37
Obr. 4-2	Okrajové podmínky pro analýzy vlivu modifikací geometrie elementární buňky .....	41

Obr. 4-3	Posuzované geometrie elementární buňky.....	42
Obr. 4-4	Okrajové podmínky pro fázi testování reprezentativních metamateriálů .....	43
Obr. 4-5	Okrajové podmínky pro stanovení minimálního počtu buněk a) s využitím symetrie, b) bez využití symetrie; c) sledovaná změna vzdálenosti dvou bodů .....	44
Obr. 4-6	Kontrolované rozměry vzorků .....	45
Obr. 4-7	Přehled vzorků pro experimentální testování .....	45
Obr. 4-8	Snímek z elektronové mikroskopie prášku [38] .....	46
Obr. 4-9	Schéma technologie L-PBF (upraveno dle [39]) .....	47
Obr. 4-10	Okrajové podmínky pro verifikační úlohy .....	49
Obr. 5-1	Rozsah pseudoelastických deformací posuzovaných geometrií.....	50
Obr. 5-2	Rozložení $\sigma_{RED}$ a deformační mechanismy posuzovaných geometrií .....	51
Obr. 5-3	a) Míra anizotropie mechanických vlastností, čárkovaná čára značí izotropní mechanické vlastnosti; b) Směrová odezva modulu pružnosti posuzovaných morfologií. 52	
Obr. 5-4	Deformační mechanismy morfologií buněk při tlakovém ( $0^\circ$ , $90^\circ$ ) a smykovém ( $45^\circ$ ) zatěžování.....	52
Obr. 5-5	Průběh a) redukované napětí a b) rozsahu pseudoelastických deformací v závislosti na tloušťce stěny $t$ a poloměru zaoblení $R$ .....	54
Obr. 5-6	Průběh redukovaného napětí $\sigma_{RED}$ , modulu pružnosti $E_{x,y}$ a rozsahu PE deformací na poloměru zaoblení $R$ pro $t = 2 \text{ mm}$ .....	55
Obr. 5-7	Závislost rozsahu pseudoelastických deformací na poměru $R/t$ pro podrobněji analyzovanou oblast.....	55
Obr. 5-8	Průběh míry anizotropie v závislosti na tloušťce stěny $t$ a poloměru zaoblení $R$ .....	56
Obr. 5-9	Deformační mechanismy buněk s různým poloměrem zaoblení při tlakovém ( $0^\circ$ , $90^\circ$ ) a smykovém ( $45^\circ$ ) zatěžování.....	56
Obr. 5-10	Průběh a) redukovaného napětí a b) rozsahu pseudoelastických deformací v závislosti na tloušťce stěny $t$ a zúžení stěny $z$ .....	58
Obr. 5-11	Průběh redukovaného napětí $\sigma_{RED}$ , modulu pružnosti $E_{x,y}$ a rozsahu PE deformací na zúžení stěny $z$ pro $t = 2 \text{ mm}$ .....	59
Obr. 5-12	a) Průběh míry anizotropie $A$ v závislosti na tloušťce stěny $t$ a zúžení stěny $z$ ; b) Směrová odezva modulu pružnosti pro $t = 2 \text{ mm}$ .....	59
Obr. 5-13	Rozložení celkového přetvoření a ztráta stability při využití n-shaped spojů .	60
Obr. 5-14	Geometrie a rozměry přímého napojení buněk.....	61

Obr. 5-15 Průběh a) redukovaného napětí a b) rozsahu PE deformací v závislosti na tloušťce stěny $t$ a šířce spoje $s$ .....	62
Obr. 5-16 Průběh závislosti $\sigma_{RED}$ , modulu pružnosti $E_{x,y}$ a rozptylu PE deformací na šířce spoje pro $t = 2 \text{ mm}$ .....	63
Obr. 5-17 a) Průběh míry anizotropie $A$ v závislosti na tloušťce stěny $t$ a šířce spoje $s$ ; b) Směrová odezva modulu pružnosti pro $t = 2 \text{ mm}$ .....	63
Obr. 5-18 Vliv spojů na hodnoty zúžení stěn pro dosažení izotropních mechanických vlastností.....	64
Obr. 5-19 Vliv velikosti buňky; a) optimální hodnoty $R$ ; b) optimální hodnoty $s$ ; c) rozsah PE deformací.....	65
Obr. 5-20 Vliv velikosti buňky na rozložení redukovaného napětí ( $t = 1,4 \text{ mm}$ ) .....	65
Obr. 5-21 Vliv velikosti buňky; a) optimální hodnota zúžení stěny; b) deformace při tlakovém a smykovém zatěžování ( $t = 1,4 \text{ mm}$ ).....	66
Obr. 5-22 a) Deformace metamateriálu; b) Odchyłka sledované veličiny od předchozí konfigurace .....	67
Obr. 5-23 Rozsah pseudoelastických deformací metamateriálů v porovnání s výsledky testování elementárních buněk.....	67
Obr. 5-24 Ztráta stability metamateriálu vlivem lokálního dosažení plně martenzitické fáze .....	68
Obr. 5-25 Vyrobené vzorky se zaznačeným směrem pohybu recoateru (REC) a proudění atmosféry (FLOW).....	69
Obr. 5-26 Průběh smluvního napětí; a) $t = 2,0 \text{ mm}$ ; b) $t = 1,8 \text{ mm}$ ; c) $t = 1,6 \text{ mm}$ ; d) $t = 1,4 \text{ mm}$ ; e) $t = 1,2 \text{ mm}$ ; f) $t = 1,0 \text{ mm}$ .....	71
Obr. 5-27 Srovnání měřených veličin – buňky s optimálními parametry .....	72
Obr. 5-28 Srovnání deformačních map – buňky s optimálními parametry; experiment (nahore) a MKP (dole).....	72
Obr. 5-29 Průběh smluvního napětí; a) $R = 2,2 \text{ mm}$ ; b) $R = 3,0 \text{ mm}$ ; c) $R = 3,5 \text{ mm}$ ; d) $R = 4,0 \text{ mm}$ .....	73
Obr. 5-30 Srovnání měřených veličin – vliv velikosti poloměru zaoblení .....	74
Obr. 5-31 Srovnání deformačních map – vliv velikosti poloměru zaoblení; experiment (nahore) a MKP (dole).....	74
Obr. 5-32 Průběh smluvního napětí; a) $z = 50 \%$ ; b) $z = 34 \%$ ; c) $z = 18 \%$ ; d) $z = 0 \%$ .....	75
Obr. 5-33 Srovnání měřených veličin – vliv proměnné tloušťky stěn .....	76

Obr. 5-34 Srovnání deformačních map – vliv proměnné tloušťky stěn; experiment (nahore) a MKP (dole).....	76
Obr. 5-35 Průběh smluvního napětí metamateriálů s nominálními tloušťkami stěn a) $t = 2,0 \text{ mm}$ ; b) $t = 1,8 \text{ mm}$ ; c) $t = 1,6 \text{ mm}$ ; d) $t = 1,4 \text{ mm}$ ; e) $t = 1,2 \text{ mm}$ ; f) $t = 1,0 \text{ mm}$ ...	77
Obr. 5-36 Srovnání měřených veličin – metamateriály .....	78
Obr. 5-37 Srovnání deformačních map – metamateriály; experiment (nahore) a MKP (dole) .....	79
Obr. 6-1 Schéma závislosti rozsahu pseudoelastických deformací na hodnotách analyzovaných parametrů s vyznačenou jejich optimální hodnotou .....	80
Obr. 6-2 Mechanismy deformace metamateriálů: a) ohyb kolem plastických kloubů; b) buckling; c) křehký lom [40] .....	81
Obr. 6-3 Zúžené stěny působící jako pseudoelastické klouby .....	82
Obr. 6-4 Oblasti maximálních hodnot a) redukovaného napětí; b) transformačního přetvoření.....	83
Obr. 6-5 Vliv velikosti poloměru zaoblení a zúžených stěn na výslednou tuhost buňky a rozsah pseudoelastických deformací .....	84
Obr. 6-6 Vliv polohy spojů buněk na směrovou závislost modulu pružnosti: a) izotropní odezva; b) zvýšení tuhosti v jednom směru; c) zvýšení tuhosti ve dvou směrech.....	86

## 12 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1	Proměnné veličiny pro testované predikce.....	39
Tab. 4-2	Mechanické vlastnosti materiálu [37] .....	40
Tab. 4-3	Vstupní parametry pro jednotlivé analýzy .....	42
Tab. 4-4	Chemické složení nitinolového prášku [38].....	46
Tab. 4-5	Procesní parametry .....	47
Tab. 4-6	Mechanické vlastnosti superelastického materiálu použité pro verifikační analýzy .....	48
Tab. 5-1	Hodnoty poloměru zaoblení $R$ a zúžení stěny $z$ pro dosažení izotropních mechanických vlastností .....	60
Tab. 5-2	Průměrné odchylky skutečných rozměrů vzorků .....	69

## 13 SEZNAM PŘÍLOH

### **Vložené přílohy**

*Příloha A* – Přehled vzorků pro experimentální testování a jejich parametrů

*Příloha B* – Rozměry a hmotnosti vyrobených vzorků

*Příloha C* – Přehled vyhodnocených veličin – experiment

*Příloha D* – Přehled vyhodnocených veličin – verifikační analýza

### **Externí přílohy**

*Příloha 1* – Výsledky výpočtového modelování a experimentálního testování

*Příloha 2* – Výpočtové modelování

*Příloha 3* – CAD modely

*Příloha 4* – Experimentální testování – tlaková zkouška

*Příloha 5* – Experimentální testování – DIC analýza

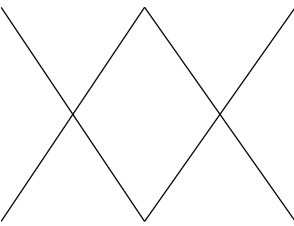
Vložené přílohy

Příloha A – Přehled vzorků pro experimentální testování a jejich parametrů

Sada	Vzorek	t (mm)	R (mm)	z (mm)	z (%)	s (mm)
Buňky s optimálními parametry	A1	2,0	3,00	0,52	74,00	0,5
	A2	1,8	2,88	0,58	67,78	
	A3	1,6	2,72	0,65	59,38	
	A4	1,4	2,66	0,64	54,29	
	A5	1,2	2,40	0,66	45,00	
	A6	1,0	1,95	0,66	34,00	
Vliv velikosti poloměru zaoblení	B1	2,0	2,20			1,0
	B2		3,00			
	B3		3,50			
	B4		4,00			
Vliv proměnné tloušťky stěn	C1	1,0	1,95	0,50	50,00	0,5
	C2			0,82	18,00	
	C3			0,98	2,00	
	(A6)			(0,66)	(34,00)	
Metamateriál	S1	Viz A1				
	S2	Viz A2				
	S3	Viz A3				
	S4	Viz A4				
	S5	Viz A5				
	S6	Viz A6				

*Příloha B – Rozměry a hmotnosti vyrobených vzorků*

Uvedené hodnoty představují průměr z pěti vzorků. Detailní hodnoty pro každý vzorek jsou dostupné v Příloze 1.

Vzorek	Šířka (mm)	Hloubka (mm)	t (mm)	z (mm)	z (%)	s (mm)	Hmotnost (g)
A1	10,35	11,1	1,93	0,48	75,13	0,53	3,637
A2	10,37		1,71	0,52	69,59	0,52	3,605
A3	10,38		1,50	0,58	61,33	0,53	3,580
A4	10,43		1,29	0,57	55,81	0,48	3,409
A5	10,55		1,10	0,57	48,18	0,52	3,345
A6	10,50		0,90	0,57	36,67	0,48	3,298
B1	10,81	11,1	1,90		0,95	5,737	
B2	10,77		1,88		0,95	5,557	
B3	10,86		1,92		0,99	5,469	
B4	10,81		1,93		0,94	5,317	
C1	10,43	11,1	0,90	0,46	48,89	0,54	3,100
C2	10,41		0,91	0,76	16,48	0,51	3,504
C3	10,39		0,93	0,91	2,15	0,50	3,715
(A6)	(10,50)		(0,90)	(0,57)	(36,67)	(0,48)	(3,298)
S1	10,41	11,3	1,87	0,46	75,40	0,51	56,700
S2	10,43		1,66	0,51	69,28	0,49	55,972
S3	10,40		1,45	0,57	60,69	0,49	55,830
S4	10,40		1,28	0,57	55,47	0,51	51,686
S5	10,41		1,07	0,59	44,86	0,51	50,678
S6	10,46		0,90	0,59	34,44	0,51	49,175

*Příloha C – Přehled vyhodnocených veličin – experiment*

<b>Vzorek</b>	<b>Modul pružnosti (MPa)</b>	<b>Poissonův poměr (-)</b>	<b>Zbytková deformace (%)</b>
<b>A1</b>	593,10 ± 16,81	0,960 ± 0,069	1,917 ± 0,574
<b>A2</b>	579,50 ± 109,87	0,867 ± 0,053	1,230 ± 0,118
<b>A3</b>	521,19 ± 31,71	0,801 ± 0,050	1,114 ± 0,384
<b>A4</b>	416,99 ± 37,80	0,814 ± 0,028	1,943 ± 1,568
<b>A5</b>	388,95 ± 193,56	0,792 ± 0,035	1,250 ± 0,403
<b>A6</b>	237,47 ± 11,17	0,771 ± 0,026	2,336 ± 1,422
<b>B1</b>	2827,90 ± 146,39	0,784 ± 0,066	1,553 ± 0,225
<b>B2</b>	3115,18 ± 229,65	0,790 ± 0,029	1,813 ± 0,190
<b>B3</b>	2954,40 ± 197,18	0,746 ± 0,072	2,079 ± 0,810
<b>B4</b>	3834,23 ± 992,08	0,828 ± 0,085	1,121 ± 0,121
<b>C1</b>	152,10 ± 4,98	0,671 ± 0,014	2,048 ± 2,706
<b>C2</b>	263,14 ± 13,99	0,782 ± 0,056	0,804 ± 0,435
<b>C3</b>	334,07 ± 9,05	0,827 ± 0,060	1,246 ± 0,452
<b>(A6)</b>	237,47 ± 11,17	0,771 ± 0,026	2,336 ± 1,422
<b>S1</b>	453,01	0,736	-
<b>S2</b>	417,29	0,717	2,149
<b>S3</b>	425,56	0,683	1,202
<b>S4</b>	320,04	0,682	1,302
<b>S5</b>	252,01	0,645	0,267
<b>S6</b>	162,17	0,573	0,252

*Příloha D – Přehled vyhodnocených veličin – verifikační analýza*

Vzorek	Modul pružnosti (MPa)		Poissonův poměr (-)	
	Martenzit	SE	Martenzit	SE
<b>A1</b>	603,12	371,96	0,758	0,758
<b>A2</b>	532,44	317,21	0,742	0,733
<b>A3</b>	501,63	315,73	0,702	0,688
<b>A4</b>	358,61	216,43	0,690	0,688
<b>A5</b>	275,64	168,35	0,635	0,636
<b>A6</b>	192,26	118,37	0,592	0,593
<b>B1</b>	2926,60	1791,00	0,588	0,590
<b>B2</b>	2996,90	1831,10	0,641	0,637
<b>B3</b>	3238,90	1982,90	0,669	0,670
<b>B4</b>	3424,40	2101,30	0,696	0,694
<b>C1</b>	161,04	99,09	0,584	0,582
<b>C2</b>	258,78	158,26	0,620	0,605
<b>C3</b>	315,22	188,90	0,657	0,651
<b>(A6)</b>	192,26	118,37	0,592	0,593
<b>S1</b>	543,66	330,81	0,856	0,856
<b>S2</b>	516,67	325,88	0,837	0,834
<b>S3</b>	489,95	308,64	0,783	0,781
<b>S4</b>	390,53	244,59	0,780	0,778
<b>S5</b>	305,26	190,59	0,716	0,715
<b>S6</b>	217,26	134,88	0,649	0,649