



Vysoké Učení Technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

VÝPOČTOVÉ MODELY A NELINEÁRNÍ ANALÝZY ZATĚŽOVÁNÍ MIKRO-PRUTOVÝCH STRUKTUR VYROBENÝCH TECHNOLOGIÍ SELECTIVE LASER MELTING

Ing. Ondřej Červinek

Pojednání k státní doktorské zkoušce
Discourse on the Dissertation Thesis

Brno 2020



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

VÝPOČTOVÉ MODELY A NELINEÁRNÍ ANALÝZY ZATĚŽOVÁNÍ MIKRO-PRUTOVÝCH STRUKTUR VYROBENÝCH TECHNOLOGIÍ SELECTIVE LASER MELTING

NUMERICAL MODELS AND NON-LINEAR ANALYSIS OF LATTICE
STRUCTURES LOADING MADE BY SELECTIVE LASER MELTING
TECHNOLOGY

Ing. Ondřej Červinek

Autor práce
Author

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

Vedoucí práce
Supervisor

Pojednání ke státní doktorské zkoušce
Discourse on the Dissertation Thesis

Brno 2020

OBSAH

OBSAH

1	ÚVOD	3
2	VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	4
2.1	Vymezení předběžného cíle disertační práce	9
3	SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	10
3.1	Výpočtové přístupy a modely geometrie	10
3.2	Modely materiálu	28
3.3	Absorpce energie	39
4	ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ	56
4.1	Schopnost struktur absorbovat mechanickou energii	56
4.2	Modely materiálu	57
4.3	Modely geometrie	59
4.4	Stěžejní závěry plynoucí z rešerše	61
5	VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ	62
5.1	Zaměření disertační práce	62
5.2	Cíl disertační práce	62
5.3	Vědecké otázky a pracovní hypotézy	63
5.4	Způsob řešení a použité metody zkoumání	65
5.4.1	Výroba a testování vzorků	66
5.4.2	Model geometrie	69
5.4.3	Mechanické testování	70
5.4.4	Model materiálu	72
5.4.5	Výpočtové přístupy	72
5.4.6	Verifikace výpočtového modelu	74
5.4.7	Plán publikací	75
6	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	77
6.1	Příprava výroby	77

6.2	Materiálové vlastnosti	78
6.3	Geometrické imperfekce	80
6.4	Vliv dynamického zatěžování	81
6.5	Výpočtová úloha	83
6.6	Prezentace dosavadních výsledků	84
7	ZÁVĚR	86
8	BIBLIOGRAFIE	87
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	95
10	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	98
11	SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	102

1 ÚVOD

Pro tlumení velkých rázů mechanické energie (např. náraz automobilu) se v současnosti využívají především plasticky deformované absorbéry ze speciálně tvarovaných profilů a jeklů z měkkých ocelí nebo hliníkových slitin. Jejich hlavním účelem je disipace kinetické energie v průběhu rázového děje. Společným rysem absorbérů je snaha o rovnoměrné pohlcení energie rázového zatížení v čase při jejich současné deformaci. Změnou tvaru a použitého materiálu lze tyto absorbéry přizpůsobit pro konkrétní využití.

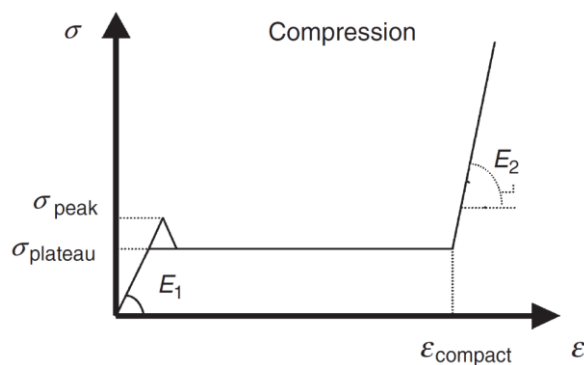
Pro vysoce specializované aplikace se využívají komponenty, které jsou přesně navrženy pro cílený druh deformace. Do této kategorie lze řadit porézní absorbéry tvořené pravidelně se opakující prostorovou strukturou. Jedná se například o kovové (většinou hliníkové) pěny nebo strukturu typu *honeycomb*. Hliníkové pěny obsahují velký objemový podíl pórů, které v případě rázového zatížení působí jako pružný člen. Vysoká pórovitost (75-95 %) je charakteristickým znakem kovových pěn. Vznik pórů není přesně řízen a porézní struktura je nepravidelná.

Alternativní možností je využití strukturovaných dílů vyrobených aditivní technologií selective laser melting (SLM). Pomocí technologie SLM je možné přesně řídit tvar strukturovaného materiálu a s tím související mechanické vlastnosti. Navíc lze touto technologií efektivním způsobem kombinovat absorbéry více typů. V porovnání s využitím hliníkových pěn lze takto zpracovávat širší škálu kovových materiálů, jako jsou např. titanové slitiny nebo nástrojové oceli. Dalším benefitem je velká tvarová volnost mikro-prutových struktur. Pomocí toho lze navrhnout strukturovaný materiál na specifický objemový podíl a tím řídit například jeho tuhost.

Pomocí struktur vyráběných aditivními technologiemi je možné vyvíjet odlehčené díly, které mají potenciál v oblasti absorpce mechanické energie. Dosavadní výzkum ukázal, že tyto struktury jeví specifický druh chování v porovnání se základovým materiálem. Jednou z předností mikro-prutového materiálu je vysoká kapacita absorpce energie vztažená k jednotce hmotnosti. Za účelem efektivního návrhu a využití mikro-prutových struktur pro absorpci energie je nutné matematicky popsat jejich deformační chování. Takový popis umožňují výpočtové softwary pracující s metodou konečných prvků (MKP). Pro jeho získání je zapotřebí definovat vstupní parametry modelu materiálu, geometrie a okrajových podmínek (kontaktů) zahrnujících nelineární chování. Numerický model, který by reflektoval společné působení nelinearit všech typů a zároveň vliv imperfekcí a dynamického zatěžování zatím nebyl předmětem studií. Toto pojednání k disertační práci navazuje na dosavadní poznání vytvořením MKP modelů spojujících všechny výše popsané aspekty.

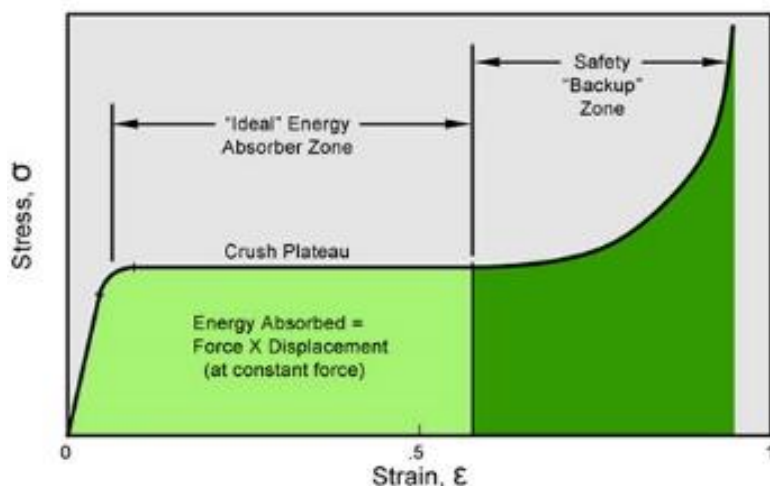
2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Pro absorpci mechanické energie, například v dopravním průmyslu, jsou běžně využívány speciálně tvarované profily z plechů, trubek a jeklů. Vhodným tvarováním geometrie dílů lze zvýšit množství energie, kterou je schopen absorbér při své deformaci disipovat [1]. Tento postup však má svá omezení. Změnou tvaru může dojít k navýšení tuhosti, která se na počátku plastické deformace absorbéru projeví skokovou změnou silového působení – vznik píku (viz Obr. 2-1) [2]. Tento skokový nárůst síly je nežádoucí a může ohrozit posádku vozidla.



Obr. 2-1 Idealizovaná křivka napětí v závislosti na přetvoření mikro-prutové struktury v tlaku [2]

Nové aplikace kombinují tyto konvenční absorbéry s porézními strukturovanými materiály [3] za účelem zvýšení jejich absorpčních účinků při současné redukci silového píku [4]. V optimálním případě by mělo při zatěžování strukturovaného materiálu dojít k plynulému přechodu z oblasti elastických deformací do oblasti rovnoměrných plastických deformací, které budou probíhat do zhutnění porézního materiálu (viz Obr. 2-2) [12, 22]. Oblast rovnoměrných deformací, někdy popisována jako oblast progresivního kolapsu struktury, se nejvíce podílí na aktivní absorpci. Napětí v této fázi by mělo být konstantní, nebo případně monotónně stoupající [7]. Po této oblasti by měla následovat oblast zhutňování materiálu, za kterou již absorbér není schopen disipovat energii. Některé ze současných kovových pěn se tomuto modelu přibližují.



Obr. 2-2 Optimální chování napětí v závislosti na poměrné deformaci absorbéru při zatěžování [8]

Rozvoj aditivních technologií v posledních letech umožnil využívat nové typy porézního materiálu, který má potenciál v aplikacích uvažujících absorpci mechanické energie [14, 15, 16]. Jedná se o mikro-prutové struktury vyrobené technologií SLM [12–16]. Porovnáním mikro-prutových struktur se strukturami typu *honeycomb* a hliníkovými pěny bylo zjištěno [10, 17], že mohou dosahovat podobného potenciálu v oblasti absorpce mechanické energie. Navíc lze pro výrobu těchto struktur použít celou škálu materiálů (SS316L [12], Ti₆V₄Al [18], AlSi₁₀Mg, AlSi₇Mg_{0,6} [19, 20]...). Geometrii mikro-prutových struktur je možné řídit poměrně přesně a parametricky ji navrhnout na cílený druh deformace nebo množství absorbované energie [15, 21, 22]. Takto mohou vznikat vysoce specializované díly, které budou dimenzované pro disipaci specifického energetického rázu s požadovaným charakterem deformačního chování.

Aby bylo možné přesně řídit, nebo dokonce predikovat, vlastnosti strukturovaných dílů při zatěžování, je nutné provést detailní analýzu chování mikro-prutových struktur při zatížení pomocí výpočtového modelu [23, 24]. Takový model obsahuje poznatky o vlastnostech struktur získaných mechanickým testováním [17]. Pro popis mechanických vlastností mikro-prutové struktury je třeba provést tahové a tlakové testy strukturovaného materiálu [10].

Z důvodu nákladného návrhu struktur pro absorpci energie se provádějí zjednodušené experimenty a numerické simulace. Pro simulace se využívají softwary pracující s implicitními i explicitními MKP řešiči [25–27]. Tyto analýzy spočívají ve výpočtovém řešení interakcí pevných těles nebo rázových vln se strukturovanými bloky, které reflektují podmínky experimentů [28]. Pomocí simulace je možné provádět změny modelu geometrie (materiálu) a pozorovat jejich dopad na chování struktury bez nutnosti její výroby.

Pro vytvoření spolehlivého výpočtového modelu je třeba přesně definovat okrajové a počáteční podmínky [12], sestavit model geometrie a definovat model materiálu [13, 28, 29]. K vytvoření modelu geometrie lze přistupovat několika způsoby:

1. Je použita zjednodušená geometrie prutů struktury. Ty jsou modelovány jako nosníkové elementy typu *beam* (Timoshenko, Belytschko-Schwer reprezentace...), kterým je přidělen kruhový průřez prutu [13, 17]. Výsledná přesnost výpočtu v základním stavu nicméně není vysoká, neboť elementy tohoto typu nereflktují ohybové momenty, které vznikají v uzlech struktury při jejím zatěžování. U této metody jsou navíc možnosti bližší inspekce napětí uvnitř struktury při zatěžování velmi omezeny z podstaty definice modelu. Přesnějších výsledků je možné dosáhnout umělým navýšením tuhosti nebo průměru prutů v oblasti uzlových bodů tak, aby nosníky reflektovaly skutečný dotyk [30].
2. Je použita zjednodušená geometrie struktury. Celá struktura je nahrazena blokem kubických *solid* elementů s vlastnostmi struktury [12]. Každá základní buňka je reprezentována jedním nebo více elementy. Tento přístup umožňuje výpočty i rozměrných struktur, protože je rychlý a má nízké nároky na hardware. Na druhou stranu není přesný a vyžaduje dodatečné úpravy.
3. Je použita nominální geometrie prutů, která uvažuje modelování pomocí objemových *solid* (čtyřstěn, šestistěn...) elementů [23, 8]. Je ze zmíněných metod nejpresnější, umožňuje detailní inspekci průběhu napětí uvnitř mikro-prutové struktury, ale vyžaduje nejdelší výpočetní časy a klade vyšší nároky na použitý hardware.

Výše uvedené přístupy pracující s nominálními nebo zjednodušenými geometriemi prutů umožňují vytváření modelů geometrie, které reflektují vliv výrobních imperfekcí spojených se změnami průřezů a tvarů prutu. Tato změna může být přiřazena rovnoměrně pro všechny pruty ve struktuře [31], nebo může být prutům či jejich částem přiřazována individuálně [32]. Takto popsaná geometrie mikro-prutových struktur by měla lépe vystihovat skutečný tvar jednotlivých prutů a s tím související mechanické vlastnosti struktury jako celku.

Literatura popisuje několik různých způsobů detekce a implementace anizotropních imperfekcí souvisejících se změnou geometrie prutů struktury. Za jednu ze základních metod by se dalo považovat vážení vzorků po výrobě [23]. Na základě skutečné hmotnosti struktury a analytického vzorce je možné stanovit přibližnou změnu velikosti průměru prutu oproti nominálním CAD datům (např. struktura *based cubic centred* (BCC)). Výpočtový průměr prutu je dán jako:

$$d = \sqrt{\frac{m_b}{\rho_p \pi N^3 L \sqrt{3}}} \quad (2-1)$$

kde m_b je měřená hmotnost vzorku, ρ_p je hustota základového materiálu, N počet buněk po délce strany struktury a L délka strany základní buňky. Tato metoda je jednoduchá a nevyžaduje speciální hardwarové vybavení. Na druhou stranu uvažuje pouze kruhový průřez prutu, který je konstantní po celé délce, což přesně neodpovídá reálnému tvaru.

Jiná metoda využívá k detekci geometrických imperfekcí mikro-prutových struktur skenů získaných počítačovou tomografií [33]. Metoda umožňuje vytvářet modely geometrie jako zjednodušenou rekonstrukci skenovaných dat [34]. Díky tomu lze přiřazovat přesné geometrické tvary jednotlivým segmentům prutů ve struktuře [35]. Tento přístup nabízí velmi detailní sestavení modelu geometrie. Skenováním jednoho vzorku však nemusí být dosaženo reprezentativní přesnosti pro celou sérii struktur a průměrování se zde aplikuje obtížně.

Kompromisem mezi oběma přístupy je skenování struktur pomocí metod optické digitalizace [31]. To spočívá ve skenování povrchu struktur po výrobě s následným vyhodnocením jejich průřezů v každém ze skenovaných prutů. Řezy jsou aproximovány zjednodušeným tvarem (kružnice nebo elipsa), jehož rozměry jsou průměrovány a slouží k vytvoření zobecněné geometrie společné pro všechny pruty struktury. To vede ke vzniku poměrně jednoduchého, avšak dostatečně reprezentativního modelu geometrie. Nevýhodou je absence skenů ploch prutů skrytých uvnitř struktury.

Dostupná literatura zmiňuje také modifikované varianty popsanych způsobů stanovení geometrických imperfekcí s různou mírou automatizace vyhodnocování skenů a tvorby modelů geometrie. Mimo výše zmíněné geometrické imperfekce se při výrobě technologií SLM objevují i imperfekce spojené s výskytem vnitřní nebo podpovrchové porozity. Implementací porozity do modelu materiálu může být rovněž zvýšena přesnost a kvalita simulace [32].

Dalším aspektem zásadně ovlivňujícím chování struktury v MKP simulaci při jejím zatěžování je model materiálu, a proto by měl co nejlépe popisovat skutečné vlastnosti struktury. Na základě kvazistatických testů je možné získat vstupní hodnoty standardně využívaného elasticko-plastického (bilineárního, případně multi-lineárního modelu materiálu) [5, 22, 36]. V některých případech je nutné hodnoty stanovit na základě testování tenkých prutových těles. Ta se svými vlastnostmi liší od objemového materiálu, přičemž lépe reflektují vlastnosti struktur [37]. Model materiálu sestavený na základě testů prutových těles je poté možné doplnit o kritérium poškození struktury uvažující rozpad polygonální sítě například při překročení hraničního zatížení (přetvoření) [28]. Vstupní hodnoty modelu získané z kvazistatických testů nicméně plně nereflektují chování materiálu při dynamickém zatěžování [38]. Se zvyšující se rychlostí zatěžování přesnost numerické simulace klesá. Začínají se projevovat efekty citlivosti základového materiálu na rychlost poměrné deformace, mikro-setrvačnost a nárazové zpevnění (eventuálně vliv teplot).

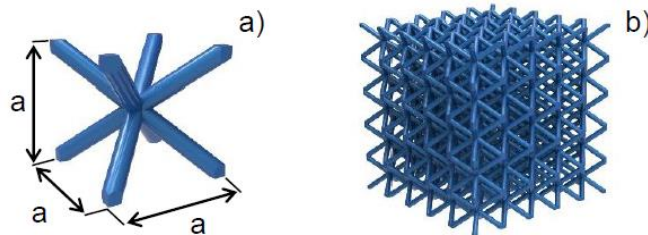
Nejvíce se při deformaci struktury projevuje citlivost základového materiálu na rychlost poměrné deformace [16]. Tento efekt je potřeba zanést do modelu materiálu v dynamické MKP simulaci. Toho je možné docílit například přidáním Cowper-Symondsova (C-S) konstitutivního vztahu, ke stávajícímu elasticko-plastickému modelu [1, 16]. Základní tvar této rovnice může být popsán jako:

$$\varepsilon_p = D \left(\frac{\sigma'_o}{\sigma_o} - 1 \right)^q \quad [s^{-1}] \quad \text{pro } \sigma'_o \geq \sigma_o \quad (2-2)$$

kde σ'_o je dynamicky působící napětí při jednoosé plastické deformaci o rychlosti poměrné deformace $\dot{\varepsilon}_p$. σ_o je staticky působící napětí a D a q konstanty materiálových parametrů.

Vstupní hodnoty tohoto konstitutivního vztahu je možné získat na základě dynamické tahové zkoušky provedené na modifikovaném Hopkinsonově zařízení (*split Hopkinson pressure bar* (SHPB)) [16]. Sérii měření lze získat hodnoty napětí při různých rychlostech poměrné deformace. Následnou regresní analýzou lze na základě proložených dat získat hodnoty materiálových konstant. Podobným způsobem je možné do modelu materiálu zavést některý z konstitutivních vztahů uvažujících deformační zpevnění [39].

Důležitý je také výběr samotné mikro-prutové struktury. Kvazistatickým zatěžováním několika vybraných typů struktur v MKP softwaru [40] bylo zjištěno, že mezi sledovanými je základní buňka s nejvyšší tuhostí FCC a struktura s nejvyšší tuhostí PFCC. V navazující studii [41] byly stejné typy mikro-prutových struktur podrobeny pádovému testu. Výsledky testu ukázaly, že struktury s vyšší tuhostí vykazují skokový nárůst působící síly při jejich deformaci. Tento jev se téměř neprojevoval u základní struktury typu BCC s nízkou tuhostí (viz Obr. 2-3).



Obr. 2-3 Prutová struktura BCC a) základní buňka b) struktura [41]

Vlastnosti struktury a jejích modifikovaných konfigurací s parabolicky zúženými pruty byly dále dynamicky testovány za účelem dosažení zvýšení absorpce energie [15]. Výsledky numerických simulací i experimentu ukázaly, že je možné modifikací dosáhnout vyšších mechanických vlastností i bez vzniku silového píku v počátku zatěžování. Autoři jiné studie [42] využili pro zvýšení mechanických vlastností struktury BCC její modifikace definované matematickými rovnicemi. Úpravy představovaly například odstranění ostrých hran v uzlech prutů, což mělo za následek pokles výskytu imperfekcí na povrchu struktury. Výsledky kvazistatické tlakové zkoušky ukázaly více než dvojnásobný nárůst disipované energie oproti původní konfiguraci. Potenciál struktury typu BCC tímto stále nebyl vyčerpán.

2.1 Vymezení předběžného cíle disertační práce

V oblasti výpočtového modelování zatěžování mikro-prutových struktur byla publikována celá řada vědeckých prací. Dosavadní studie se zaměřovaly na komplexní popis modelu materiálu, modelu geometrie včetně imperfekcí vznikajících ve výrobním procesu nebo sestavení jednotlivých výpočtových přístupů. Tyto dílčí faktory byly detailně studovány a současně zahrnuty do výpočtových úloh převážně v lineárně pružné oblasti chování materiálu pro kvazistatické zatěžování. V případě dynamického zatěžování mikro-prutových struktur naneštěstí toto spojení komplexního popisu chybí. Pro tvorbu numerických simulací deformačního chování struktur je však tento popis klíčový, a to zejména v oblasti nelineárních plastických deformací materiálu. Předběžným cílem práce je proto vytvořit výpočtový model nelineárního zatěžování mikro-prutové struktury, který bude reflektovat jevy spojené s rychlostí zatěžování struktury a výrobními geometrickými odchylkami. Parametrická studie založená na tomto modelu povede objasnění principů deformačního chování mikro-prutových struktur pro účely absorpce energie.

3 SHRNU TÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

V oblasti výpočtového modelování zatěžování mikro-prutových struktur vyráběných aditivními technologiemi byla publikována celá řada studií. Některé z těchto studií se zaměřují na mapování deformačního chování mikro-prutových struktur pomocí analytických a numerických přístupů porovnaných s experimenty. Následující kapitola obsahuje přehled nejdůležitějších z nich z hlediska postupu tvorby nelineárních výpočtových MKP analýz.

3.1 Výpočtové přístupy a modely geometrie

Následující studie popisují několik druhů výpočtových přístupů vyžadujících odlišné definování vstupních parametrů modelu materiálu, modelu geometrie a počátečních a okrajových podmínek. Při jejich stanovení u struktur s předpokládanou plastickou deformací je třeba zvážit vliv nelinearit materiálu, geometrie i kontaktů (okrajových podmínek). Zahrnutí vlivu těchto nelinearit spolu s korektním definováním geometrie umožňuje vytvářet numerické predikce deformačního chování strukturovaného materiálu s vysokou přesností.

[43] LUXNER, Mathias H., Juergen STAMPFL a Heinz E. PETTERMANN. Linear and nonlinear numerical investigations of regular open cell structures. In: *American Society of Mechanical Engineers, Aerospace Division (Publication) AD*. 2004. ISSN 07334230.

[30] LUXNER, Mathias H., Juergen STAMPFL a Heinz E. PETTERMANN. Finite element modeling concepts and linear analyses of 3D regular open cell structures. In: *Journal of Materials Science*. 2005. ISSN 00222461.

[44] LUXNER, Mathias H., Alexander WOESZ, Juergen STAMPFL, Peter FRATZL a Heinz E. PETTERMANN. A finite element study on the effects of disorder in cellular structures. *Acta Biomaterialia*. 2009. ISSN 17427061.

Autoři těchto studií se věnovali jednoosému tlakovému zatěžování mikro-prutových struktur vyrobených aditivními technologiemi (stereolitografie (SLA), selective laser sintering (SLS)) z polymerů. Ve svých pracích porovnávali shodu jednotlivých numerických přístupů mezi sebou i s experimentem především z hlediska výsledného modulu pružnosti struktur.

Model geometrie prvního z vytvořených přístupů byl popsán pomocí nosníkových *beam* elementů s kvadratickou interpolační funkcí (založené na teorii Timoshenka pro prutové soustavy). Taková reprezentace umožňovala popis velkých deformací (*large deformations*), ohybového namáhání, příčných smykových deformací a tahového namáhání. Model byl výpočetně nenáročný, nicméně jeho přesnost byla snížena z důvodu několika zjednodušení. Kontakt nosníkových prutů v uzlech byl bodový, což plně nereflektovalo podmínky skutečného kontaktu. Z tohoto důvodu byla zavedena korekce tuhosti v blízkém okolí uzlových bodů pomocí elementů s uměle navýšenou tuhostí ($\times 1000$). Přinejmenším 4 elementy byly použity pro diskretizaci části každého prutu mezi dvěma uzlovými oblastmi. Pro nosníkové průřezy bylo zvoleno 24 Gaussových integračních bodů (8 po obvodu krát 3 v radiálním směru).

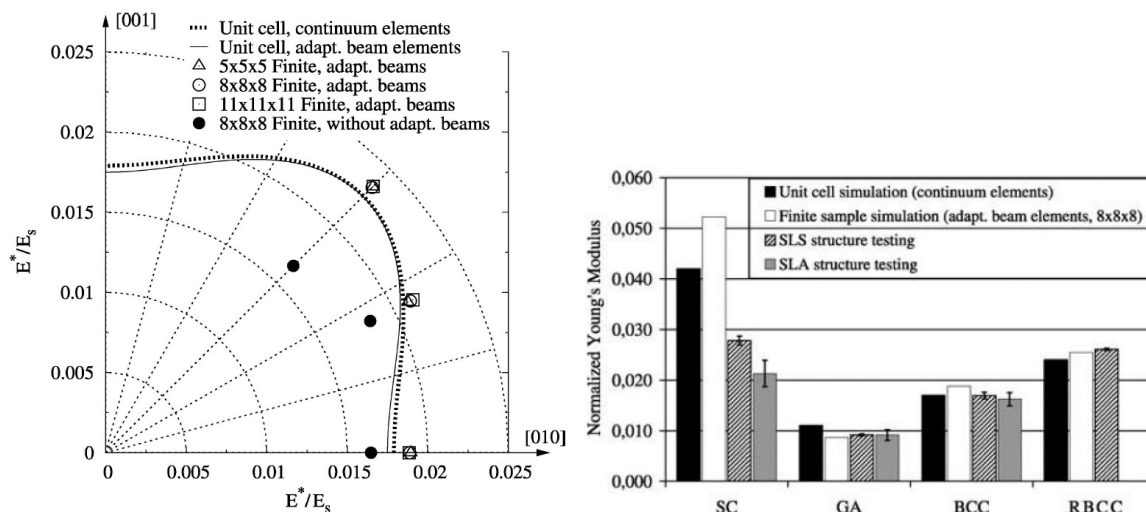
Pro detailní reprezentaci byl vytvořen numerický model využívající objemové elementy s kvadratickou interpolační funkcí (čtyřstěny). V simulacích byl využit elasticko-plastický model materiálu s názvem *J2 plasticity* s izotropním zpevněním (a konstantním modulem zpevnění). Vstupní hodnoty byly definovány na základě tahové zkoušky konvenčních objemových těles. Simulace neuvažovaly kontakt struktury s okolím nebo vzájemný kontakt prutů struktury (*self-contact*).

Výsledky

Porovnání výsledků jednotlivých simulací (viz Obr. 3-1 vlevo) ukázalo výrazně nižší hodnoty normalizovaného modulu pružnosti u přístupu využívajícího nosníkové *beam* elementy bez korekce tuhosti v blízkosti uzlových bodů (*Finite, without adapt. Beams*). Oproti tomu simulace uvažující nosníkové elementy s korekcí tuhosti (*Finite, adapt. beams*) se při porovnání velmi blížila hodnotám výpočtového modelu pracujícího s objemovými elementy, který zde byl uvažován jako referenční (*Unit cell, continuum elements*). Dobrou shodu vykazovalo také porovnání výpočtových modelů s experimentem pro většinu testovaných struktur (viz Obr. 3-1 vpravo).

Závěr

Výpočtový model pracující s nosníkovými *beam* elementy s korekcí tuhosti je schopen za jistých předpokladů predikovat modul pružnosti struktury s podobnou spolehlivostí jako model pracující s objemovými elementy. Jeho výhodou jsou nízké výpočetní nároky, a proto se hodí pro výpočet větších strukturovaných celků. Na druhou stranu z principu definice elementů není schopen poskytnout detailní informaci o vývoji napětí v jednotlivých prutech a uzlech struktury. Detailní posouzení napětí umožňuje model pracující s objemovými elementy, který je však zatížen vysokými nároky na výpočetní výkon a čas.



Obr. 3-1 Porovnání numerických přístupů z hlediska normalizovaného Youngova modulu pružnosti v rovině (100) pro BCC strukturu (vlevo); porovnání experimentu jednoosého tlakového testu v hlavním směru a simulací (vpravo) - struktury s relativní hustotou 10 % [30]

[12] LABEAS, G a E PTOCHOS. Investigation of sandwich structures with innovative cellular metallic cores under low velocity impact loading. *Plastics, Rubber and Composites*. 2013. ISSN 1465-8011.

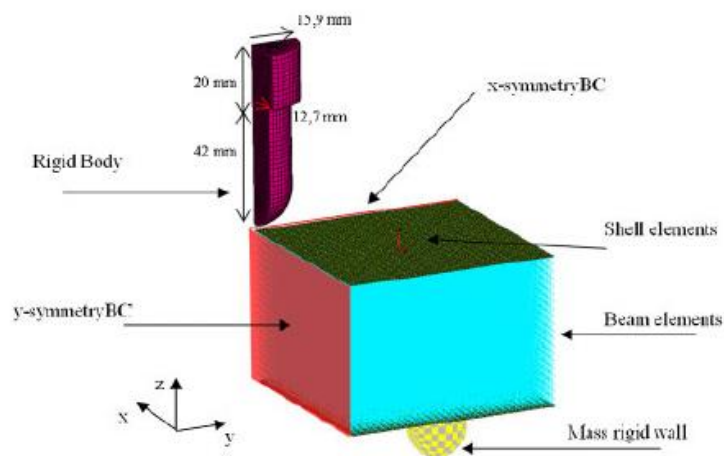
[13] LABEAS, G. a Evangelos PTOCHOS. Homogenization of selective laser melting cellular material for impact performance simulation. *International Journal of Structural Integrity*. 2015, 6(4), 439–450. ISSN 17579872.

Autor se zabýval zmapováním procesu deformačního chování mikro-prutových struktur vyrobených z nerezové oceli 316L technologií SLM při dynamickém zatěžování. V průběhu studie byly vyvinuty dva numerické modely predikující průběh deformace mikro-prutové struktury typu BCC při nízko-rychlostním zatěžování odpovídající pádovému testu (rychlost do $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). První typ uvažoval vytvoření geometrie modelu mikro-prutové struktury pomocí *beam* elementů, které reprezentovaly jednotlivé pruty struktury. Druhý typ modelu používal nahrazení mikro-prutové struktury blokem *solid* elementů s vlastnostmi ekvivalentními strukturovanému materiálu (homogenizovaná struktura). Takový model měl umožňovat řešení interakcí poměrně komplexních soustav struktur s cizími tělesy při dynamickém zatěžování bez poklesu přesnosti výsledku v porovnání s experimentem. Oba přístupy vyžadovaly samostatné definování modelů materiálu a okrajových podmínek.

Při vytváření modelu materiálu struktur z nerezové oceli 316L byly vstupní hodnoty získány na základě kvazistatické tahové zkoušky prutů a tlakové zkoušky strukturovaných vzorků. Numerická simulace pádového testu byla provedena v explicitním MKP řešiči PAM-Crash. Při tvorbě modelu s *beam* elementy byly využity následující podmínky (viz Obr. 3-2):

- U silně zatížených oblastí byly použity 4 prvky typu *beam* na prut.
- U méně zatížených oblastí byly použity 2 prvky typu *beam* na prut.
- Do simulace byl pro strukturu zaveden model materiálu *bilinear plasticity*.

- Okrajové pláty struktury byly definovány polygonální sítí *layered shell* 163 prvků.
- Struktura byla definována sebe-protínající kontakt *type 46*.
- Mezi indentorem a horním plátem bloku byl definován kontakt *type 33*.

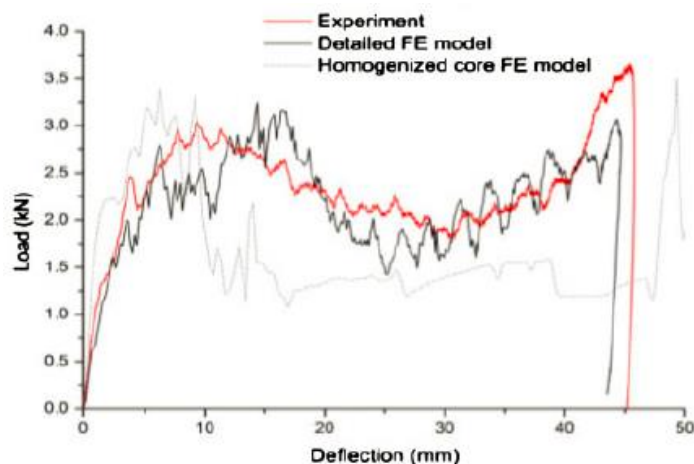


Obr. 3-2 Model nárazového testu při použití čtvrtinové symetrie (PAM-Crash) [12]

Výsledky

Při porovnání simulací s experimentem (viz Obr. 3-3) pro různé hladiny zatěžující energie bylo zjištěno, že MKP simulace provedená s nosníkovým modelem geometrie dokáže lépe reflektovat skutečný průběh experimentu (pro oblast progresivních deformací – mezi dvěma silovými píky). Tento model geometrie se ukázal jako vhodný pro studium mechanismů poškození struktury, její tuhosti a pevnosti prutů.

Na druhou stranu model geometrie uvažující zjednodušenou reprezentaci struktury poskytoval značnou úsporu výpočetních časů a nebyl zatížen kontakty mezi deformovanými pruty. Tento přístup nicméně vyžadoval dodatečné výpočty pro stanovení vstupních hodnot modelu materiálu z hlediska napětí v závislosti na přetvoření.



Obr. 3-3 Porovnání experimentálních a vypočítaných deformací bloku s BCC strukturou [12]

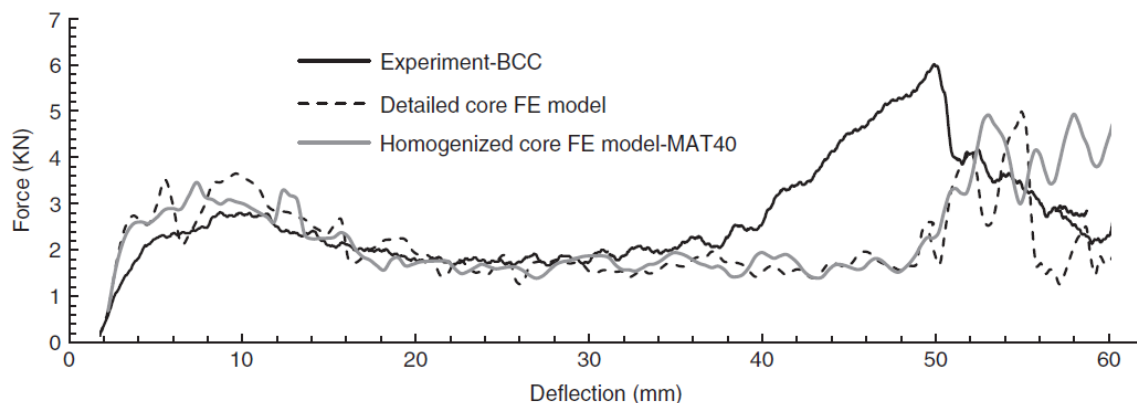
Závěr

Použití modelu materiálu se neobešlo bez kalibrace vstupních parametrů. Po vytvoření první studie byl model využívající objemové elementy predefinován za účelem zvýšení přesnosti. K vytvoření nového modelu bylo využito softwaru LS-DYNA. Okrajové podmínky i modelované okrajové pláty zůstaly zachovány. Došlo k obměně modelů materiálu:

- Pro model materiálu plátů sloužil model *Mat-40* s příslušným kritériem poškození.
- Struktura byla modelována pomocí objemových elementů typu *solid 164*.
- Pro model materiálu struktury byl zvolen typ *Mat-26 (Honeycomb)*.

Pro validaci MKP simulací bylo opět použito experimentálně provedeného pádového testu. Výsledky obou simulací tentokrát v porovnání s experimentem vykazovaly podobný průběh v elastické oblasti i oblasti progresivních deformací struktury (viz Obr. 3-4). Při nastupujícím zhutňování materiálu přestaly simulace reflektovat vývoj sledovaných veličin experimentu.

Autoři zmínili budoucí potřebu využívání validovaných výpočtových modelů pro účely virtuálního testování různých typů materiálu, průměru prutů a geometrických konfigurací.



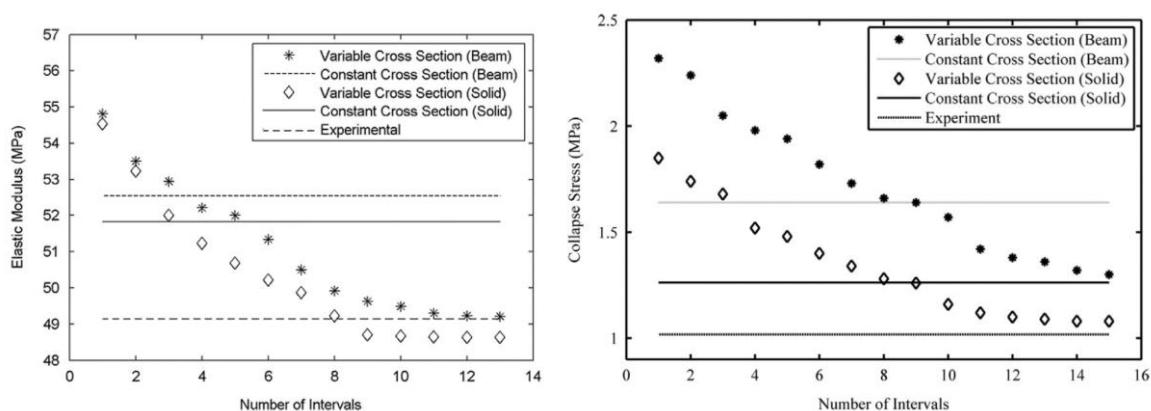
Obr. 3-4 Porovnání síly v závislosti na deformaci pro pádový test (206 J) [13]

- [33] KARAMOOZ RAVARI, M. R., M. KADKHODAEI, M. BADROSSAMAY a R. REZAEI. Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014. ISSN 00207403.

Autor této studie použil skriptu Pythonu 6.6.6. k vytvoření modelu geometrie mikro-prutové struktury využívající *beam* a *solid* elementy. Skript rozdělval pruty struktury na požadovaný počet ekvivalentně velkých intervalů, které umožňovaly modelu změnu průměru prutů. Struktura byla importována do prostředí ABAQUS 6.11-1, kde byl průměr sekcí jednotlivých prutů měněn podle indexu pravděpodobnosti přiřazenému pro každý interval. Rozsah byl určen na základě nominální hodnoty (CAD model) a předcházejících experimentálních měření. V prvním výpočtovém přístupu byl každému intervalu přidělen *beam* element (B32) s kvadratickou interpolační funkcí. V druhém výpočtovém přístupu využíval model čtyřstěnné *solid* elementy druhého řádu (C3D10M) za účelem zachycení komplexní geometrie prutů obzvláště zvláště v oblasti uzlových bodů. Simulace uvažovaly pouze kruhový průřez prutu.

Výsledky

Porovnání numerických simulací ukázalo, že získané hodnoty modulu pružnosti pro modely geometrie tvořené *beam* a *solid* elementy se výrazně neodlišovaly (viz Obr. 3-5 (vlevo)). Oproti tomu, hodnoty deformačního napětí, při kterém docházelo ke kolapsu struktury, se odlišovaly výrazněji (viz Obr. 3-5 (vpravo)). Při použití konstantního průřezu prutu se model pracující s objemovými elementy více blížil experimentálním výsledkům ve srovnání s modelem pracujícím s nosníkovými elementy. V případě členění prutů na intervaly s proměnným průměrem, bylo zapotřebí nejméně 10 intervalů pro získání validní hodnoty modulu pružnosti nebo deformačního napětí.



Obr. 3-5 Změna modulu pružnosti mikro-prutové struktury s počtem intervalů (vlevo); změna deformačního napětí mikro-prutové struktury s počtem intervalů (vpravo) [33]

Závěr

Podle autora bylo pro dosažení dobré přesnosti numerické simulace zapotřebí vytvořit model geometrie, který uvažoval změnu průřezu prutu po jeho délce. Při porovnání se ukázalo, že přístup využívající objemové elementy predikoval nižší hladiny napětí v závislosti na přetvoření v porovnání přístupem využívajícím nosníkové elementy. To mohlo být výsledkem koncentrace napětí v oblastech změny průměru prutu, které model využívající nosníkové elementy nebyl schopen zachytit.

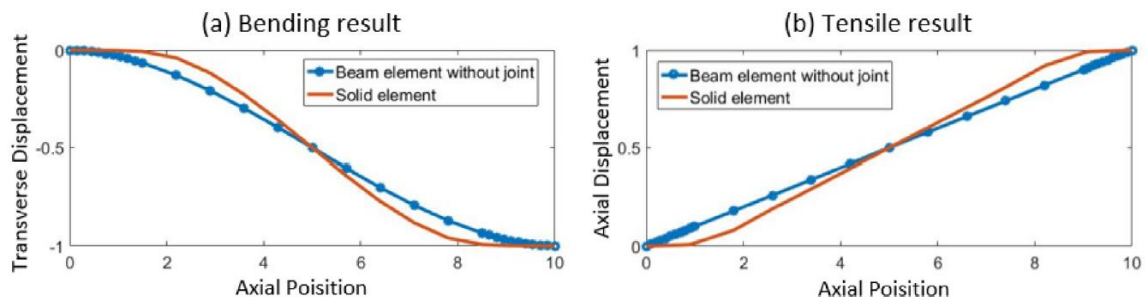
[45] DONG, Guoying a Yaoyao Fiona ZHAO. Numerical and experimental investigation of the joint stiffness in lattice structures fabricated by additive manufacturing. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018. ISSN 00207403.

Studie se zabývala konceptem označovaným jako *joint stiffening*, který byl navrhnutý za účelem stanovení vlivu kloubového spojení na tuhost mikro-prutové struktury vyrobené aditivní technologií z polymerních materiálů. Přístup rozdělval pruty struktury do třech segmentů. Segmenty na koncích prutu reprezentovala kloubová spojení. Prostřední segment reprezentoval prut o skutečné délce (zmenšený o poloměry uzlů). Při vytváření simulací byly parametricky měněny některé prvky geometrie (např. průměr prutu) pro dosažení požadované tuhosti kloubového spojení. Celá parametrická úloha byla provedena na geometrii jediného prutu struktury.

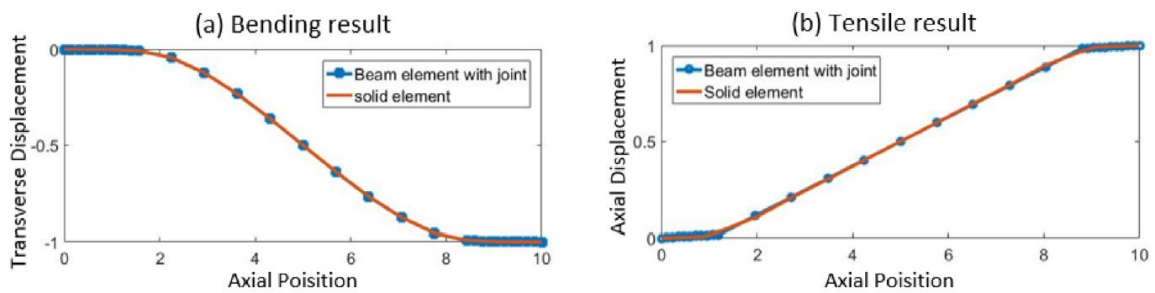
Youngův modul pružnosti základového materiálu byl za účelem korektní reprezentace stanoven na základě tahové zkoušky vzorků multi-prutových (tenkých proutků) těles stejného materiálu. Navrhnutý model byl v podobě dvou struktur podroben jednoosému tahovému a ohybovému testu pro ověření vlastností kloubového spoje.

Výsledky

Výsledky ukázaly, že vliv kloubového spojení byl více zřetelný u struktury s topologickým uspořádáním označovaným jako *bending dominated* v porovnání se strukturou se *stretching dominated* uspořádáním [46]. Pro strukturu *vintiles (bending dominated)* dosahovala tuhost predikovaná nosníkovým modelem pouze 52,7 % experimentálního výsledku. Pro *cubic-center (stretching dominated)* strukturu byl rozdíl mezi modelem na bázi nosníkových elementů a experimentem pouhých 12,5 %. Ke zpřesnění došlo z důvodu působícího zatížení, které bylo v případě struktury *cubic-center* osové namísto ohybového a tuhost kloubových spojů nebyla natolik významná. Další porovnání model na bázi nosníkových elementů s modifikovanou tuhostí v blízkosti uzlů ukázalo (*Beam element with joint*), že změna tuhosti může vést k predikci deformace struktury porovnatelné s modelem na bázi objemových elementů pro oba typy zatížení (viz Obr. 3-6 a Obr. 3-7).



Obr. 3-6 Porovnání simulace uvažující objemové prvky se simulací uvažující nosníkové prvky bez modifikace tuhosti v blízkosti uzlů; a) namáhání ohybem; b) namáhání tahem [45]



Obr. 3-7 Porovnání simulace uvažující objemové prvky se simulací uvažující nosníkové prvky s modifikací tuhosti v blízkosti uzlů; a) namáhání ohybem; b) namáhání tahem [45]

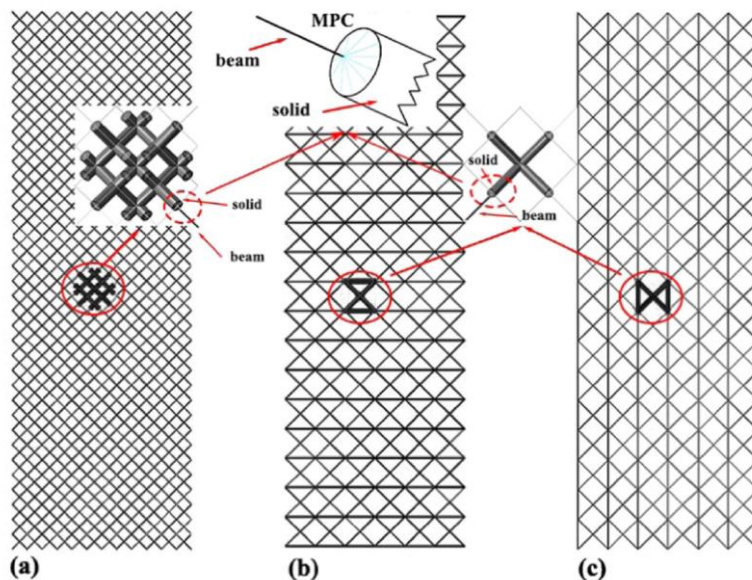
Závěr

Model využívající objemové prvky a model uvažující nosníkové elementy se změnou tuhosti v oblasti uzlových bodů vykazovaly podobnou tuhost. Modifikovaný model s nosníky navíc vyžadoval mnohem kratší výpočetní časy. Bylo také zjištěno, že efekt změny tuhosti byl výraznější u struktur s topologií označovanou jako *bending dominated* v porovnání se strukturou se *stretching dominated* topologií [46].

[47] GENG, Xiaoliang, Liyang MA, Chao LIU, Chen ZHAO a Zhu Feng YUE. A FEM study on mechanical behavior of cellular lattice materials based on combined elements. *Materials Science and Engineering A*. 2018. ISSN 09215093.

Autoři studovali deformační chování mikro-prutových struktur typu *rhombic dodecahedron* a BCCz (BCC s vertikálními pruty) vyrobených z hliníkové slitiny AlSi₁₀Mg technologií SLM. Využili k tomu výpočtový model, který byl vytvořen kombinací nosníkových a objemových elementů v prostředí ABAQUS/STANDARD. Pro získání materiálových vlastností včetně charakteristik jeho poškození byly vyrobeny a testovány konvenční tahové vzorky. Úloha byla primárně založená na použití nosníkových elementů (*Timoshenko*), které utvářely strukturu zatěžovanou v tahu. V závislosti na struktury byl každý prut rozdělen 3,4 nebo 6 elementy.

Nahrazením nosníkových elementů jedné základní buňky (ve středu struktury) elementy objemovými (čtyřstěny druhého řádu C3D10M) byl vytvořen hybridní model umožňující provádět lokální změny geometrie a detailně sledovat jejich vliv na odezvu v podobě napětí. K propojení nosníkových elementů s elementy objemovými bylo použito vazby označované jako *multipoint constraint* (MPC), která reflektovala skutečné podmínky připojení prutů (viz Obr. 3-8)



Obr. 3-8 Kombinované MKP modely geometrie a) rhombic dodecahedron; b) BCCz1; c) BCCz2 [47]

Výsledky

Porovnání výsledných hodnot experimentu a simulace uvažující nosníkové elementy i hybridní variantu kombinující nosníkové a objemové elementy ukázalo dobrou shodu nejen v oblasti modulu pružnosti, ale i v oblasti plastické deformace. Malé rozdíly mezi experimentem a výpočty byly přisouzeny geometrickým imperfekcím, které doprovázely produkci mikro-prutových struktur a nebyly v analýzách zahrnuty.

Závěr

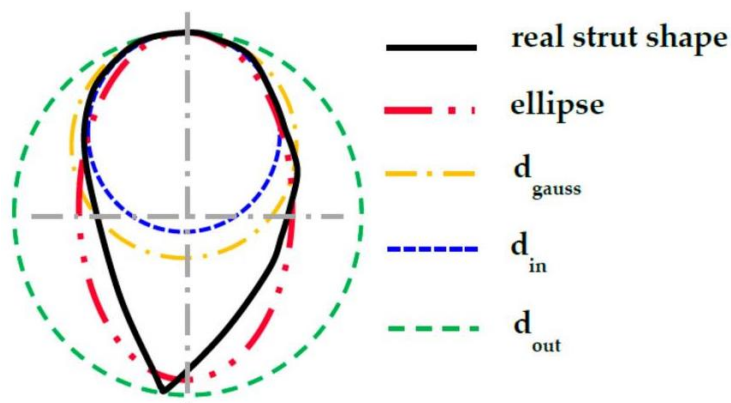
Autorům se podařilo vytvořit hybridní výpočtový model geometrie, který umožňoval získat detailní náhled vývoje napětí na jednotlivých prutech mikro-prutové struktury při jejím zatěžování se zachováním nízkých výpočetních nároků. Tento přístup dosahoval dobré přesnosti v porovnání s experimentem, avšak autoři zmínili potřebu jeho testování pro širší škálu konfigurací struktur.

[22] VRÁNA, R., O. CERVINEK, P. MANAS, D. KOUTNÝ a D. PALOUŠEK. Dynamic loading of lattice structure made by selective laser melting-numerical model with substitution of geometrical imperfections. *Materials*. 2018, **11**(11). ISSN 19961944.

Cílem studie bylo vytvořit výpočtový model dynamicky zatěžované mikro-prutové struktury vyrobené technologií SLM z hliníkové slitiny AlSi₁₀Mg a validovat jej experimentem. Simulace byla vytvářena v modulu Explicit dynamics (software ANSYS) jako nízkorychlostní výpočtová úloha, která měla reflektovat podmínky pádového testu (rychlost do 4 m·s⁻¹).

Pro sestavení modelu materiálu bylo využito kvazistatických mechanických zkoušek (tahová zkouška multi-prutových těles a tlaková zkouška struktur). Na základě těchto testů byla vyhodnocena mez kluzu, modul pružnosti, tečný modul a mez kritického přetvoření do poškození prutů struktur. Získané hodnoty byly použity při sestavování elasticko-plastického modelu materiálu s doplňujícím kritériem poškození. Toto kritérium spočívalo v přerušení vazeb mezi elementy s jejich následným vymazáním při dosažení kritické hodnoty přetvoření.

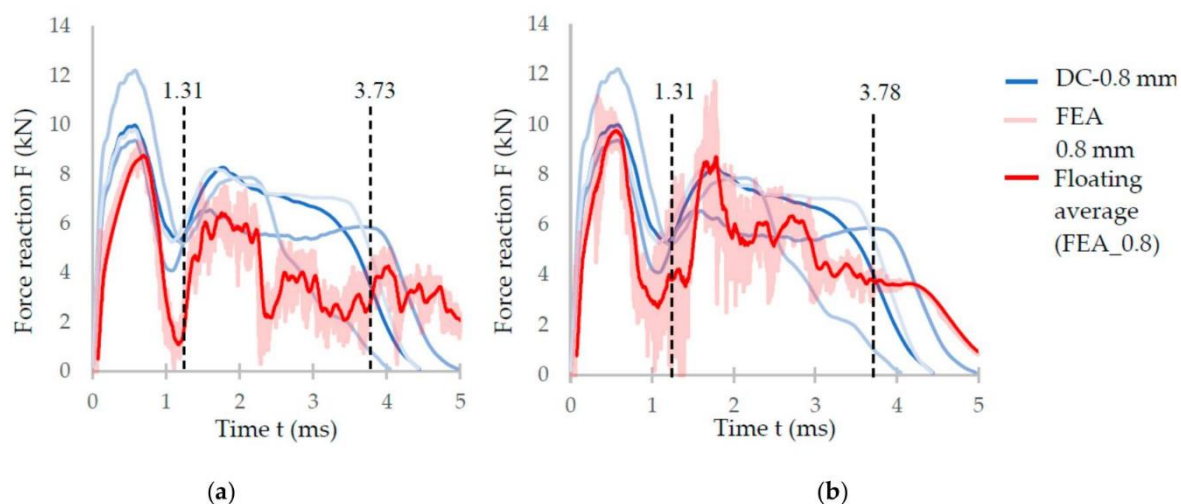
Za účelem vytvoření modelu geometrie mikro-prutové struktury byly vzorky podrobeny optické digitalizaci 3D skenerem ATOS Triple Scan. Na základě vzniklých skenů byly v softwaru GOM Inspect změřeny skutečné rozměry i průřezy prutů. (viz Obr. 3-9). Z těchto dat byly vyhodnoceny hodnoty průměrné velikosti průřezu a jeho zjednodušeného tvaru. Ty byly následně použity při vytváření modelu modifikované geometrie, čímž došlo k zahrnutí výrobních imperfekcí spojených s rozměry prutů do výpočtové simulace. Model geometrie byl vytvořen pomocí čtyřstěnných *solid* elementů (v softwaru ANSYS Workbench).



Obr. 3-9 Tvary použité pro popis skutečného průřezu prutu po optické digitalizaci (elipsa, kružnice z měření Gaussovským válcem, minimálním opsaným a maximálním vepsaným) [24]

Výsledky

Výsledky ukázaly (viz Obr. 3-10), že zahrnutím výrobních imperfekcí do modelu geometrie úlohy došlo k jejich přiblížení k experimentálním hodnotám. Zvýšení přesnosti bylo pozorováno pro průběh, maximální velikost i dobu deformace a síly reakce. Z důvodu nízké zatěžující rychlosti autoři neuvažovali vliv rychlosti poměrné deformace na chování materiálu, což mohlo způsobit zvětšení odchylky od experimentu.



Obr. 3-10 a) Porovnání výsledků experimentu a simulace bez zahrnutí imperfekcí, b) porovnání se zahrnutím imperfekcí [24]

Závěr

Zahrnutí výrobních imperfekcí struktur v podobě eliptických průřezů prutů do modelu geometrie v simulaci hliníkových struktur vedlo k přiblížení výsledků experimentálně získaným hodnotám.

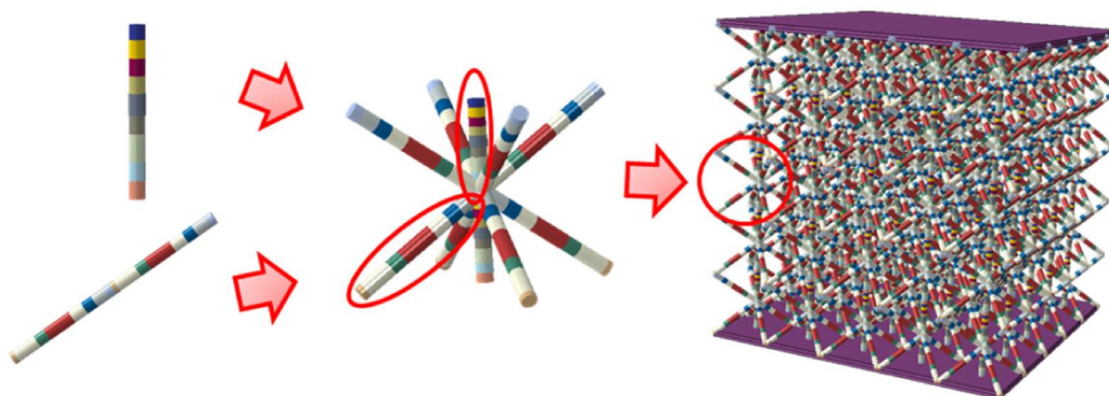
Testovány byly konfigurace mikro-prutové struktury typu BCC s různými průměry prutu (0,6-1,2 mm) ve dvou módech zatěžování (plošné a průrazem). V případě plošného zatížení došlo ke zpřesnění odhadu průběhu síly reakce a deformace pomocí MKP výpočtu i pro struktury s odlišným průměrem prutu. V případě zatěžování průrazem nebyl tento benefit natolik patrný, přičemž odchylky simulace a experimentu byly větší. Pro zvýšení efektivity tohoto postupu by měly být provedeny kalibrační mechanické zkoušky pro modely materiálu všech uvažovaných průměrů prutů.

[34] LEI, Hongshuai, Chuanlei LI, Jinxin MENG, Hao ZHOU, Yabo LIU, Xiaoyu ZHANG, Panding WANG a Daining FANG. Evaluation of compressive properties of SLM-fabricated multi-layer lattice structures by experimental test and μ -CT-based finite element analysis. *Materials and Design*. 2019. ISSN 18734197.

Tým studoval vliv různých přístupů zahrnutí geometrických imperfekcí do numerického výpočtového modelu kvazistatického tlakového zatěžování mikro-prutových struktur vyrobených aditivními technologiemi. Předmětem zájmu se staly dvě struktury typu BCC a BCCz vyrobené technologií SLM z hliníkové slitiny AlSi₁₀Mg.

Struktury byly podrobeny počítačové tomografii (μ -CT) za účelem zachycení skutečné informace o geometrii prutů struktury. První z výpočtových přístupů byl idealizovaný model průměrů prutů podle původního CAD návrhu struktury (*FEA-designed*). Druhý přístup využíval průměrnou hodnotu průměru prutů vycházející ze statistického zpracování dat z μ -CT skenování (*FEA-average*). Další metoda uvažovala pseudonáhodné přiřazení průměrů prutů jednotlivým segmentům (*FEA-random*). Podobné rozdělení průměrů použil ve své studii i Ravari [33]. Mimo toto rozdělení byl vytvořen i model uvažující Gaussovskou distribuci pro rozdělení jednotlivých průměrů (*FEA-reconstructed*, viz Obr. 3-11).

Modely byly testovány na úlohách tlakového zatěžování struktur s odlišným počtem vrstev základních buněk, přičemž byly sledovány výsledné mechanické vlastnosti (např. schopnost absorbovat energii). Numerické simulace byly vytvořeny v prostředí softwaru ABAQUS6.14 v modulu pracujícím s explicitním řešičem. Za účelem zahrnutí imperfekcí byl vytvořen Python skript, který umožnil automatické generování modelu z nosíkových elementů. Nelineární mechanické vlastnosti materiálu včetně izotropního zpevnění byly stanoveny na základě tahových testů objemového materiálu.



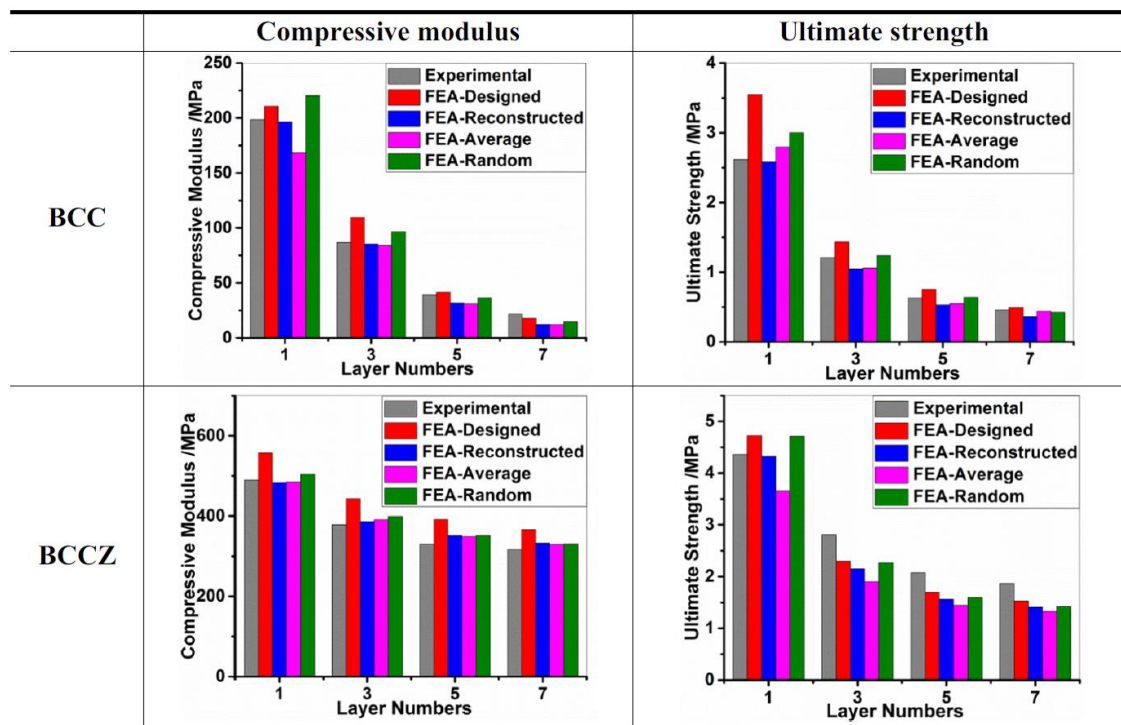
Obr. 3-11 Model geometrie panelu mikro-prutové struktury BCCz se zahrnutím geometrických imperfekcí [48]

Výsledky

Výsledky μ CT analýzy ukázaly, že průměr prutu se mění s jeho umístěním ve struktuře a úhlem, který svírá se směrem stavby. K podobnému závěru došli pro stejnou výrobní technologii a materiál další autoři [49]. Měřené průměry prutů vykazovaly v porovnání s navrhnutými CAD daty nezanedbatelné odchylky, které se měnily podél jejich délky. Pro pruty vyráběné ve vertikálním směru vykazovaly mnohem větší rozsah odchylek ve srovnání s pruty vedoucími na diagonále základní buňky. Porovnání křivek nominálního napětí v závislosti na přetvoření (*engineering stress-strain*) výpočtových modelů a experimentu ukázalo podobnost trendů u všech uvažovaných přístupů, a to i v nelineární oblasti zatěžování a fázi zhutnění strukturovaného materiálu.

Závěr

Porovnáním všech výše zmíněných modelů geometrie vyplývá, že zahrnutí geometrických imperfekcí metodou využívající rekonstruovaná data z μ -CT s Gaussovským rozložením průměrů (*FEA-reconstructed*) může dojít ke zvýšení přesnosti predikce numerické úlohy. Z hlediska porovnávaných modulů pružnosti struktur a napětí počáteční deformace (viz Obr. 3-12) jsou výsledky predikce konzistentní s experimentálními výsledky.



Obr. 3-12 Porovnání výsledků mechanických vlastností experimentu a numerických simulací [48]

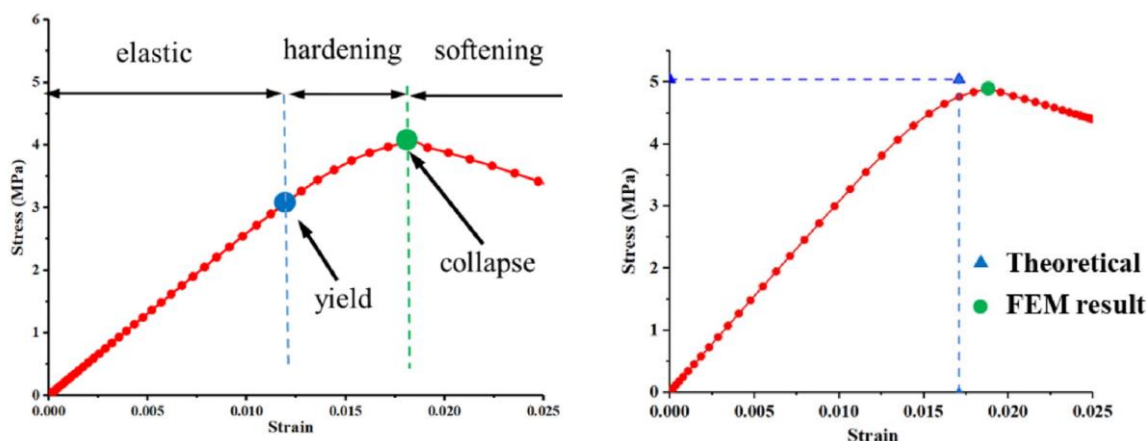
[50] LIU, Yabo, Zhichao DONG, Jun LIANG a Jingran GE. Determination of the strength of a multilayer BCC lattice structure with face sheets. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. ISSN 00207403.

Autor se zabýval sestavením teoretického modelu pro predikci pevnosti mikro-prutové struktury typu BCC. Z důvodu komplexních deformačních mechanismů uvnitř struktury doprovázejících její zatěžování byl využit numerický model, který demonstroval vývoj napětí v závislosti na deformaci pouze do prvního napěťového píku (pevnost struktury). Pro vytvoření numerické simulace bylo využito explicitního modulu v prostředí softwaru Abaqus standardně využívaného pro simulace dynamických dějů. Modul se v předcházejících studiích osvědčil v případě řešení kvazistatických úloh zahrnujících velké deformace.

Pro zaručení kvazistatického chování struktury byla 10násobně zvýšena doba zatěžování. V průběhu výpočtu byly sledovány dva energetické principy podle doporučení vývojářů Abaqusu [51]. Poměr umělého navýšení energie k vnitřní energii nesměl přesáhnout hranici 5 % aby byla zaručena minimalizace vlivu efektu *hourglassing* na výsledky simulace. Dále byl sledován poměr kinetické energie k vnitřní se stejným hraničním kritériem v průběhu stlačování struktury pro udržení dynamických efektů na zanedbatelné úrovni.

Výsledky

Výsledky simulace ukázaly deformační chování struktury odpovídající kvazistatickému zatěžování. Analytická predikce pevnosti v tlaku struktury byla porovnána s výsledky MKP v několika geometrických variantách za účelem ověření aplikovatelnosti modelu. Obr. 3-13 (vpravo) ukazuje obecný trend získaného průběhu nominálního napětí v závislosti na přetvoření (*engineering stress-strain*). Hodnota maximálního napětí simulace a teoretického výpočtu ukázaly velmi dobrou shodu pro analytické i numerické výpočty. V grafu (viz Obr. 3-13 (vlevo)) jsou znázorněny klíčové tři oblasti: oblast elastických deformací, oblast plastického zpevnění a počátek oblasti měknutí struktury.



Obr. 3-13 Křivka průběhu nominálního napětí v závislosti na přetvoření pro BCC strukturu s 8 x 8 x 3 buněk (vlevo); porovnání teoretického výpočtu a MKP pro strukturu 6 x 6 x 2 buňky (vpravo) [50]

Závěr

Vytvořený analytický model založený na výpočtu zatěžování velkých buněk byl shledán jako vhodný k využití pro predikci deformační pevnosti a deformačního přetvoření vícevrstvé BCC struktury. Výborná shoda mezi teoretickým a MKP modelem založeným na explicitně definované úloze byla potvrzena. Do budoucna by mělo být provedeno experimentální ověření pro validování obou metod.

[23] GÜMRÜK, R. a R. A W MINES. Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013. ISSN 00207403.

Tým se zaměřoval na vyšetřování mechanických vlastností mikro-prutových struktur (BCC) vyrobených z nerezové oceli SS316L technologií SLM při kvazistatickém tlakovém zatěžování. V průběhu výzkumu byly vytvořeny teoretický (formulace založená na teorii Timoshenka) a numerický přístup uvažující kumulaci materiálu v blízkosti uzlových bodů struktury.

Numerický přístup zahrnoval dva různé modely: model využívající 1-D *beam* elementy (založené na teorii Hughes-Liu) a 3-D *solid* elementy (čtyřstěn). Všechny kvazistatické simulace byly provedeny v explicitním řešiči LS-DYNA. Kvazistatický proces byl v explicitním solveru vytvořen uměle navýšenou rychlostí zatěžování, při minimalizaci efektů setrvačnosti. V případě zatěžování struktury tvořené *beam* elementy bylo využito definování rychlosti deformačního členu pomocí rovnice:

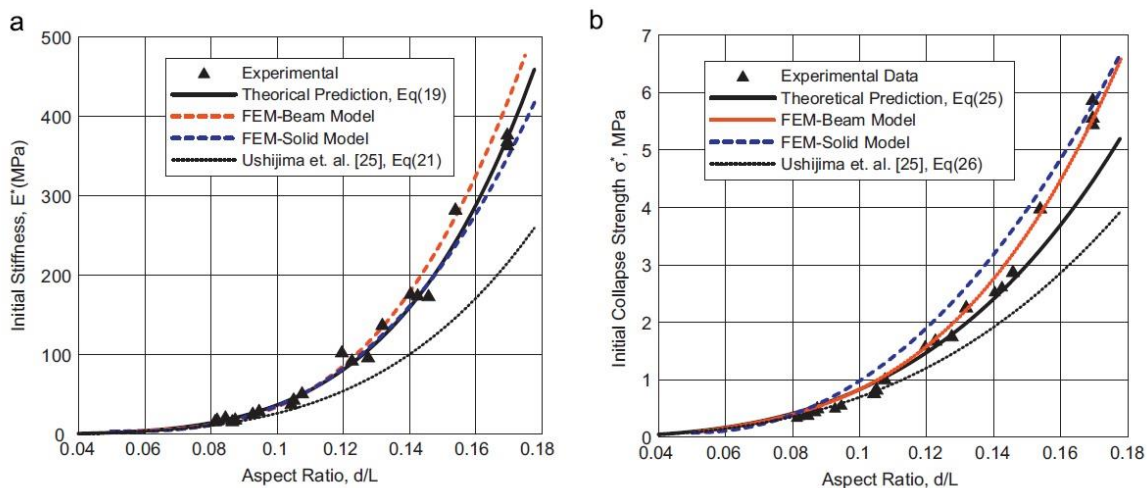
$$\text{Hollomon} \quad v(t) = \frac{U}{t^*} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{2t^*} t\right) \right] \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3-1)$$

kde t^* je celkový čas zatěžování a U je osový posuv. Rychlost tuhé stěny v případě *solid* element modelu byla dána počáteční rychlostí $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Celkový čas simulace byl stanoven na 10 ms. Po uplynutí 4 ms byla zatěžující rychlost zafixována podle vztahu určeného rovnicí (3-1). Za účelem zvýšení explicitního časového kroku, byla použita funkce označovaná jako *mass scaling* (100násobné navýšení). Kritérium zaručující podmínky kvazistatického děje bylo stanoveno jako rovnováha sil reakce pro plochy deformačního a statického (opěrného) tělesa. Současně bylo použito kritérium minimalizace kinetické energie v průběhu simulace. Pro definici chování materiálu byl vybrán po částech lineární elasticko-plastický model. Data modelu byla získána vyhodnocením křivky skutečného napětí v závislosti na přetvoření (*true stress-strain*) tahové zkoušky pro nerezovou ocel 316L.

Pruty odlišných konfigurací struktur byly rozděleny počtem elementů závislejícím na velikosti buňky a průměru prutu (např. délka strany buňky 2,5 mm – 10 el.; 1,25 mm – 6 el.). Na průměr prutu bylo použito 16 integračních bodů. Délky elementů na koncích prutů byly definovány délkou nominálního poloměru prutu. U těchto elementů byl zvýšen modul pružnosti o 50 %, za účelem zvýšení celkové tuhosti struktury na úroveň experimentální tuhosti. Podobný přístup umělého navýšení tuhosti v blízkosti uzlových bodů použil Luxner [30]. Zde navíc došlo k zamezení rotací konců elementů v uzlových prutech. Simulace založená na bázi objemových elementů byla za účelem úspory výpočetního výkonu modelována jako jediný prut. Navíc byl uvažován i efekt deformačního zpevnění základového materiálu při analýzách plastického kolapsu struktury.

Výsledky

Hodnoty počáteční tuhosti teoretického a numerického výpočtového modelu byly v dobré shodě ve všech sledovaných konfiguracích (viz Obr. 3-14). Zvláště v případě počáteční pevnosti modely tvořené nosníkovými a objemovými elementy poskytovaly predikci blízkou experimentálním hodnotám. Odchylka predikce od experimentu byla s nárůstem poměru nominálního průměru k délce prutu do 10 %. Oproti tomu s nárůstem tohoto poměru ukazovala rovnice daná Ushijimou [52] odchylku až 70 % v porovnání s experimentem.



Obr. 3-14 Rozsah počátečních tuhostí (a) a počátečních pevností (b) vztažených k podílům průměru a délky prutu [23]

Závěr

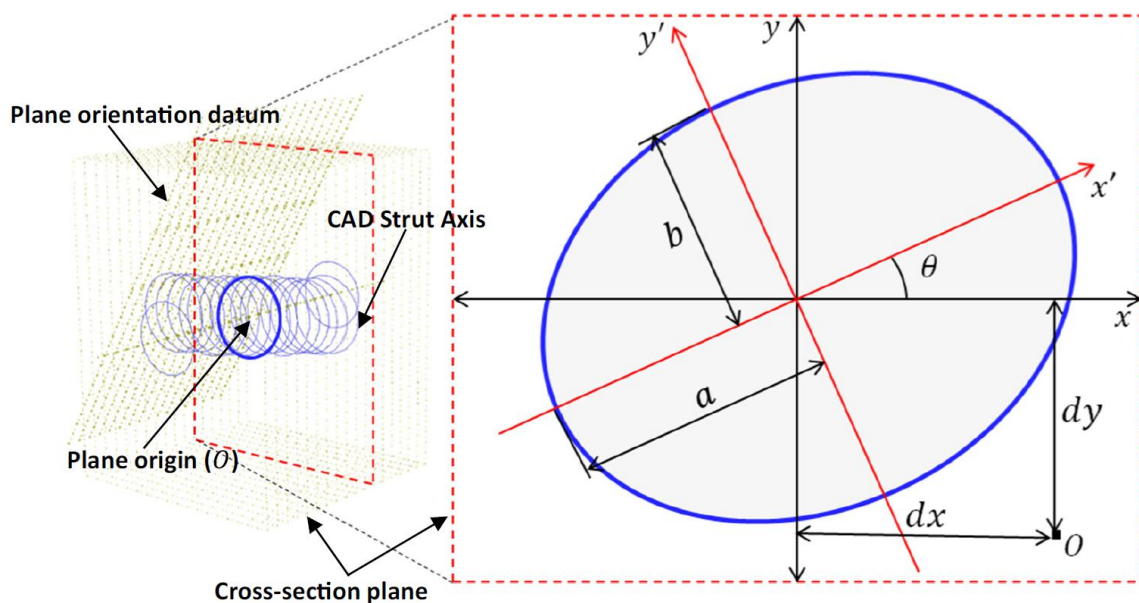
Teoretický i numerický přístup se ukázal jako vhodné pro predikci počáteční tuhosti struktur a jejich pevnosti. Zvýšená tuhost uzlových elementů měla za následek zvýšení tuhosti struktury a její deformační pevnosti v analýze. Bylo zjištěno, že zvýšená tuhost uzlů se zahrnutím smykového napětí se stala významnou pro velký podíl poměru nominálního průměru k délce prutu (pro malé buňky).

Pokročilé testovací techniky mikro-prutových struktur byly porovnány s korekční technikou prezentovanou v práci Tsopanose [37]. Při porovnání byla odhalena dobrá kvalita a opakovatelnost tahového testu.

[35] LOZANOVSKI, Bill, Martin LEARY, Phuong TRAN, Darpan SHIDID, Ma QIAN, Peter CHOONG a Milan BRANDT. Computational modelling of strut defects in SLM manufactured lattice structures. *Materials and Design*. 2019. ISSN 18734197.

Studie se zaměřovala na zahrnutí výrobních odchylek a defektů do výpočtových modelů geometrie mikro-prutových struktur vyrobených ze slitiny Inconel 625 technologií SLM. Modely byly generovány na základě skenů μ -CT a porovnány se simulacemi uvažujícími nominální geometrii a experiment. Mimo porovnání deformačních vlastností modelů struktur byly porovnány také samostatné tenké pruty především z hlediska tuhosti při osovém zatěžování a únosnosti na vzpěr.

Samotná simulace byla koncipována jako kvazistatická nelineární úloha tlakového zatěžování strukturovaných kostek (typ *face cubic centred* (FCC) a FCZ). Při jejím vytváření byly využity modely pracující s nosníkovými (C3D4) i objemovými elementy (C3D8). Skenovaná data zahrnující detailní informace o geometrii jednotlivých prutů byla rozdělena pomocí řezů. Tyto řezy byly prokládány sérií elips aproximujících skutečný tvar prutů (viz Obr. 3-15). Elipsy se v každém řezu lišily svou velikostí, polohou a natočením os. Jednotlivé elipsy byly v následujícím kroku provázány a vznikla tak geometrie prutů reflektující geometrické imperfekce výroby i vlnitost prutů.

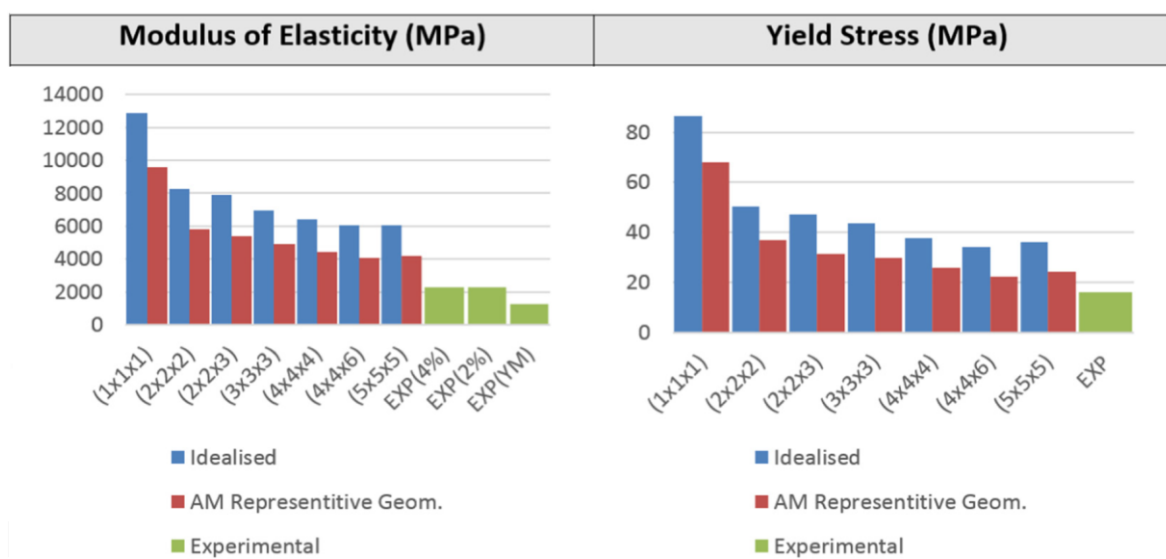


Obr. 3-15 Eliptický průřez prutu mikro-prutové struktury včetně proměnných parametrů definujících rozměry a tvar elipsy: a – průměr hlavní osy, b – průměr vedlejší osy, dx , dy – vertikální a horizontální posuv těžiště vzhledem k teoretické ose prutu, x' , y' – pootočené osy průřezu [35]

Model materiálu byl sestaven na základě mechanických testů konvenčních objemových těles vyráběných rovnoběžně s platformou ve studii Yadroitseva [53].

Výsledky

Výsledky simulací byly porovnávány s experimenty provedenými na strukturách s různým počtem základových buněk (velikost buňky 2 mm, nominální průměr prutu 0,3 mm). Z důvodu výpočtové náročnosti byly simulace limitovány na konfigurace 5 x 5 x 5 buněk, což odpovídalo malé části experimentálně testované struktury. Porovnání Youngova modulu pružnosti a meze kluzu (viz Obr. 3-16) ukázalo, že větší konfigurace struktur v numerických predikcích se přibližují experimentálním výsledkům. V rámci studie byly také porovnány simulace s idealizovanou geometrií a geometrií s imperfekcemi. Bližší shodu s experimentem ukázal druhý výpočtový přístup. Poměrně velká odchylka byla pravděpodobně způsobena modelem materiálu, který byl stanoven pro jiné procesní parametry a navíc u objemových těles.



Obr. 3-16 Porovnání modulu pružnosti a meze kluzu pro simulace s idealizovanou geometrií a simulace se zahrnutím imperfekcí pro strukturu FCZ [35]

Závěr

Byl vytvořen přístup umožňující modelování geometrie mikro-prutové struktury v MKP, který byl výpočetně méně náročný v porovnání s provedením rekonstrukce μ -CT dat [34]. Zjednodušenou reprezentací struktury i samostatných prutů bylo možné aplikovat na různé typy struktury s odlišnými průměry prutů a orientací. Podle autorů by do budoucna měla vzniknout databáze modelů materiálů používaných technologií SLM k analýze širšího spektra struktur a materiálů stejným způsobem. Navíc by měla být k simulaci deformačního chování struktury využita reprezentativně velká strukturovaná oblast.

3.2 Modely materiálu

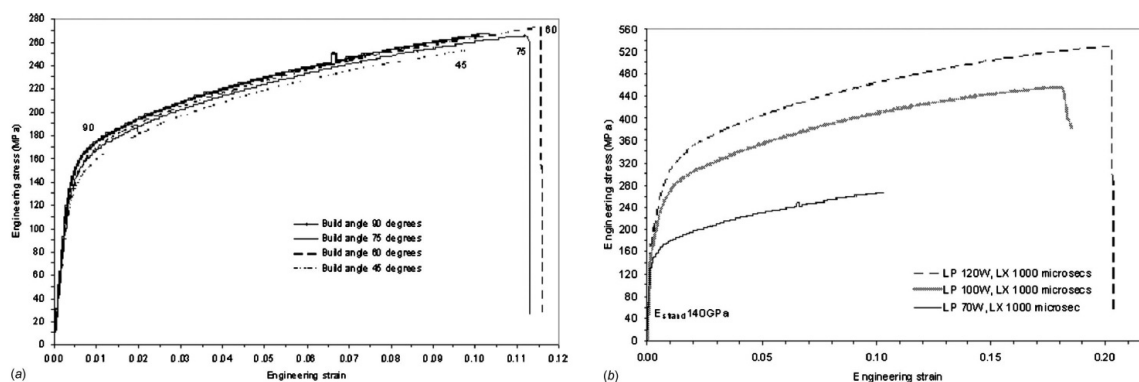
-
- [37] TSOPANOS, S., R. A.W. MINES, S. MCKOWN, Y. SHEN, W. J. CANTWELL, W. BROOKS a C. J. SUTCLIFFE. The influence of processing parameters on the mechanical properties of selectively laser melted stainless steel microlattice structures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. 2010, **132**(4), 0410111–0410112. ISSN 10871357.
-

Tým pracující na této studii se pokoušel stanovit mechanické vlastnosti mikro-prutových struktur vyrobených z nerezové oceli 316L technologií SLM při změně procesních parametrů (výkon laseru a skenovací rychlost). Vliv změn těchto parametrů byl posuzován porovnáním křivek napětí v závislosti na poměrné deformaci, modulu pružnosti a plastického přetvoření o velikosti 5 %. Tyto vlastnosti byly stanoveny tahovými testy prutových těles a tlakovými testy strukturovaných kostek (BCC). Při testování tahových těles došlo k odečítání výsledků prodloužení vzorku dvěma způsoby. První z nich využíval odečet prodloužení přímo z posuvu testovací hlavičky. Druhý z nich využíval měření posuvu pomocí čelistí dotykového extenzometru.

Výsledky

Porovnáním výsledků tahových zkoušek měřených podle prvního způsobu pro různé úhly stavby (45°, 60°, 75° a 90°) byl stanoven modul pružnosti přibližně na 5 GPa, což odpovídá asi 3 % modulu pružnosti objemového materiálu. Tato výrazná odchylka byla přičítána nepřesnému měření prodloužení tenkého prutu vlivem prokluzu tenkého vzorku kruhového průřezu v čelistech hlavičky testovacího zařízení. Bylo proto rozhodnuto o provedení korekce modulu pružnosti pomocí MKP softwaru LS-DYNA. Pomocí nosíkových elementů (Hughes Liu) zde byly vytvořeny modely samotných struktur (BCC), které byly podrobeny tlakové zkoušce. Modelu struktury nebyly v simulaci odebrány žádné stupně volnosti.

Modul pružnosti základového materiálu byl v simulaci parametricky měněn, dokud nebylo dosaženo dobré shody modulu pružnosti struktury v porovnání s experimentem. Hodnota modulu pružnosti základového materiálu, při které došlo ke shodě, odpovídala 140 GPa (74 % modulu pružnosti objemového materiálu). Experimentálně získané hodnoty elastického a plastického přetvoření stanovené na základě tahové zkoušky tenkého prutu byly potom korigovány k dosažení modulu pružnosti základového materiálu 140 GPa (viz Obr. 3-17).



Obr. 3-17 Výsledek jednoosé tahové zkoušky tenkého prutu z nerezové oceli 316L získaný na základě odečtu prodloužení z posuvu hlavice: a) porovnání korigovaných dat pro různé úhly stavby (výkon laseru = 140 W, čas skenování = 500 μ s), b) porovnání korigovaných dat pro odlišné procesní parametry (úhel stavby prutu 90°) [37]

Měření podle druhého způsobu zahrnujícího využití extenzometru ukázalo průměrnou hodnotu modulu pružnosti 40 GPa (prutu vyrobeného pod úhlem 90°), což značilo pouhých 21 % modulu pružnosti objemového materiálu. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k podobné korekci jako v předchozím případě.

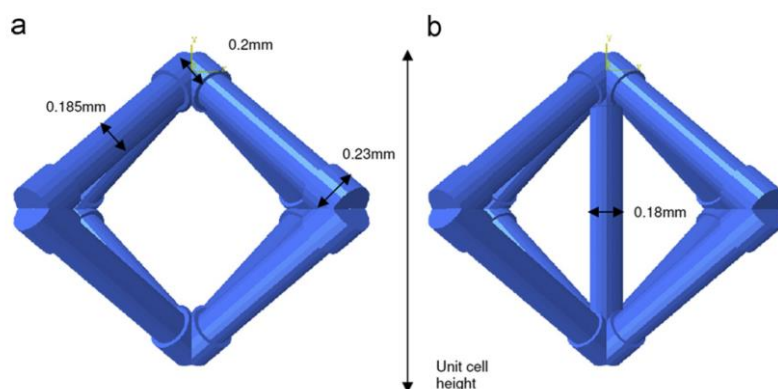
Závěr

Studie poukázala na problémy s přesností měření mechanických vlastností tenkých prutových těles. Jako jeden z hlavních problémů uvádí variabilitu geometrie prutu a jeho metalografické struktury. Zároveň byla ve studii zmíněna potřeba zdokonalení měření vlastností struktur při ohybových testech a dynamickém namáhání. Do budoucna by mohly být pro podobná měření využity metody optických měřicích technik, např.: interferometrie a *digital image correlation* (DIC).

Testováním byla zjištěna stabilní kvalita geometrie mikro-prutových struktur s přijatelnou variabilitou mechanických vlastností při použití stejných nominálních parametrů. Rozsahy tuhosti a pevnosti prutů zatěžovaných tahem byly menší než 20 % a struktur zatěžovaných tlakem menší než 15 %. To poukázalo na možné využití strukturovaných materiálů v aplikacích vyžadujících přenos přesně definovaného zatížení.

[54] SMITH, M., Z. GUAN a W. J. CANTWELL. Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013, **67**, 28–41. ISSN 00207403.

Autor se zabýval vytvořením dvou numerických modelů predikujících deformační chování dvou typů mikro-prutových struktur (BCC a BCCz) vyrobených technologií SLM. Simulace byly vytvořeny v prostředí ABAQUS/Standard a následně porovnány s experimenty. První přístup uvažovaný jako referenční, pracoval s modelem geometrie vytvořeným pomocí 8uzlých objemových elementů pro možnost zachycení idealizované CAD geometrie a detailního rozložení napětí. Druhá metoda využívala 2uzlých nosíkových elementů (kruhový průřez). Průměr prutů v blízkosti uzlů se měnil za účelem dosažení vyšší tuhosti modelu struktury (viz Obr. 3-18), podobně jako ve studii Luxnera [30].

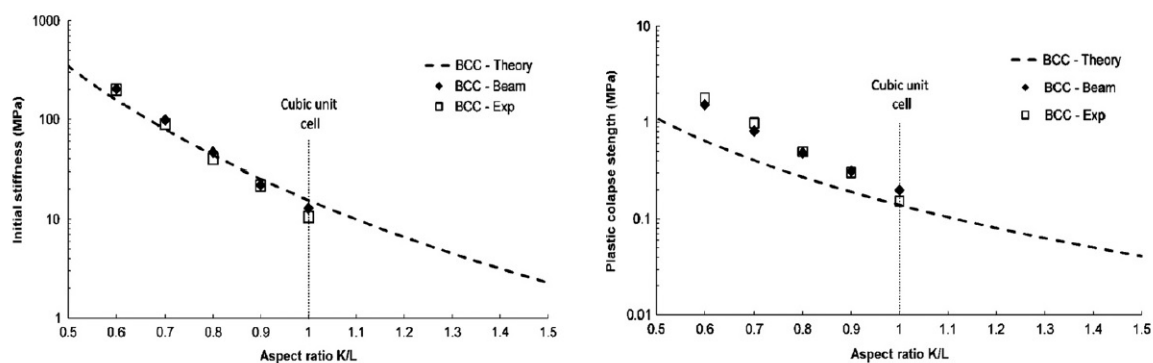


Obr. 3-18 Rozměry modelu geometrie základní buňky tvořené nosíkovými elementy a) BCC, b) BCCz [55]

Z důvodu malých průměrů prutů struktury bylo shledáno obtížným stanovit vlastnosti materiálu při kvazistatickém zatěžování na základě tahových zkoušek. Výrobní fenomény působící změny průměru prutu vedly k nejednoznačnému měření a stanovení mechanických vlastností. Proto bylo přistoupeno k převzetí materiálových vlastností ze studie Tsopanose [37]. Navíc bylo využito metod reverzního inženýrství k nalezení korektního průměru prutu v simulaci. Na počátku byl využit průměr prutu 0,2 mm jako vstupní průměr simulace, přičemž její výstup byl v podobě nominálního napětí porovnáván s experimentem. Průměr prutu se měnil, dokud nedošlo ke shodě experimentu a simulace pro oba modely a všechny velikosti základních buněk.

Výsledky

Výsledky ukázaly, že chování obou typů mikro-prutových struktur při kvazistatickém zatěžování může být přesně zachyceno využitím obou typů simulací (pro BCC viz Obr. 3-19). Predikce počáteční tuhosti, meze kluzu, napětí *plateau stress*, absorbované energie a přetvoření odpovídající zhutnění strukturovaného materiálu ukázaly podobné hodnoty v porovnání s experimentálními výsledky pro rozsah sledovaných velikostí buněk a geometrií.



Obr. 3-19 Porovnání výsledků v grafu počáteční tuhosti struktury (vlevo) a plastické deformace (vpravo) v závislosti na poměru průměru prutu k jeho délce pro strukturu typu BCC [55]

Závěr

Modelování rozměrných struktur se ukázalo jako obtížné s narůstajícím počtem elementů. Klíčové vlastnosti proto byly demonstrovány simulací zatěžování malé skupiny základových buněk. Rovněž náročné bylo i přesné měření materiálových vlastností nebo skutečného průměru prutu v rámci mikro-prutové struktury, proto bylo využito metod reverzního inženýrství ke stanovení výpočtových průměrů prutů struktur. Při použití nosníkových elementů docházelo k bodovému kontaktu v uzlech, který nereflekoval skutečnost a vedl k poklesu tuhosti uzlového spojení. Průměr prutu proto byl v těchto oblastech navýšen za účelem zvýšení tuhosti uzlů na experimentální hodnoty.

V průběhu parametrických úloh byla dále měněna geometrie základních buněk za účelem navýšení tuhosti struktur při tlakovém zatěžování. Přitom bylo zjištěno, že počáteční tuhost, mez kluzu a absorbovaná energie mohou být výrazně zvýšeny redukcí poměru průměru prutu k jeho délce.

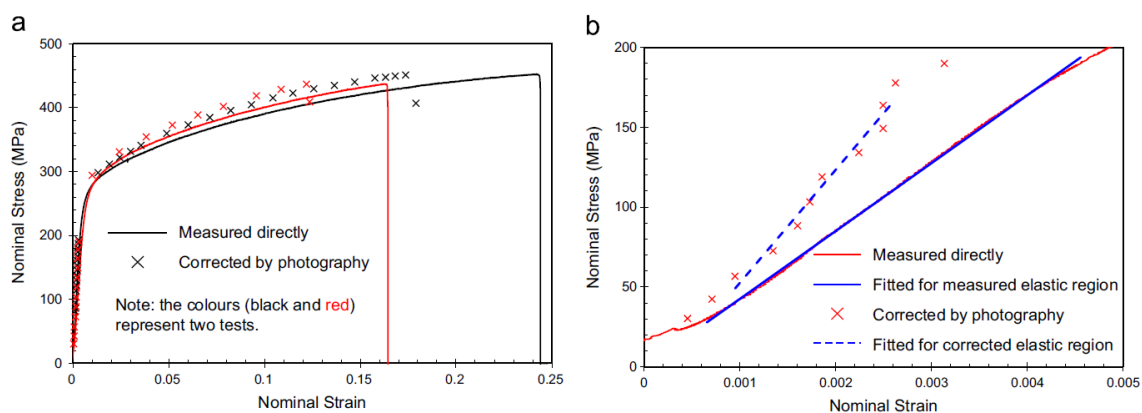
[24] LI, P., Z. WANG, N. PETRINIC a C. R. SIVIOUR. Deformation behaviour of stainless steel microlattice structures by selective laser melting. *Materials Science and Engineering A*. 2014. ISSN 09215093.

Hlavním předmětem studie se stal vývoj MKP simulace mapující makroskopické deformace mikro-prutové struktury a vývoj napětí (model geometrie tvořen objemovými čtyřstěnnými elementy). Model materiálu mikro-prutové struktury vyrobené z nerezové oceli 316L technologií SLM byl stanoven na základě křivek napětí v závislosti na přetvoření jediného prutu s nominálním průměrem přibližně odpovídajícím průměru prutu struktury. Prodloužení prutu při tahové zkoušce bylo odečteno z posuvu testovací hlavičky s čelistmi svírajícími tahový vzorek. Z důvodu obtížného měření těchto vlastností (popsaného ve studii Tsopanose [37]) byl navíc konec prutu snímán kamerou s vysokým rozlišením mapující deformaci vzorku.

Výpočetní úloha byla vytvořena s využitím explicitního solveru softwaru ABAQUS pro simulaci kvazistatického deformačního procesu mikro-prutové struktury typu BCC (4 x 4 x 4 buňky, délka strany 2,7 mm). Model zahrnoval tření v kontaktech všech ploch včetně tření mezi jednotlivými pruty struktury. Na základě výše zmíněných měření byl sestaven elasticko-plastický model materiálu.

Výsledky

Pomocí pořízených snímků byla provedena korekce přetvoření (viz Obr. 3-20). Ta představovala navýšení v plastické oblasti přibližně na 1,3násobek původních hodnot. Poměr korigované a měřené deformace byl v případě elastické deformace přibližně 1,9. I přes poměrně velkou drsnost prutových vzorků a ozubení čelistí testovací hlavice se prokluzování konců ukázalo poměrně významné. V porovnání s kontaktním měřením, přetvoření bezkontaktního snímání vzorků umožňovalo efekt prokluzu eliminovat.



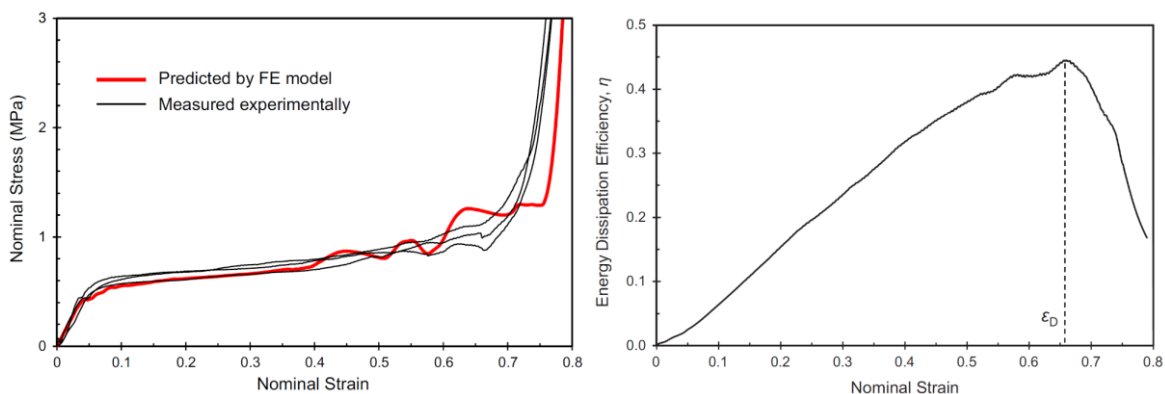
Obr. 3-20 a) Křivky napětí v závislosti na poměrném přetvoření prutu měřeného přímo při tahové zkoušce a nepřímo pomocí snímkových korekcí; b) křivky fitované v elastické oblasti na jednu z křivek [24]

Oblast elastické deformace byla podrobena lineární regresní analýze pro stanovení skutečné hodnoty Youngova modulu pružnosti nerezové oceli 316L. Výsledky ukázaly hodnotu $E = 71 \pm 7$ GPa, která se výrazně odlišovala od Youngova modulu pružnosti objemového materiálu ($E = 190-200$ GPa). Tento výsledek poukázal na značnou degradaci materiálu pravděpodobně způsobenou vlivem pórů v prutech [56]. Smluvní mez kluzu (přetvoření 0,002) byla stanovena na $\sigma_Y = 280 \pm 14$ MPa.

Závěr

U metody využívající bezkontaktní snímání s vysokým rozlišením k měření přetvoření tahového vzorku nebylo pozorováno ovlivnění výsledků prokluzem vzorku v čelistech. Mohla být, proto využita k přesnému stanovení konstitutivního chování strukturovaného materiálu. Výpočtová simulace využívající model materiálu stanovený tímto způsobem měření vykazovala dobrou shodu v porovnání s experimentem (viz Obr. 3-21 (vlevo)).

Na počátku tlakového testu struktur se jako první objevily plastické deformace v oblasti uzlových připojení. S dalším zatěžováním se plastické deformace v blízkosti uzlů zvětšovaly, zatímco středové části prutů zůstaly deformované pouze elasticky. Uspořádání plastických deformací vedlo k vytvoření oblasti rovnoměrné deformace struktury s minimálním deformačním zpevněním. Tato oblast byla kvantitativně popsána hodnotou *plateau stress*, kapacitou disipované energie (viz Obr. 3-21 (vpravo)) a přetvořením odpovídajícím zhuštění strukturovaného materiálu.



Obr. 3-21 Porovnání měřené a predikované křivky stress-strain při kvazistatické deformaci (vlevo); účinnost disipace energie v závislosti na přetvoření vypočítaná na základě experimentálního měření (denzifikační přetvoření 0,66) (vpravo) [24]

Bylo také zjištěno, že deformační proces mikro-prutové struktury je citlivý na aplikované okrajové podmínky a vlastnosti základového materiálu.

[58] LI, Chuanlei, Hongshuai LEI, Yabo LIU, Xiaoyu ZHANG, Jian XIONG, Hao ZHOU a Daining FANG. Crushing behavior of multi-layer metal lattice panel fabricated by selective laser melting. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018. ISSN 00207403.

Studie sledovala vliv počtu vrstev základních buněk na kvazistatickou tlakovou odezvu mikro-prutové struktury pomocí teoretických výpočtů (model Gibson-Ashby), experimentálního testování a MKP simulací. Byly navrženy teoretické modely, které měly predikovat modul pružnosti a počáteční deformační pevnost mikro-prutových struktur typu BCCz.

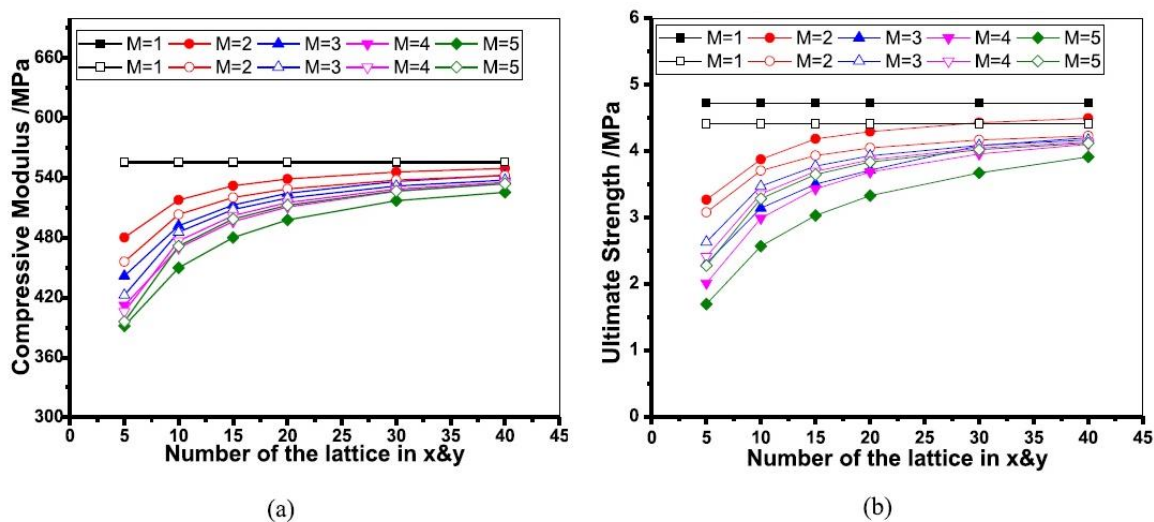
Simulace byla vytvořena za použití softwaru ABAQUS/EXPLICIT-6.14 s pomocí python skriptu, který vytvářel geometrii prutů s nominálním průměrem. Struktura byla diskretizována nosníkovými elementy (B31) a okrajové pláty skořepinovými elementy (S4R). Vstupní hodnoty nelineárního chování základového materiálu AlSi₁₀Mg byly stanoveny na základě tahových zkoušek prutových těles se stejným nominálním průměrem, jako byl průměr prutů struktury (1 mm).

Výsledky

Pro porovnání byly vytvořeny a otestovány konvenční tahová tělesa s průměrem 5 mm. Jejich vyhodnocením byly získány hodnoty Youngova modulu pružnosti základového materiálu 70 GPa, meze pevnosti 350 MPa a maximálního přetvoření do porušení 5,5 %. Odpovídající hodnoty pro průměr prutu 1 mm byly 40 GPa, 276 MPa a 3,5 %. I přes ekvivalentní postup výroby a použití stejných hodnot procesních parametrů jsou patrné značné rozdíly, podobně jako v předcházejících studiích [7, 24]. Tyto rozdíly byly přisouzeny efektům odlišného přestupu tepla do práškového materiálu a způsobu tuhnutí objemového materiálu [59]. Pro každou nově vznikající vrstvu vyžadovaly pruty s menším průměrem kratší skenovací dobu. Nedostatečná akumulace tepla způsobená krátkým časovým intervalem tavení mohla vést k výskytu většího množství částečně natavených částic, což vedlo k degradaci mechanických vlastností.

Závěr

Počet vrstev a základových buněk výrazně ovlivnily mechanické vlastnosti panelů BCCz struktur. Modul pružnosti a počáteční deformační pevnost se výrazně snížily se zvýšením počtu vrstev základních buněk (viz Obr. 3-22).

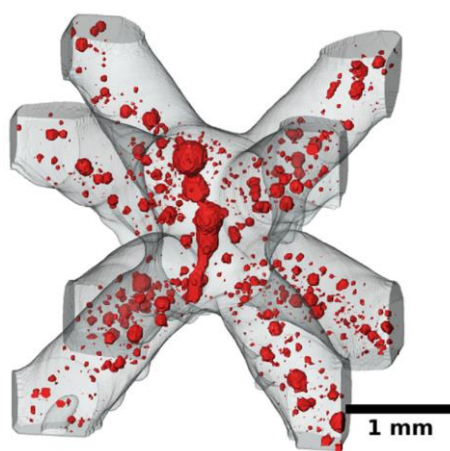


Obr. 3-22 Efekt geometrie a počtu vrstev na mechanické vlastnosti BCCz panelu: a) modul pružnosti v tlaku, b) počáteční deformační pevnost (plné značky reprezentují výsledky simulace, prázdné značky reprezentují výsledek teoretické predikce)

Vrstvu po vrstvě jdoucí progresivní poškození bylo charakteristickým rysem při deformaci zatěžované struktury. Ve fázi nelineárního poškození byl pozorován výskyt napěťových píků, které mohly přispět k navýšení deformace struktury. Z makroskopického hlediska byla struktura BCCz deformovaná sérií ohybů diagonálních prutů a selhání vertikálních prutů zatěžovaných na vzpěr. MKP simulace i teoretický výpočet ukázaly shodu s experimentálními daty, přičemž rozdíl mezi predikovanými pevnostmi a moduly byl pod 17 %. Navrhnuté modely mohly být dále použity pro predikci chování mikro-prutových struktur zatěžovaných v tlaku.

[32] AMANI, Yasin, Sylvain DANCETTE, Pauline DELROISSE, Aude SIMAR a Eric MAIRE. Compression behavior of lattice structures produced by selective laser melting: X-ray tomography based experimental and finite element approaches. *Acta Materialia*. 2018. ISSN 13596454.

Autoři této studie se zaměřili na studium chování mikro-prutových struktur vyrobených aditivními technologiemi při tlakovém zatěžování. Primárně se zaměřili na dvě konfigurace struktury *face cubic centred* (FCC) vyrobené z hliníkové slitiny AlSi₁₀Mg technologií SLM. Deformační proces struktur byl snímán *in-situ* a *ex-situ* rentgenovou tomografií zachycující makroskopické změny geometrie struktury a lokální mikro-porozitu (viz Obr. 3-23). Trojrozměrné rentgenové snímky byly následně využity pro tvorbu zjednodušené geometrické reprezentace struktur se zahrnutím výrobních imperfekcí.

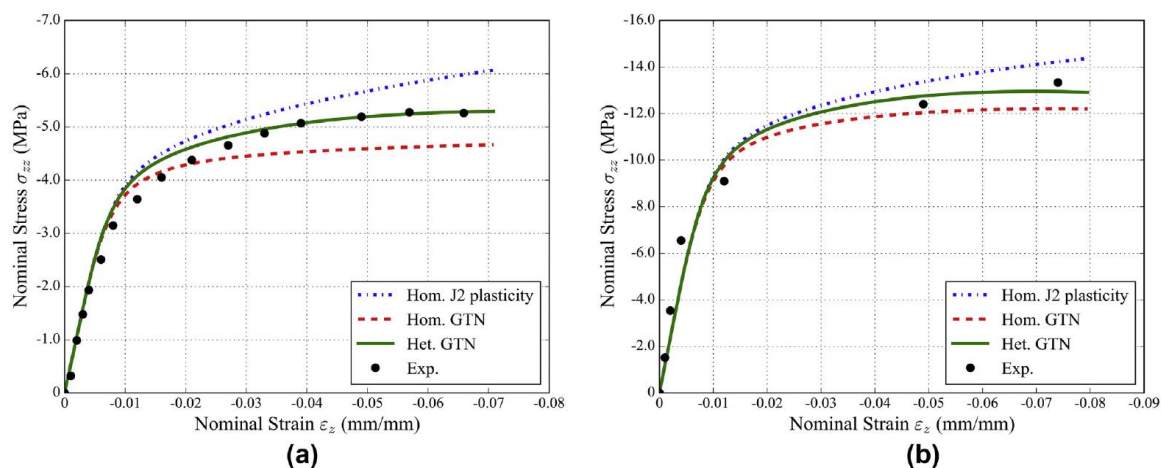


Obr. 3-23 Ukázka základní buňky struktury BCC s červeně zvýrazněnými lokálními póry

Informace o vnitřní porositě získaná tomografií byla následně využita při tvorbě modelu materiálu známého jako *Gurson-Tvergaard-Needleman* (GTN, v prostředí Abaqusu). Tento model využíval novou proceduru umožňující přiřadit údaj o lokální porositě každému elementu. Díky tomu byly vytvořeny dva výpočtové modely: první uvažoval homogenní rozložení průměrné měřené porozity napříč všemi pruty a druhý heterogenní rozložení závislé na oblasti skutečného výskytu pórů. Pro vytvoření polygonální sítě u obou přístupů byly využity objemové čtyřstěnné elementy prvního řádu. Polygonální síť byla vytvořena pomocí softwaru Avizo.

Výsledky

Vývoj napětí predikovaný simulacemi využívajícími homogenní a heterogenní GTN model byly doplněny o *J2 plasticity* model a porovnány s experimentem (viz Obr. 3-24). Z porovnání vyplývalo, že simulace založené na *J2 plasticity* modelu přeceňovaly hodnoty napětí v porovnání s experimentem. Přítomnost mikro pórů v prutech a uzlech struktury mírně snižovala Youngův modul pružnosti a podstatně její pevnost. Simulace využívající homogenní GTN vedla k nižším hladinám napětí v porovnání s experimentem, zatímco simulace s heterogenním GTN byla v dobré shodě. Tento výsledek poukazoval na korektní reprezentaci distribuce mikro-porozity.



Obr. 3-24 Křivky napětí v závislosti na poměrném přetvoření získaném experimentem a simulacemi a) pro strukturu s tenkými pruty, b) pro struktury s tlustými pruty

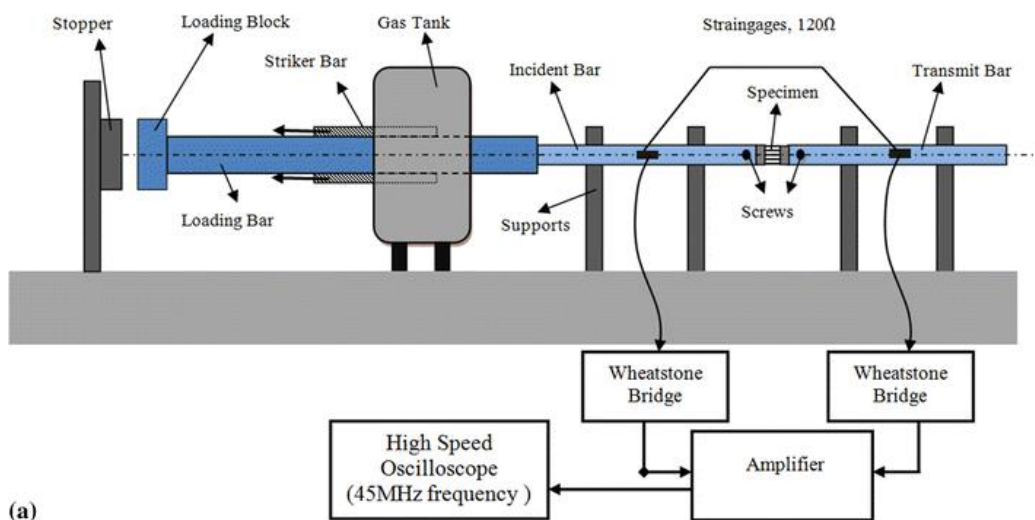
Závěr

Podobná shoda jako v případě Obr. 3-24 byla zaznamenána i při porovnání smykových napětí. Podoba výsledné křivky v experimentu a simulaci v oblasti nelineárního zatěžování implikovala vhodné zahrnutí imperfekcí vznikajících při výrobním procesu z hlediska modelu geometrie i modelu materiálu. Detailní posouzení modelu s heterogenní distribucí také ukázalo kumulaci značného množství pórů v uzlech a nárůst napětí na prutech v jejich blízkém okolí. Tyto jevy se do značné míry podílely na iniciaci plastického poškození struktury při zatěžování a měly by být v budoucnu dále studovány.

[16] GÜMRÜK, Recep, R. A.W. MINES a Sami KARADENIZ. Determination of Strain Rate Sensitivity of Micro-struts Manufactured Using the Selective Laser Melting Method. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018, **27**(3), 1016–1032. ISSN 15441024.

Autor studie pracoval na vytvoření výpočtového modelu působícího napětí v závislosti na rychlosti poměrné deformace pro mikro-prutové struktury z nerezové oceli 316L vyrobené technologií SLM. Hlavním předpokladem byla změna dynamické meze kluzu mikro-prutové struktury se zvyšující se rychlostí poměrné deformace, kterou je možné popsat pomocí konstitutivních vztahů.

Testováno bylo chování prutů struktury při tahovém namáhání pro různé rychlosti poměrné deformace (rozmezí 10^{-3} s^{-1} až 6000 s^{-1}). Nízko-rychlostní dynamické tahové testy (do 80 s^{-1}) byly provedeny pomocí upraveného hydraulického zařízení Instron E3000. V testech byly použity vzorky s jediným prutem struktury. Při zvyšujících se rychlostech zatěžování byly pozorovány výrazné oscilace soustavy přenášené do záznamu tenzometrů. Tento problém byl u podobných strojů popsán v předcházejících studiích [38]. Pro účel tahového testování za vysokých rychlostí sloužilo modifikované Hopkinsonovo zařízení (SHPB test), které bylo původně určeno pro rychlé tlakové zkoušky (viz Obr. 3-25 a)). Zde byla použita kombinovaná více prutová tělesa (21 prutů, viz Obr. 3-25 b)). Upravená konstrukce se osvědčila, nicméně autoři zmínili budoucí nutnost modifikace vzorků i konstrukce zařízení.

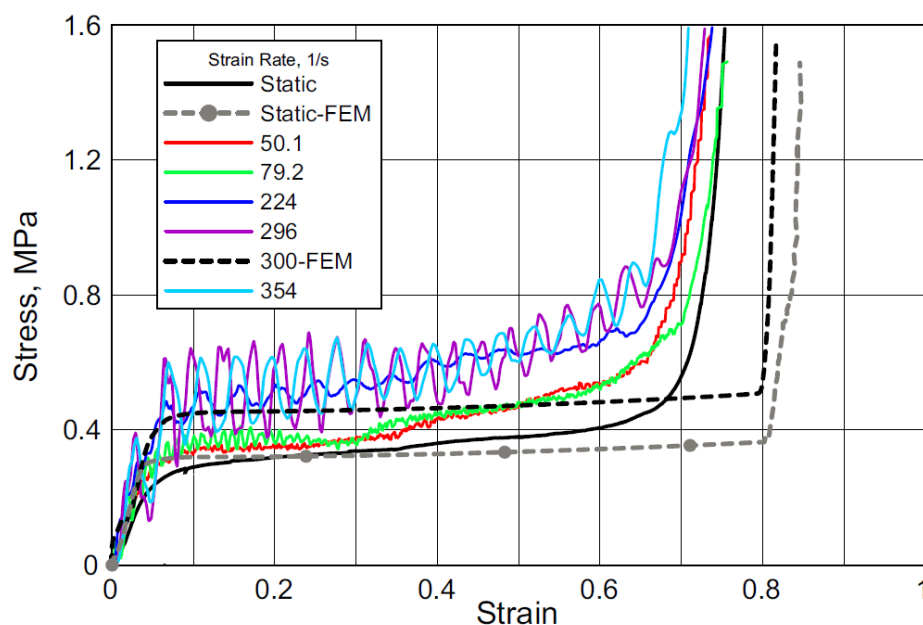


Obr. 3-25 a) Schéma Hopkinsonova zařízení upraveného pro vysokorychlostní tahové zkoušky, b) uchycení vzorku navrženého pro tento typ zkoušky [21]

MKP simulace byla provedena za účelem ověření platnosti experimentálně získaných koeficientů Cowper-Symondsova konstitutivního vztahu (rov. 2-2). Jako ověřovací úloha byl vybrán pádový test. Tento test byl simulován v softwaru LS-DYNA 3D s nastavením převzatým z předchozí studie [23]. Oproti dřívější studii byl model materiálu doplněn o chování závislé na rychlosti poměrné deformace (*Material 24*) s využitím konstant $D = 17 \cdot 10^6$ a $q = 12$. Geometrie prutů struktury byla v simulaci vytvořena pomocí *beam* (Hughes-Liu) elementů s 16 integračními body napříč průměru. Každý prut byl tvořen 8 elementy. V uzlech byly prutům odebrány rotační stupně volnosti.

Výsledky

Získané křivky popisující závislost napětí na přetvoření při různých rychlostech přetvoření byly konzistentní napříč testovaným spektrem a jejich hodnoty odpovídaly studii **Langdona** a kolektivu [60]. Hodnoty mezi kluzu a mezi pevnosti všech měření byly proloženy křivkou Cowper-Symondsova (C-S) konstitutivního vztahu za účelem získání materiálových konstant dynamického modelu materiálu (rov. 2-2). Kalibrovaný model byl následně implementován do již existující MKP simulace mikro-prutové struktury za účelem hlubšího posouzení mechanismů poškození při nárazu. Simulace byla porovnána s kvazistatickým tlakovým zatěžováním a dynamickým pádovým testem mikro-prutových struktur typu BCC (viz Obr. 3-26). Testování odhalilo až 50% nárůst napětí při zvýšení rychlosti testování. Tento jev byl přisuzován především citlivosti základového materiálu na rychlosti zatěžování.



Obr. 3-26 Křivky napětí v závislosti na poměrné deformaci bloků mikro-prutových struktur získaných pádovým testem v porovnání s kvazistatickou tlakovou zkouškou a MKP simulací [16]

Závěr

Porovnání MKP simulace s pádovým testem ukázalo, že hodnoty napětí v závislosti na deformaci se v oblasti do meze kluzu a v počátku oblasti plastické deformace struktury velmi podobají. V oblasti zhutňování materiálu však byly výsledky odlišné, což autoři přisuzovali nerovnoměrné geometrii struktury, natavenému materiálu na stěny jejich prutů a změnám průměru prutů, což simulace nezahrnovala.

Důkladné porovnání výsledků ukázalo, že přesnost modelu se zvyšujícími rychlostmi klesá, neboť dochází ke zvýšení vlivu velkých deformací a působení změny teplot, což model neuvažuje. K velkým deformacím dochází při progresivním kolapsu struktury na hranicích uzlů, kde jsou elementy v numerickém modelu silně plasticky deformovány. Na tuto problematiku je nutné se do budoucna zaměřit, neboť poměrné lokální deformace nemusejí odpovídat poměrným deformacím celého bloku struktury.

3.3 Absorpce energie

[14] MINES, R. A.W., S. TSOPANOS, Y. SHEN, R. HASAN a S. T. MCKOWN. Drop weight impact behaviour of sandwich panels with metallic micro lattice cores. *International Journal of Impact Engineering*. 2013, **60**, 120–132. ISSN 0734743X.

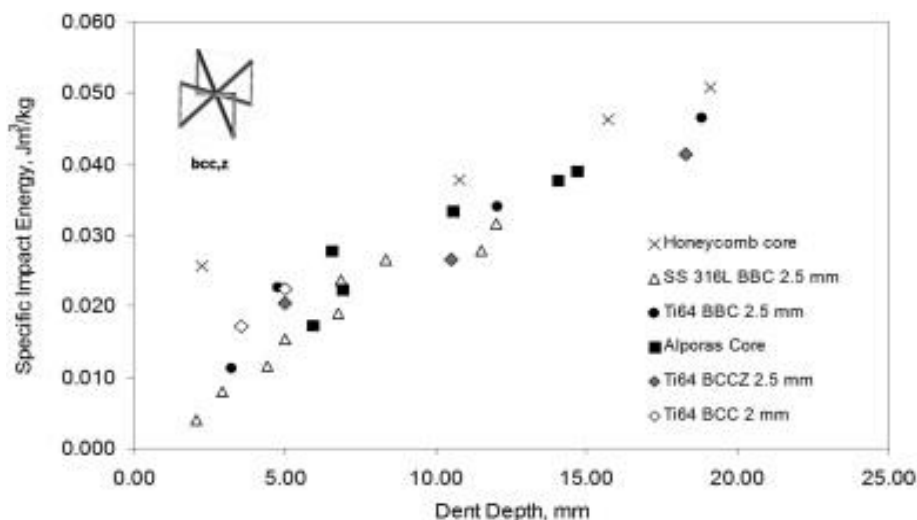
Pomocí kvazistatických a dynamických mechanických testů autoři porovnávali vlastnosti mikro-prutové struktury (BCC) vyrobené technologií SLM z nerezové oceli 316L a titanové slitiny Ti_6Al_4V s konvenční strukturou typu *honeycomb* vyrobenou z hliníku.

Ačkoliv bylo již dříve známo, že struktura typu BCC nedosahovala nejvyšší tuhosti v porovnání s ostatními typy podobných mikro-prutových struktur, byla tato geometrická konfigurace vybrána na základě dobré vyrobitelnosti a zmapovaného chování při kombinovaném namáhání prutů. Pro obě slitiny byly stanoveny procesní parametry výroby, mezi které patřily průměr ohniska laseru (90 μm) a tloušťka vrstvy nanášeného materiálu (50 μm). Pro vzorky z nerezové oceli byl použit výkon laseru 140 W s dobou expozice 500 μs . Pro vzorky z titanu byl výkon laseru a doba expozice parametricky měněny v rozmezí 140-200 W a 500-1000 μs .

Výsledky

Chování mikro-prutových struktur bylo porovnáno pomocí pádového testu s konvenční hliníkovou strukturou typu *honeycomb* (typ Hexcel CR111-1/4-5056), hliníkovou pěnou (*Alporas*) a modifikovanou strukturou typu BCC s vertikálními nosníky (BCCz). Mikro-prutová struktura vyrobená z titanové slitiny (Ti_6V_4Al) dosahovala při dynamickém zatěžování podobných odolností vůči průniku deformačního tělesa jako struktura typu *honeycomb*. Struktura vyrobená z nerezové oceli dosahovala vyšší kvality povrchu po výrobě a zároveň vykazovala nižší citlivost mechanických vlastností na změnu výrobních podmínek. Nicméně její pevnost nebyla natolik vysoká ve srovnání s ostatními strukturami.

Mezi sledovanými parametry bylo množství energie spotřebované na deformaci struktury (viz Obr. 3-27) vztažené k průměrné hustotě vzorku – specifická rázová energie (*specific impact energy* (SIE)). Tímto parametrem bylo možné porovnat vzorky s odlišným objemem struktury z různých materiálů. Výsledky ukázaly porovnatelné množství energie absorbované pro více typů testovaných struktur, přičemž nejvyšších hodnot dosahovala struktura typu *honeycomb*.



Obr. 3-27 Množství energie spotřebované na deformaci struktury vztažené k její hmotnosti pro několik typů poréznych struktur [11]

Závěr

Mikro-prutové struktury vyrobené aditivními technologiemi mohou dosahovat podobných kvalit při absorpci energie jako konvenční struktury typu *honeycomb*.

Tahovými zkouškami prutových těles bylo zjištěno, že mikro-prutové struktury vyrobené technologií SLM nedosahují tabulkových hodnot objemových dílů. V případě nerezové oceli byl poměr meze kluzu prutových vzorků vůči tabulkovým hodnotám stanoven na $\sigma_{0,2SLM}/\sigma_{0,2TB} = 0,46$; meze pevnosti $\sigma_{utsSLM}/\sigma_{utsTB} = 0,45$ a velikosti poměrné deformace do poškození $\varepsilon_{fSLM}/\varepsilon_{fTB} = 0,32$. Snížení hodnot mechanických vlastností při tahovém zatěžování bylo přisuzováno proměnlivosti povrchu a imperfkcím výroby prutů. Tyto vlastnosti nebylo možné zvýšit tepelným opracováním, neboť nerezová ocel 316L nemůže být tepelně vytvrzena. U titanové slitiny došlo k výraznějšímu snížení vlastností oproti tabulkovým hodnotám.

Jako jeden z významných kroků do budoucna autoři určili potřebu detailní studie kvality mikro-prutové struktury. To zahrnuje sledování rozměrové přesnosti, kvality povrchu, residuálních napětí, mikrostruktury a případně stopových nečistot. Fenomény spojené s imperfkcemi by měly být zahrnuty v geometrii dynamické simulace.

[57] TANCOGNE-DEJEAN, Thomas, Adriaan B. SPIERINGS a Dirk MOHR. Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading. *Acta Materialia*. 2016, **116**. ISSN 13596454.

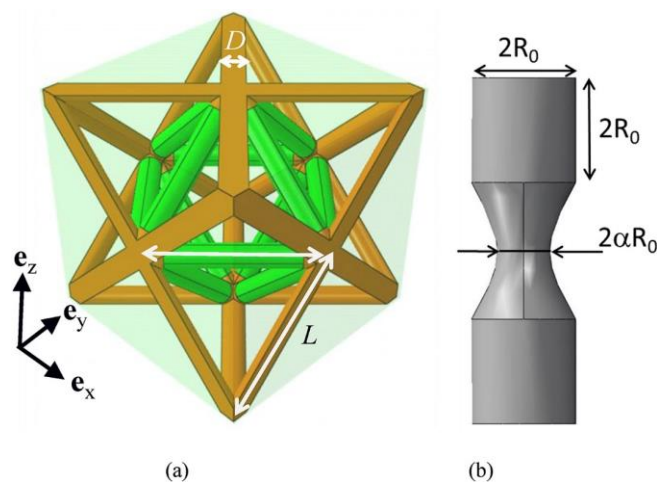
Hlavním předmětem studie bylo mapování deformačního chování modifikací mikro-prutových struktur vyrobených z nerezové oceli 316L technologií SLM při kvazistatickém a dynamickém zatěžování. Autor předpokládal, že vhodným parabolickým zúžením prutů lze dosáhnout monotónního růstu napětí při zatěžování a deformaci struktury s jejím současným zvýšením tuhosti.

MKP simulace byly vytvořeny za účelem predikce velkých přetvoření při jednoosém zatěžování struktury s odlišným objemovým podílem a tvarem prutů. Při vytváření modelu geometrie vzorků v softwaru Abaqus byla polygonální síť struktury vytvořena pomocí *solid* elementů prvního řádu (lineární bázové funkce, C3D8R). Za účelem dosažení izotropního chování struktury v elastické oblasti byla geometrie omezena na pruty s kruhovým průřezem (velikost elementů polygonální sítě 80 μm).

Nerezová ocel 316L byla v MKP softwaru definována s využitím *J2-plasticity* modelu materiálu, který byl nezávislý na rychlosti zatěžování a využíval izotropního zpevnění. Tím byly v modelu zanedbány možné efekty anizotropního chování, kinematického zpevnění a fázové přeměny (modul pružnosti 210 GPa, Poissonovo číslo na 0,3). Po částech lineární křivka zpevnění byla kalibrována na základě tahových zkoušek prutových vzorků. Zpevnění při zatěžování bylo vysoce nelineární do dosažení napětí 733 MPa, při poměrné deformaci 0,05. Následně byl průběh zpevnění přibližně lineární s tečným modulem 1077 MPa.

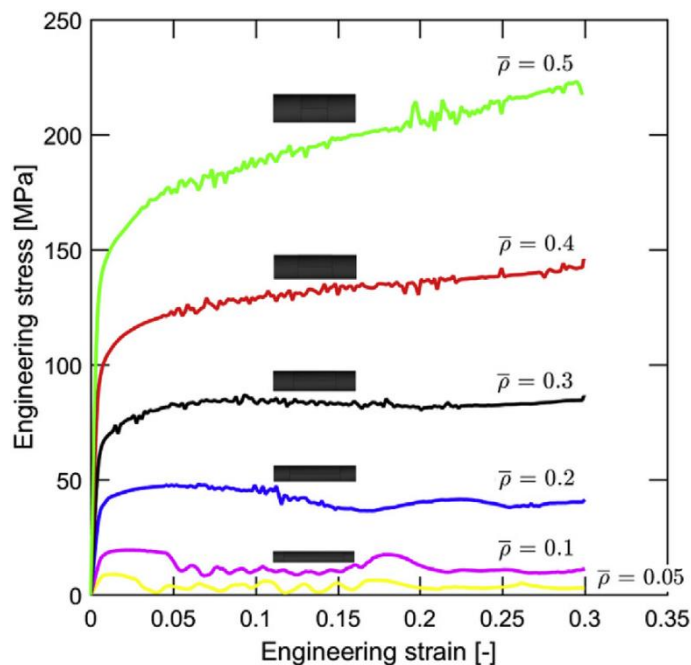
Výsledky

Použití mírně zúžených osově symetrických prutů (viz Obr. 3-28 b)) zvýšilo mez kluzu struktury. Z rozsahu testovaných průměrů dosahoval nejvyšších hodnot poměr mezi minimálním a maximálním průměrem 0,8 (testováno 0,5 až 1).



Obr. 3-28 a) Základní buňka mikro-prutové struktury octet truss bez zúžení b) zúžená geometrie jediného prutu [37]

Deformační chování mikro-prutové struktury *octet truss* (viz Obr. 3-28 a)) se stalo stabilním při relativních hustotách vyšších než 0,3 (viz Obr. 3-29). Při této relativní hustotě začala být křivka napětí v závislosti na přetvoření deformované struktury monotónně vzrůstající.



Obr. 3-29 Odezva struktury při kvazistatickém jednoosém zatěžování pro různé hodnoty relativních hustot [56]

Specific energy absorption (SEA, definovaná jako energie absorbovaná do přetvoření o velikosti 0,3 vztažená k hmotnosti vzorku) byla monotónně rostoucí funkcí relativní hustoty. Pro testovanou strukturu byl typický výskyt oblasti rovnoměrných deformací (*plateau stress*), který předcházel zhutnění struktury. V tomto případě dosahovala SEA asi 30 % plného základního materiálu. Tato hodnota byla výrazně vyšší v porovnání s konvenční tenkostěnnou strukturou typu *honeycomb*.

Závěr

Tahové zkoušky provedené na cylindrických vzorcích o různých průměrech ukázaly, že mez kluzu se může zvýšit o 50 %, když se zvyšuje průměr vzorku (0,8 až 8 mm). Tento jev byl přisuzován působení tepla během procesu výroby, při kterém mohly vznikat velmi odlišné polykrystalické mikrostruktury.

Zdánlivá pevnost mikro-struktury se zvýšila přibližně o 30 % při změně rychlosti poměrné deformace z hodnoty 10^{-3} s^{-1} na 10^3 s^{-1} . Tento jev byl přisuzován především citlivosti základního materiálu na rychlost poměrné deformace.

Před mechanickým zatěžováním byla provedena detailní analýza zahrnující počítačovou tomografii a posouzení mikroskopem, která odhalila lokální přírůstky materiálu na struktuře (drsnost povrchu $R_a = 20 \text{ }\mu\text{m}$). Tyto imperfekce nebyly v simulaci zahrnuty, což mohlo zvýšit odchylky od experimentu.

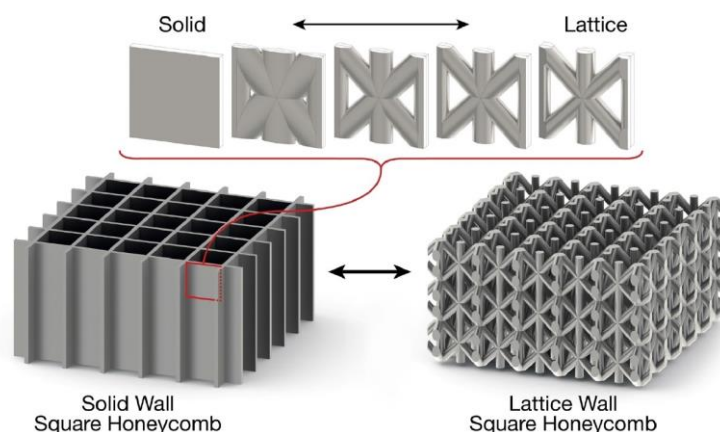
[39] HARRIS, J. A., R. E. WINTER a G. J. MCSHANE. Impact response of additively manufactured metallic hybrid lattice materials. *International Journal of Impact Engineering*. 2017, **104**. ISSN 0734743X.

Autor studie posuzoval dopad změny procesních parametrů a geometrie struktury vyrobené z nerezové oceli 316L technologií SLM na mechanické vlastnosti při dynamickém zatěžování. Předpokládal, že mechanické vlastnosti konvenčních porézních struktur (např. *honeycomb*) vyrobených aditivními technologiemi mohou dosahovat vyšších hodnot při částečné modifikaci jejich geometrie na mikro-prutové struktury.

Výsledky

Na začátku studie byla navržena aditivně vyrobitelná *honeycomb* struktura, které byla uměle navýšena porozita nahrazením jejich stěn mikro-prutovými prvky o stejné relativní hustotě (viz Obr. 3-30). Při dynamickém zatěžování hybridní geometrie výrazně překonala vlastnosti mikro-prutových struktur vyráběných v minulých studiích Harrise [61, 62]. Zvýšení hodnot mechanických vlastností bylo zaznamenáno v případě pevnosti, SEA a efektivity absorpce.

V průběhu studie byly vyrobeny geometrické konfigurace mikro-prutových struktur s různými průměry prutů. V případech, kdy se průměr prutu začínal blížit průměru ohniska laseru výrobního zařízení, docházelo k velkým odchylkám hodnot relativních hustot oproti nominálním (velký přírůstek materiálu). Během inspekce po výrobě bylo také odhaleno velké množství defektů, například zakřivené vertikální pruty v důsledku výrobního procesu.



Obr. 3-30 Koncept hybridní geometrie: nahrazování stěn čtvercové struktury honeycomb mikro-prutovými prvky (o konstantní relativní hustotě) [33]

Součástí studie bylo také kvazistatické zatěžování ($0,6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \sim$ rychlosti poměrné deformace 10^{-3} s^{-1}) struktur s mikro-prutovým uspořádáním, které odhalilo zvýšenou pevnost a hodnoty SEA u struktur s hybridním designem v porovnání s konvenčními strukturami typu BCC a BCCz. Při porovnání se strukturou typu *honeycomb* vyrobenou aditivními technologiemi však byly tyto hodnoty nižší (viz Obr. 3-31).

Součástí studie bylo i provedení tahových testů objemových vzorků (*dogbone*). Výsledné křivky závislosti skutečného napětí σ_t na logaritmickém přetvoření ε_p byly proloženy křivkami konstitutivních vztahů plastického zpevnění. Pro popis těchto vztahů sloužily parametry n_i a C_i , získané proložení. Tímto způsobem byly získány hodnoty parametrů pro modely:

$$\text{Hollomon} \quad \sigma_t = C_1 \varepsilon_p^{n_1} \text{ [MPa]} \quad (2-2)$$

$$\text{Ludwik} \quad \sigma_t = C_2 + C_1 \varepsilon_p^{n_1} \text{ [MPa]} \quad (2-3)$$

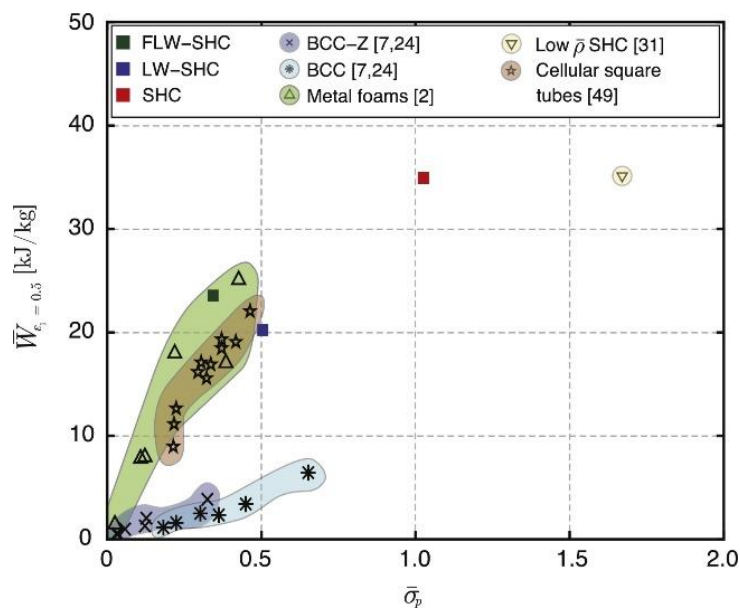
$$\text{Voce} \quad \sigma_t = C_2 - (C_2 - C_1) \exp(-n_1 \varepsilon_p) \text{ [MPa]} \quad (2-4)$$

$$\text{Ludwigson} \quad \sigma_t = C_1 \varepsilon_p^{n_1} + \exp(C_2 + n_2 \varepsilon_p) \text{ [MPa]} \quad (2-5)$$

Vztahy lze využít při vytváření modelu chování zatěžovaných austenitických nerezových ocelí vyrobených aditivními technologiemi. Každý z nich reprezentuje mírně odlišný vývoj napětí v závislosti na poměrné deformaci.

Závěr

Největší účinnosti při dynamickém zatěžování dosahovaly vzorky z *honeycomb* struktury při nižších a vysokých rychlostech ($50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Silový pík působící na počátku deformace struktury byl mnohem větší v porovnání s mikro-prutovými strukturami. Oproti tomu hybridní vzorky s mikro-prutovými strukturami dosahovaly vyšší efektivity při středních rychlostech ($100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Při těchto středních rychlostech nebylo natolik signifikantní působení rázové vlny. Na základě toho autoři usuzovali, že mikro-prutové struktury mají vyšší potenciál pro optimalizaci za středních rychlostí.

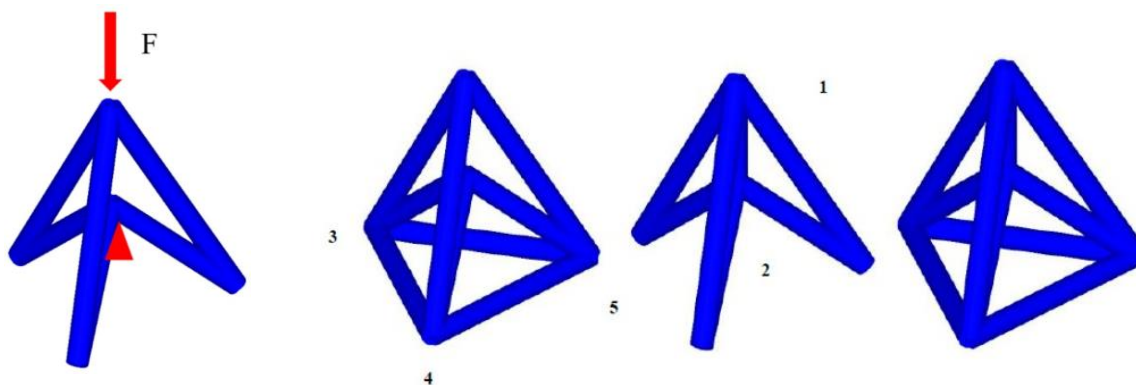


Obr. 3-31 Hodnoty SEA stanovené kvazistatickým testováním (poměrná deformace do 50 %) [33]

Vzorky byly dynamicky testovány pomocí Hopkinsonova zařízení. Rozdíl měřených napětí na straně nárazu vzorků i jejich odvrácené straně společně s rovnoměrným rozložením deformací indikovaly, že efekt šíření rázových vln začne ovlivňovat odezvu materiálu při maximálních měřených rychlostech $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

[19] CHEN, Zeyao, Zhe WANG, Shiwei ZHOU, Jianwang SHAO a Xian WU. Novel negative poisson's ratio lattice structures with enhanced stiffness and energy absorption capacity. *Materials*. 2018, **11**(7). ISSN 19961944.

Studie se soustředila na zvýšení tuhosti, pevnosti a kapacity absorbované energie mikro-prutových struktur vyráběných aditivními technologiemi s negativními hodnotami Poissonova čísla. Výzkumný tým chtěl dosáhnout příčného rozšíření struktur při tahovém namáhání pomocí implementace různých typů žeber do konvenční struktury (viz Obr. 3-32). Vhodná kombinace podpůrných prutů měla zvýšit hodnoty Youngova modulu, meze kluzu a působícího napětí při jejich deformaci a zhuštění.



Obr. 3-32 Základní buňky mikro-prutové struktury s negativní hodnotou Poissonova čísla; (zleva doprava) typ A, B, C a D [38]

Studie byla realizována prostřednictvím experimentů a kvazistatické nelineární MKP (LS-DYNA) simulace tlakové zkoušky, která byla verifikována experimentem. Z křivek napětí v závislosti na poměrné deformaci byly stanoveny skutečné hodnoty modulu pružnosti, meze kluzu, napětí při progresivním kolapsu, přetvoření při zhutnění struktury a specifická absorpce energie.

Výsledky

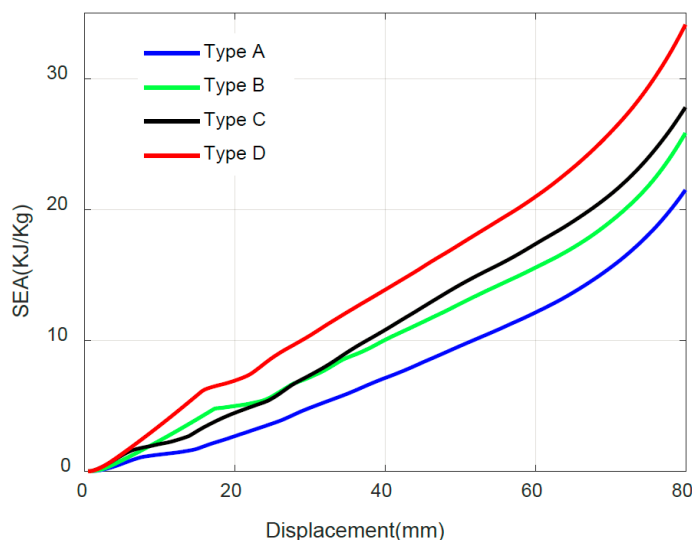
Pro vytvoření modelu materiálu v simulaci byly využity tabulkové hodnoty hliníkové slitiny (Youngův modul 70 GPa a Poissonovo číslo 0,27). Ke stanovení vlivu změn geometrie struktury na sledované mechanické vlastnosti byla provedena série čtyř parametrických studií. V jejich průběhu byly sledovány deformace vzorků s relativní hustotou v rozmezí 14,4 % až 19,9 %. Z důvodu časové náročnosti výpočtu při použití *solid* elementů byl model geometrie struktur sestaven pomocí *beam* elementů (Belytschko-Schwer reflektující plastické ohyby, protahování a torzní namáhání). Pro vytvoření modelu materiálu byl použit empirický konstitutivní Johnson-Cookův vztah (MAT-98, uvažující rychlosti deformace) se zanedbáním vlivu teploty:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}) \quad [MPa] \quad (2-6)$$

Hodnoty parametrů použité ve studii ($A = 448 \text{ MPa}$; $B = 343 \text{ MPa}$; $C = 0,01$; $n = 0,41$) byly definovány pro hliníkovou slitinu 7075. Deformační člen byl modelován jako dokonale tuhý pohyblivý plát (MAT-20). Pro přenos působících sil mezi deformačním členem a strukturou byl definován tzv. jednosměrný kontaktní algoritmus (CONTACT AUTOMATIC NODES TO SURFACE), který zahrnoval pouze elementy struktury aktuálně interagující s elementy deformačního členu. Kontakt mezi jednotlivými pruty struktury byl definován tzv. *beam-to-beam* algoritmem (CONTACT AUTOMATIC GENERAL). Koeficienty statického a dynamického tření byly všeobecně definovány na 0,2.

Závěr

Porovnáním experimentu se simulací byly zjištěny malé rozdíly mezi testovanými strukturami z hlediska průběhu napětí. Následně byly porovnány SEA různých konfigurací struktur prostřednictvím MKP simulací (viz Obr. 3-33). Pomocí parametrických úloh se podařilo původní strukturu typu A konfigurovat (popořadě B, C a D) pro dosažení vyšších hodnot SEA. Detailní posouzení jednotlivých konfigurací ukázalo, že mikro-prutové struktury mohou zvýšit své mechanické vlastnosti, pokud je dosaženo jejich Poissonova čísla blízkého nule. Jde především o zvýšení pevnosti, tuhosti, kapacity absorbované energie, poměrné deformace do zhutnění a napětí působícího v oblasti progresivního kolapsu.

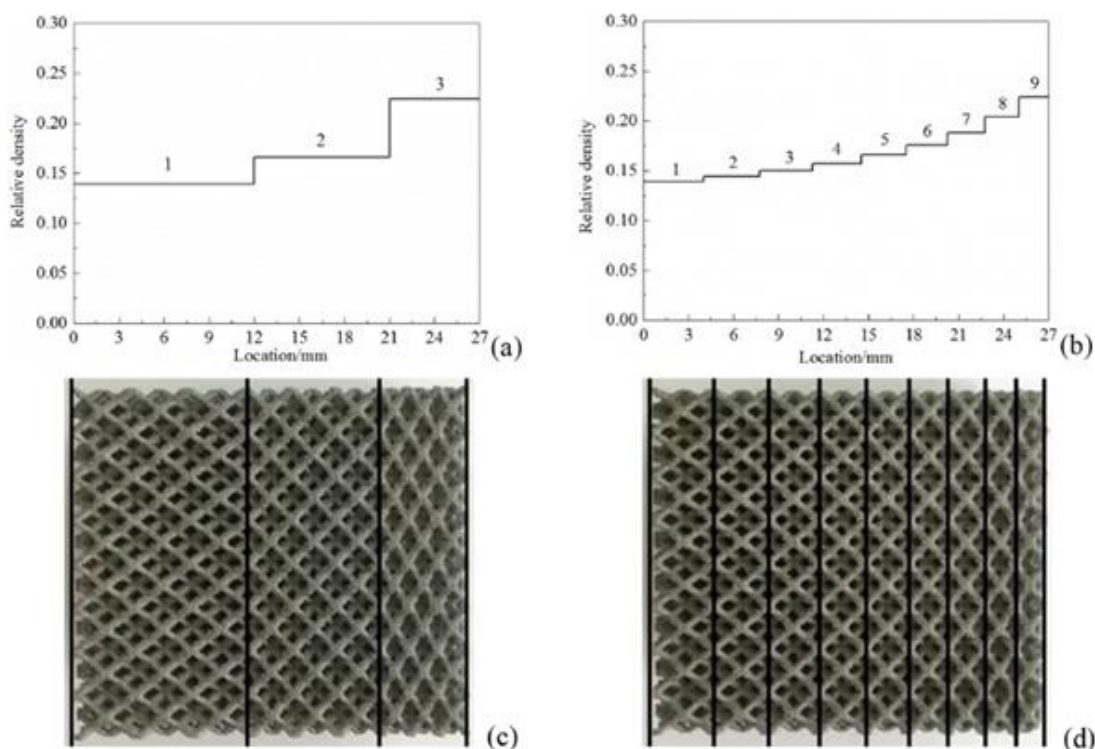


Obr. 3-33 Porovnání SEA v závislosti na deformaci čtyř typů mikro-prutových struktur [19]

Autoři studie uvedli, že v budoucnu by mělo dojít k zahrnutí imperfekcí povrchu struktury do simulací. Navíc by měly být hlouběji prozkoumány vlastnosti struktur při jejich dynamickém zatěžování za různých rychlostí za účelem prozkoumání jejich odolnosti proti nárazu.

[18] XIAO, Lijun a Weidong SONG. Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiments. *International Journal of Impact Engineering*. 2018, **111**, 255–272. ISSN 0734743X.

Studie se zaměřovala na testování potenciálu absorpce energie při kvazistatickém a dynamickém zatěžování mikro-prutových struktur (struktury BCC vyrobené technologií SLM z titanové slitiny Ti₆Al₄V) se skokovou změnou objemového podílu. Toho bylo docíleno změnou délky základních buněk struktury ve směru zatěžování (viz Obr. 3-34). Jedním z hlavních cílů bylo ověření hypotézy, podle níž, skokově měnící se objemový podíl může vést ke zmenšení silového píku v počátcích rázového zatěžování a navýšení kapacity absorbované energie.



Obr. 3-34 Skoková změna objemového podílu pro různé přechody mikro-prutové struktury BCC znázorněná graficky (a-b) i odpovídajícím vzorkem (c-d) [33]

Dynamické testy byly provedeny na Hopkinsonově zařízení za účelem stanovení mechanických vlastností materiálu pro rychlosti poměrné deformace do 10^3 s^{-1} . Proces zatěžování byl sledován vysokorychlostní kamerou za účelem posouzení mechanismů deformace charakteristických pro mikro-prutové struktury (*digital imaging correlation – DIC*). Experimentální studie byla doplněna o numerickou simulaci rázového děje za účelem predikce přenášeného zatížení a vývoje deformací struktury. Model geometrie mikro-prutové struktury byl vytvořen pomocí *beam 154* elementů. Vstupní hodnoty modelu materiálu byly získány pomocí kvazistatických i dynamických tlakových zkoušek. Bylo tak možné zahrnout chování v plastické oblasti, zpevnění při deformaci i efekt rychlosti poměrné deformace.

Numerická simulace rázového děje byla provedena v softwaru LS-DYNA. Metody vytváření modelu byly převzaty ze studie Ozdemira [63]. Každý prut byl na základě citlivostní studie polygonální sítě rozdělen na elementy o velikosti 0,1 mm. Skutečný průměr prutu (0,44 mm) byl stanoven na základě SEM analýzy a zahrnut v simulaci. Rychlost deformačního členu (v) byla stanovena z rychlosti poměrné deformace ($\dot{\epsilon}$) jako:

$$v = \dot{\epsilon} \cdot L_0 \text{ [MPa]} \quad (2-7)$$

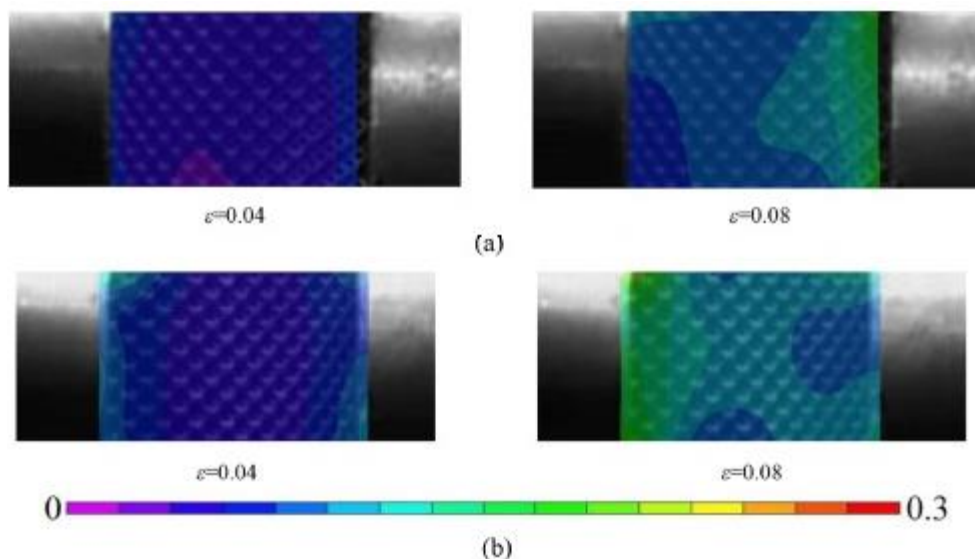
kde L_0 tvořilo počáteční délku vzorku ve směru zatížení. Za účelem zahrnutí plasticity, deformačního zpevnění a efektu rychlosti poměrné deformace byly v modelu materiálu použity křivky napětí v závislosti na poměrné deformaci při různých rychlostech zatěžování. Vzorky testované na SHPB měly podobu válců s výškou i průměrem 6 mm. Modul pružnosti byl zvolen na základě předcházejících jednoosých testů (110 GPa). Kritérium poškození materiálu bylo stanoveno jako hodnota prudkého poklesu napětí (0,06) při testu. Poissonovo číslo bylo stanoveno na hodnotu 0,3.

Výsledky

Porovnání experimentálních výsledků s předcházející studií využívající konvenční BCC struktury ukázalo, že specifická pevnost a SEA je vyšší u struktur s gradientní relativní hustotou. Pro oblast rovnoměrných deformací, před zhutněním materiálu, je SEA přibližně o 28 % vyšší. Typ přechodu struktury nebo náklon směru zatížení (ve svislém směru) neměl významný dopad na absorpci energie v rozmezí testovaných rychlostí, což bylo potvrzeno i výsledky numerické simulace.

Závěr

Při porovnání kvazistatických (10^{-3} s^{-1}) a dynamických (10^3 s^{-1}) testů vzorků s proměnným objemovým podílem se ukázalo, že pevnost při rychlé deformaci struktury je asi o 25 % vyšší. Výsledek snímkové DIC analýzy ukázal (viz Obr. 3-35), že před poškozením struktury jsou vnitřní deformace rovnoměrně rozloženy. Odlišné chování struktury při různých rychlostech poměrné deformace struktury proto nebylo primárně přisuzováno rázové vlně a účinku setrvačnosti, ale vlastnostem základového materiálu. Poškození způsobené ohybem a lomem prutů, které vedlo ke kolapsu struktury, bylo pozorováno jako první u oblastí s nízkou hodnotou objemového podílu (a s výškou základní buňky $>3 \text{ mm}$). Toto poškození se projevilo ve smykových rovinách a bylo nejčastější příčinou kolapsu struktur při kvazistatickém i dynamickém zatěžování.

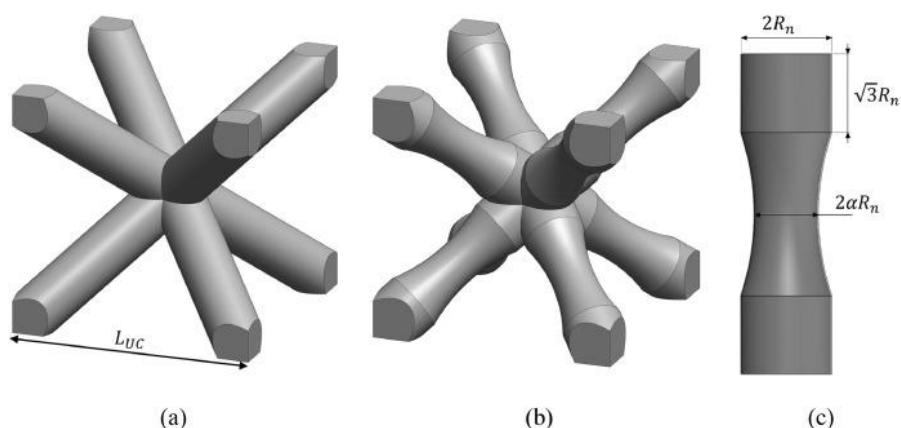


Obr. 3-35 Rozložení lokálního přetvoření podle DIC analýzy; rychlost poměrné deformace (a) 500 s^{-1} , (b) 1000 s^{-1} [33]

Autoři studie uvedli, že simulace by mohla být využita pro predikci tuhosti a počátku kolapsu mikro-prutové struktury.

[64] TANCOGNE-DEJEAN, Thomas a Dirk MOHR. Stiffness and specific energy absorption of additively-manufactured metallic BCC metamaterials composed of tapered beams. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018, **141**, 101–116. ISSN 00207403.

Studie se zaměřovala na stanovení modulů a posouzení deformačního chování mikro-prutových struktur vyrobených technologií SLM pomocí analytického a numerického výpočtu. Autor plánoval vhodným zúžením prutů mikro-prutové struktury typu BCC z titanové slitiny $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ dosáhnout zvýšení hodnot Youngova modulu a SEA. Testovány byly struktury s konvenčními pruty i pruty s parabolicky se zužujícími průřezy (viz Obr. 3-36) [57].

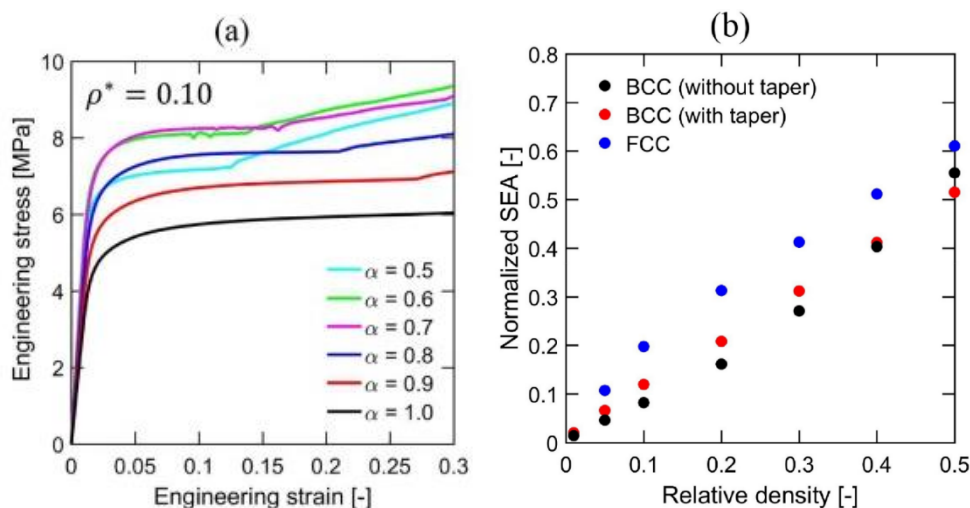


Obr. 3-36 Základní buňka BCC struktury složená (a) z prutů konstantního kruhového průřezu ($\alpha = 1$), (b) ze zužujících se prutů ($\alpha = 0,7$); (c) Parametry popisující geometrii prutu [58]

Výsledky

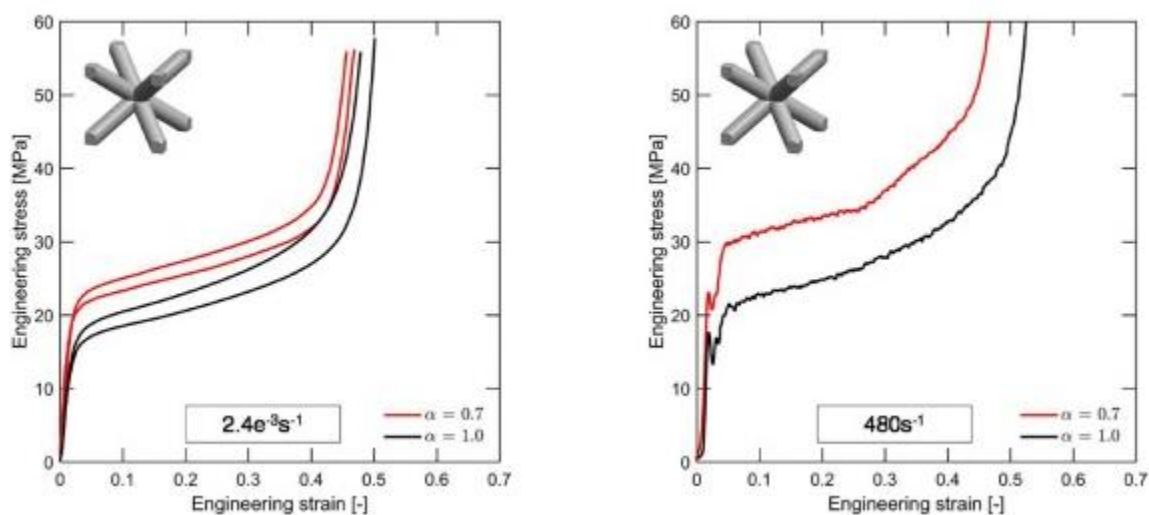
Výsledky analytických a numerických výpočtů ukázaly, že struktura při deformaci (s rostoucí relativní hustotou v rozmezí 1-50 %) jevila známky stabilního hroucení. Velikost napětí se v závislosti na poměrné deformaci monotónně zvyšovala až do okamžiku zhutnění. Struktury se zúženými průřezy prutů jevila známky vyšších mechanických vlastností (viz Obr. 3-37 a)), zejména Youngova modulu (až o 70 %) a vyšší absorpce energie (až o 45 %). Namáhání prutů struktury nebylo způsobeno výhradně ohybem. Zatížení prutů bylo kombinované a dominantní složky se měnily podle deformace jednotlivých prutů. Použitím prutů s mírně zúženým průřezem bylo docíleno redukování anizotropního chování BCC struktury.

Za účelem validace výpočtu specifické absorpce energie byly provedeny kvazistatické a dynamické (SHPB) tlakové testy na vzorcích s relativní hustotou 10 %, 20 % a 30 %, a minimálním průměrem prutu 0,3 mm. Zatěžující rychlost Hopkinsonovi tyče byla 10 m/s, což při dané velikosti vzorků odpovídalo nominální makroskopické rychlosti poměrné deformace až 480 s^{-1} .



Obr. 3-37 (levý) Vliv zúžení prutu na průběh napětí při deformaci struktury pro objemový podíl 10 %; (pravý) Porovnání specifické absorpce energie pro struktury s různým objemovým podílem [64]

Dynamická odezva materiálu byla průběhem podobná té kvazistatické. Jejich rozdíl byl popsán koeficientem označovaným jako *Dynamic Increase Factor* (DIF). Pro porovnání obou typů zatěžování byly vybrány hodnoty v napětí při deformaci struktury o velikosti 10 %. Při tomto srovnání byl zaznamenán přibližně 30% rozdíl napětí (viz Obr. 3-38). Tento rozdíl byl pozorovatelný pro struktury s různým průřezem prutů. DIF zjištěný v této studii byl podobný hodnotě zjištěné v minulé studii [18] pro stejný základový materiál. Na základě tohoto poznatku bylo určeno, že DIF mikro-prutové struktury je zapříčiněna především citlivostí z materiálu na rychlosti poměrné deformace (ne topologickou konfigurací).



Obr. 3-38 Experimentálně měřené křivky napětí-deformace mikro-prutové struktury se zúženými (červená) a konstantními (černá) pruty s objemovým podílem 0,2; (levý) kvazistatické zatěžování, (pravý) dynamické zatěžování [32]

Závěr

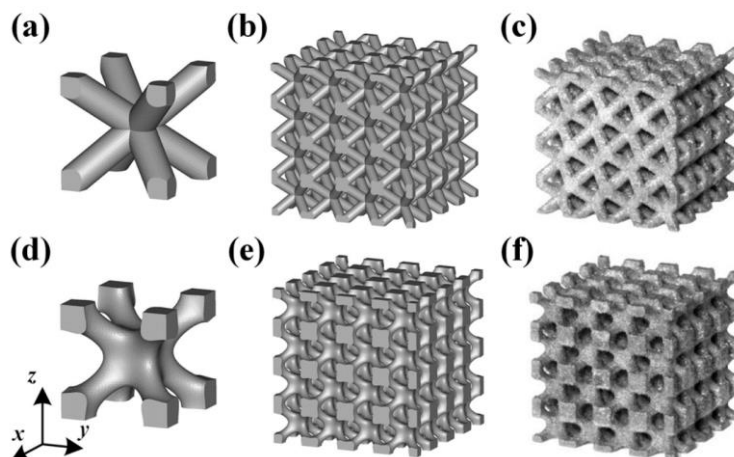
SEA mikro-prutových struktur byla určena z křivek znázorňujících závislost napětí na přetvoření. Zde byla určena jako práce vykonaná jednoosým tlakovým zatěžováním při 30% deformaci struktury o určité hmotnosti. Studie byla doplněna o kvazi-statické tlakové zatěžování mikro-prutové struktury typu FCC v nejméně tuhém směru. Při nízkých objemových podílech byla SEA struktur typu BCC se zúženými pruty nižší než u FCC (viz Obr. 3-37 b)). Při vysokých objemových podílech se blížily podobným hodnotám.

Navzdory svým kvantitativním nedostatkům zůstala BCC struktura zajímavá z hlediska aplikací zahrnujících absorpci energie, neboť na rozdíl od jiných struktur (např.: honeycomb a FCC) nevznikají při jejím kolapsu nestability vyvolané příčnými vzpěrami. Výsledkem je hladká monotónně rostoucí křivka napětí v závislosti na poměrné deformaci. Poměrně široká oblast rovnoměrné deformace, která předchází zhutnění struktury, se jeví jako ideální pro návrh dílů absorbujících energii.

[42] ZHAO, Miao, Fei LIU, Guang FU, David ZHANG, Tao ZHANG a Hailun ZHOU. Improved Mechanical Properties and Energy Absorption of BCC Lattice Structures with Triply Periodic Minimal Surfaces Fabricated by SLM. *Materials*. 2018, **11**(12), 2411. ISSN 1996-1944.

Hlavním cílem studie bylo stanovení vlastností matematicky definované modifikace mikro-prutové struktury typu BCC při kvazistatickém tlakovém zatěžování. Studie ověřovala hypotézu, podle níž lze matematickým definováním struktury dosáhnout hladkých přechodů mezi jednotlivými pruty, což má za následek výhodnější distribuci působícího napětí při zatěžování struktury.

Ve studii bylo použito matematické formulace označované *triply periodic minimal surface* (TPMS), za účelem generování mikro-prutových struktur se zvýhodněnými geometrickými konfiguracemi. Touto metodou byla generovaná CAD data modifikované mikro-prutové struktury typu BCC TPMS v rozmezí 10–30 % objemového podílu (viz Obr. 3-39). Vzorky struktury byly následně vyrobeny technologií SLM z titanové slitiny Ti₆Al₄V, podrobeny kvazistatickým tlakovým testům a porovnány s konvenční strukturou typu BCC.



Obr. 3-39 (a-c) konvenční mikro-prutová struktura typu BCC, (d-f) modifikovaná mikro-prutová struktura BCC TPMS [42]

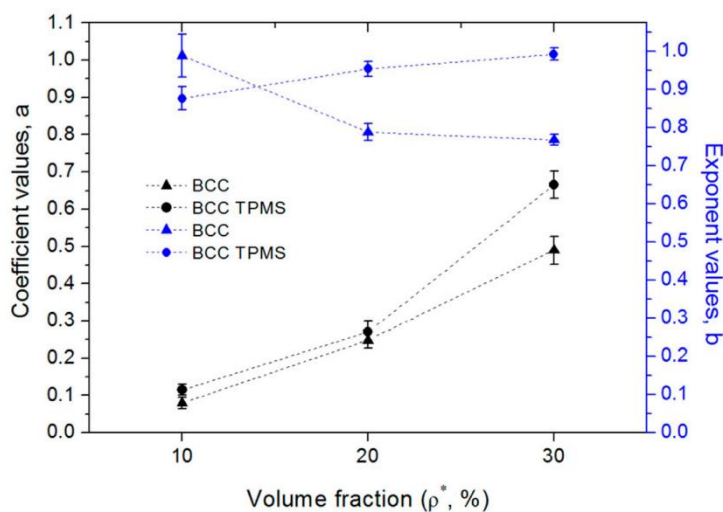
Výsledky

Tlakové testy strukturovaných vzorků, teoretické výpočty jednotlivých prutů a snímky z mikroskopu ukázaly, že vzorky BCC TPMS byly náchylnější na působení osově síly. To se projevilo křehkým lomem jejich prutů. Oproti tomu pruty konvenčních BCC vzorků jevíly známky poškození vlivem ohybového momentu, přičemž docházelo k poškození v uzlech tvárným lomem. Odlišný objem prutů obou struktur a rozložení napětí při jejich zatěžování způsobily změnu jejich mechanických vlastností. Tato změna se projevila navýšením modulu pružnosti o 18,9–42,2 %, meze kluzu o 19,2–29,5 % a meze pevnosti o 2–36,6 % u BCC TPMS vzorků. Vztah mezi mechanickými vlastnostmi a objemovým podílem byl vyjádřen teoretickým modelem *Gibson-Ashby*. Tento model by v budoucnu mohl být využit k predikci mechanických vlastností TPMS BCC struktur a jejich návrhu.

V průběhu studie byla také vyšetřována absorpce energie struktur, která byla stanovena numerickou integrací křivky napětí v závislosti na přetvoření do 50 % (podle ISO 13314:2011). Velikost pohlcené energie se měnila s objemovým podílem a geometrií struktur. Z testovaných dosáhla BCC TPMS struktura s objemovým podílem kolem 30 % největšího množství absorbované energie s výhodnějším průběhem absorpce. Za účelem hlubšího posouzení byly změny absorbované energie W_v při různých hodnotách poměrné deformace ε uvedeny do vztahu:

$$W_v = a\varepsilon^b \quad [J] \quad (2-8)$$

Kde se koeficient a vztahuje k počáteční schopnosti absorpce energie a exponent b reprezentuje zvyšující se rychlost kumulativní absorpce (viz Obr. 3-40). Hodnoty koeficientu a se zvětšovaly se zvyšujícími se hodnotami objemového podílu, přičemž celkově vyšších hodnot dosahovaly vzorky BCC TPMS. Tento jev byl odůvodněn vyšší odolností vzorků vůči deformaci (s vyšší hodnotou modulu pružnosti), což značilo také vyšší hodnotu pohlcené energie v počátku zatěžování. U exponentu b byl pro vyšší hodnoty objemového podílu zaznamenán pokles u BCC TPMS vzorků. Tento pokles byl přisuzován rychlému sesuvu vzorků podél skluzových rovin (45°) a nízkým hodnotám napětí v elasticko-plastickém přechodu, který způsobil snížení kapacity absorbované energie. Výsledek jasně ukázal, že modifikace geometrie vzorků BCC struktury může zvýšit absorpci energie.



Obr. 3-40 Hodnoty koeficientu (a) a exponentu (b) stanovené z křivek absorbované energie (tři opakování, střední hodnoty a odchylky) [42]

Závěr

Modifikovaná geometrie BCC TPMS struktur ukázala kvalitativní hodnoty v porovnání s jejich konvenčním vytvářením. Nicméně práce zahrnovala pouze struktury s rovnoměrně rozloženou úpravou, konstantní v celém vzorku. Za účelem hlubšího posouzení absorpčních schopností těchto struktur by mohlo být rozložení modifikované geometrie nepravidelné (např. zvyšující se objemový podíl mikro-prutové struktury v průřezu vzorku). Mimo to by mělo být posouzeno únavové zatěžování struktur, neboť to je jedním z důležitých kritérií pro výběr struktur v inženýrských aplikacích.

Základní algoritmus pro vytvoření matematicky definované struktury byl dán funkcí, která popisovala povrch struktury. Tato funkce byla vyjádřena rovnicí:

$$\begin{aligned}
 F(x, y, z) = & \cos(2k_x x) + \cos(2k_y y) + \cos(2k_z z) & (2-9) \\
 & - 2(\cos(k_x x) \cos(k_y y) \\
 & + \cos(k_y y) \cos(k_z z) + \cos(k_z z) \cos(k_x x)) + t = 0'
 \end{aligned}$$

kde t byl parametr odsazení povrchu a k_i ($i = x, y, z$) periodicky proměnné hodnoty, pomocí kterých byla kontrolována velikost základové buňky ve směrech x , y a z . Řízení velikosti bylo zapsáno jako:

$$k_i = 2\pi \frac{n_i}{L_i} \quad (i = x, y, z) \quad (2-10)$$

kde n_i byl počet základových buněk ve směrech x , y a z ; L_i absolutní velikost; n_i velikost ve směrech x , y a z ; a rozsah x , y a z ohraničující rozměry celé struktury. Objemový podíl modifikované BCC struktury bylo možné měnit pomocí parametru t . Závislost parametru t na objemovém podílu byla vyjádřena polynomem pátého řádu.

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

Následující kapitola popisuje analýzu poznatků získaných na základě studia dosavadních publikací z oblasti nelineárních strukturálních MKP simulací, které uvažují zatěžování mikro-prutových struktur vyrobených aditivními technologiemi. Klíčové závěry analýzy rešeršní studie jsou shrnuty v bodech na konci kapitoly.

4.1 Schopnost struktur absorbovat mechanickou energii

Z rešeršní studie provedené v minulé kapitole vyplývá, že využitím nelineárních MKP simulací pro predikci deformačního chování mikro-prutových struktur může dojít ke zvýšení efektivity návrhu strukturovaného materiálu s potenciálem absorpce energie [7]. Pomocí validovaných výpočetních modelů mohou být testovány jednotlivé varianty návrhů se změnou materiálu, geometrie nebo zatěžujících podmínek bez nutnosti jejich výroby. Na základě výstupních dat softwaru mohou být vytvořeny závislosti vykazující nejvýhodnější konfigurace [42]. To značí zpravidla struktury s nejvyšším podílem absorbované energie v poměru k jejich hmotnosti [14] (absorpční kapacita). Tato vlastnost však není jediným určujícím parametrem pro výběr dané konfigurace. K dalším klíčovými vlastnostem patří také charakter průběhu absorpce nebo délka jejího trvání. Upřednostňovaným typem je rovnoměrná absorpce energie za působení přibližně konstantního napětí při progresivním kolapsu struktury [8, 13]. Takový typ průběhu by měl zároveň omezit extrémní nárůst napětí (pík) před nástupem prvních plastických deformací struktury [1, 4, 65].

Dalším důležitým faktorem je stabilní průběh absorpce [64]. Křehké materiály s nízkou tažností nejsou pro tento účel zcela vhodné [42]. U mikro-prutových struktur dochází při jejich zatěžování ke vzniku kombinovaného namáhání prutů [66]. Když při tomto typu namáhání dojde k překročení meze kluzu, vznikají mezi uzly a pruty struktury trhliny, které vedou ke kolapsu struktury převážně podél skluzových rovin. Potenciál struktury tak není zcela využit. Z tohoto důvodu je vhodné předcházet tomuto jevu použitím houževnatého materiálu (např. nerezová ocel 316L) [57].

Absorpci energie ovlivňuje zásadním způsobem také geometrie základních buněk struktury [40]. Pokud mají tyto buňky příliš velkou tuhost (zpravidla buňky s pruty, které mají osu ve směru zatěžování) dochází při počátku jejich zatěžování ke skokovému nárůstu působící síly. Síla roste, dokud nedojde k plastickému porušení struktury. Následuje prudký pokles síly, zpravidla spojený s kolapsem řady buněk, a proces se může opakovat [41] (pokud nedojde ke kolapsu struktury podél skluzových rovin). Z tohoto důvodu je výhodné využít buňky struktur s nižší tuhostí a ty dále modifikovat pro zvýšení efektivity absorpce. Příkladem takové struktury je základní mikro-prutová struktura typu BCC, kterou se již pro tyto účely podařilo částečně upravit [18]. Využitím modifikované struktury lze, kromě zvýšení kapacity absorbované energie, dosáhnout stabilního průběhu kolapsu s monotónně rostoucím napětím [64].

4.2 Modely materiálu

Nastavení modelu materiálu je klíčové z hlediska toho, jak se materiál při mechanickém zatěžování chová. Jedná se o matematický popis, který rozhoduje o odezvě materiálu při působení mechanických vzruchů. Jeho stanovením pro účely nelineárního zatěžování základového materiálu mikro-prutových struktur vyrobených aditivními technologiemi se zabývala celá řada výzkumných týmů [7, 13, 18, 23].

Pro vytvoření modelu materiálu mikro-prutových struktur vyrobených technologií SLM [10] je možné využít kvazistatickou tahovou zkoušku tenkých dlouhých prutů (nominální průměr prutů odpovídající průměrům prutů struktury) [37]. Výsledky testu je třeba dále doplnit o kvazistatickou tlakovou zkoušku kostek mikro-prutových struktur, neboť pro využití získaných materiálových konstant jako vstupu do modelu materiálu v simulaci je třeba provést korekce. Hodnoty je třeba upravit v závislosti na výsledcích simulace tlakové zkoušky mikro-prutových struktur [54]. V simulaci jsou materiálové konstanty měněny, dokud není dosaženo shody výsledného průběhu deformační křivky struktury s experimentem. Tento postup je tedy limitující z hlediska přesnosti měření materiálových vlastností, které musí být dále upravovány.

Jiný přístup pracuje se stanovením modelu materiálu na základě tahových zkoušek konvenčních těles [54]. Model geometrie struktury je tvořen pruty o nominálním průměru, který vychází z CAD návrhu. Následně je úloha přepočítávána a průměr prutů parametricky měněn, dokud není dosaženo shody mezi experimentální a výpočtovou křivkou napětí v závislosti na přetvoření. Konce prutů jsou modelovány se zvětšenými průměry [30] ke kompenzaci dotyku v uzlových bodech. Tento přístup však plně nereflektuje skutečné rozměry prutů struktury a vlastnosti tenkých prutových těles.

Další přístup uvažuje rovněž stanovení vlastností na základě tenkých prutových těles [24]. Z důvodu obtížného měření přesného prodloužení prutů při tahovém namáhání je třeba využít dvojí měření. První měření počítá s odečtem prodloužení přímo z posuvu hlavice testovacího stroje. Tento postup však neuvažuje prokluz malých vzorků kruhového průřezu v čelistech. Druhý typ měření spočívá v pořízení snímků s vysokým rozlišením zachycujících prodloužení testovaného vzorku nezávisle na prokluzu vzorku v čelistech. Tento způsob měření je poté použit ke korekci dat naměřených podle první varianty.

Další způsoby nabízí provádění tahových zkoušek pomocí těles zahrnujících větší množství prutů spojených do jediného vzorku [16, 22, 45]. Podle autorů konfigurace multi-prutových vzorků lépe reflektuje chování odpovídající zatěžování celé struktury, kdy se na přenosu zatížení podílí celá řada prutů. Poslední dvě metody se jeví jako dostatečně efektivní a vypovídající pro stanovení vlastností mikro-prutových struktur.

Mimo dosavadně zmíněné přístupy, které využívají mechanické zkoušky ke stanovení bilineárního elasticko-plastického modelu materiálu (*J2-plasticity* modelu), uvádí literatura i formulaci komplexních modelů. Na základě tahových zkoušek s využitím dodatečné kalibrace je možné sestavit po částech lineární křivku s izotropním zpevněním [7]. Tento model umožňuje lépe postihnout vývoj napětí v závislosti na přetvoření složité geometrie. Efekt možné anizotropie, rychlosti zatěžování, kinematického zpevnění a martenzitické fázové přeměny však model neuvažuje [23]. Model je také možné nahradit tzv. homogenním izotropním *Levy-von Mises* modelem, který uvažuje vliv deformačního zpevnění [15].

Zcela nejpokročilejším modelem materiálu reflektujícím zatěžování mikro-prutové struktury je model označovaný jako porézně plastický *Gurson-Tvergaard-Needleman* (GTN, v prostředí Abaqus) [32]. Vstupní hodnoty tohoto modelu jsou získány na základě tlakové zkoušky struktur a rentgenové tomografie. Deformační proces struktury je zachycen in-situ a ex-situ tomografií zobrazující makroskopickou strukturální i lokální mikro-porozitu. Rekonstruované 3D snímky jsou následně použity pro tvorbu modelu geometrie struktury. Při tvorbě modelu materiálu je využito procedury umožňující přiřadit vlastností lokální porozity jednotlivým elementům na základě snímků z tomografie. Simulace využívající homogenní matici s průměrnou počáteční porozitou je porovnána s modelem s heterogenní distribucí porozity. Při nízkých hodnotách porozity vyrobených struktur však může mít použití tohoto modelu menší vliv na výsledné chování zatěžované struktury v simulaci.

Výše popsané modely materiálu je možné doplnit o další konstitutivní vztahy, které uvažují vliv dynamického zatěžování. Jeden z těchto vztahů je známý jako Cowper-Symonds [16], který reflektuje rychlost přetvoření na výsledné působící napětí (rov. 2-2). Vstupní hodnoty tohoto vztahu mohou být získány pomocí rychlé tahové zkoušky speciálních multi-prutových těles. K tomu slouží testovací zařízení označované jako Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) s modifikací pro provádění tahové zkoušky.

Dalším konstitutivním vztahem je vztah označovaný jako Johnson-Cook [67]. Tento model zahrnuje mimo vlivu rychlosti přetvoření také vliv teplotního změknutí materiálu a vliv velkých plastických přetvoření (deformačního zpevnění). Tento model je možné doplnit o odpovídající kritérium poškození založené na vzniku trhliny v materiálu při dosažení hodnoty kritického přetvoření. Základní tvar modelu je dán rovnicí:

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C\ln(\dot{\varepsilon}^*))(1 - (T^*)^m) \quad [MPa] \quad (4-1)$$

kde A , B , C , n a m představují experimentálně stanovené konstanty:

A	[MPa]	mez kluzu
B	[MPa]	modul zpevnění (<i>hardening modulus</i>)
C	[-]	koeficient citlivosti na rychlost deformace (<i>strain rate hardening coefficient</i>)
n	[-]	exponent zpevnění (<i>hardening coefficient</i>)
m	[-]	teplotní koeficient změknutí (<i>thermal softening coefficient</i>)
ε_p	[-]	přetvoření struktury
$\dot{\varepsilon}^*$	[s ⁻¹]	rychlosti přetvoření
T^*	[K]	zvýšení teploty

Jeho vstupní parametry je možné získat pomocí Taylorova testu [3, 27, 28, 68].

4.3 Modely geometrie

Za účelem lepšího porozumění vlastností mikro-prutových struktur během mechanického zatěžování byla vytvořena série MKP simulací pracujících s různou reprezentací geometrie struktur. Jeden z prvních popisů [43] využívá nosníkové elementy (založené na teorii Timoshenka s kvadratickou interpolační funkcí) vhodné pro simulaci rozsáhlejších strukturovaných útvarů. Model uvažuje využití velkých deformací, umožňuje ohyb, příčné smykové deformace a natahování prutů [30, 69, 70]. Simulace jsou výpočtově nenáročná, ale nosníková reprezentace prutů struktury není schopná poskytnout přesné výsledky vlivem několika zjednodušení. Z tohoto důvodu je třeba zavést korekci tuhosti v těsné blízkosti uzlových bodů implementací elementů s uměle navýšenou tuhostí v těchto oblastech [69]. Přinejmenším 4 elementy by měly být použity pro diskretizaci deformovatelné části každého prutu.

Za účelem detailní reprezentace topologie mikro-prutové struktury je výhodné vytvořit model geometrie využívající objemové elementy (čtyřstěny s kvadratickou interpolační funkcí). Tento model poskytuje detailní popis napětí v závislosti na přetvoření. Jeho nevýhodou jsou vysoké nároky na hardware a výpočetní časy.

Jiný přístup vytváření modelu geometrie využívá skript v softwaru Python 6.6.6. umožňující tvorbu geometrie [33] mikro-prutové struktury na bázi nosníkových elementů (B32) a objemových čtyřstěnných elementů (C3D10M). Skript rozděluje pruty struktury na ekvivalentně velké intervaly s různou velikostí průměru prutu (kruhový průřez). Jednotlivé průměry jsou prutům přiřazovány na základě kritéria pravděpodobnosti. Další přístup využívá konceptu modelování a zatěžování pouze jediného prutu struktury [45]. Je možné jej využít ke stanovení vlivu kloubového připojení prutů na tuhost mikro-prutové struktury (s nosníkovými nebo objemovými elementy). Podobné metody využívají i následující studie [47], které pracují s modely založenými na kombinaci obou typů elementů. Některé z nosníkových elementů (Timoshenkova reprezentace) ve středových buňkách zatěžované mikro-prutové struktury jsou vyměněny za objemové elementy typu C3D10M. Tím vzniká tzv. hybridní model poskytující detailní náhled na vývoj napětí ve struktuře při zachování nízkých výpočetních nároků.

Mimo výše zmíněné přístupy je možné využít i sofistikovanější typ implementace imperfekcí výroby pro přesnější reprezentaci geometrie. Jedna z metod využívá nástrojů optické digitalizace pro získání modelu mikro-prutové struktury se skutečným tvarem a plochou průřezu prutů [22]. Skutečný tvar průřezu naklopených prutů struktury ve studii se přibližuje eliptickému tvaru. Tato metoda uvažuje pouze konstantní hodnotu imperfekce bez změny průřezu prutu po jeho délce. Jiný přístup pocházející z téhož roku je založený využitím μ -CT k zachycení reálné informace o tvaru povrchu prutů struktur včetně imperfekcí [48]. Pro automatické generování 3D modelu s nosníkovými elementy B31 využívá Python skript. Skutečná distribuce imperfekcí je tím při generování modelu struktury brána v úvahu, oproti výše popsanému přístupu pracujícímu s náhodným přiřazováním velikostí průměru prutů jednotlivým intervalům [33]. Jiný podobný model [35] zachycuje vlnitost prutů měnící se podél jejich délky pomocí série eliptických průřezů prutů vytvořených na základě měření skenů z μ -CT. Takto je sestaven model geometrie včetně výrobních imperfekcí (v podobě eliptických variací).

Kvazistatické MKP simulace jsou vytvořeny za pomoci explicitního modulu ABAQUS6.14. Stejný modul včetně explicitního řešiče využívají i další autoři [23, 34, 50, 58] pro řešení úlohy kvazistatické tlakové zkoušky mikro-prutové struktury BCC uvažující velké deformace. Poměr uměle navýšené energie k energii vnitřní stejně tak, jako poměr kinetické energie k energii vnitřní nesmí přesáhnout hranici 5 %. Pomocí těchto kritérií je možné vytvořit úlohu se zanedbáním dynamických efektů. Tento postup umožňuje tvorbu simulací zatěžovaných struktur vedoucích až k jejich denzifikaci.

4.4 Stěžejní závěry plynoucí z rešerše

Na základě analýzy zásadních poznatků rešeršní studie nelineárního zatěžování mikro-prutových struktur byly vyvozeny následující klíčové závěry:

- Vstupní hodnoty modelu materiálu kvazistaticky zatěžovaných mikro-prutových struktur je obtížné definovat na základě tahové zkoušky těles sestávajících se z jediného prutu. Z hlediska lepší reprezentace a eliminace prokluzu vzorků je výhodnější využít kombinovaná multi-prutová tělesa s nominálním průměrem prutu odpovídajícím nominálnímu průměru prutů struktury.
- Model materiálu kvazistaticky zatěžované mikro-prutové struktury reprezentující nelineární chování materiálu je možné stanovit jako bilineární (elasticko-plastický), případně multi-lineární. Tímto způsobem lze dosáhnout dostatečně reprezentativního matematického popisu chování materiálu struktury při nelineárním zatěžování.
- Se zvyšujícími se rychlostmi zatěžování přesnost simulace klesá, neboť model materiálu stanovený pro kvazistatické zatěžování nepostihuje působení jevů spojených s dynamickým zatěžováním. Pro doplnění chování materiálu za zvýšených rychlostí je možné použít konstitutivní vztah známý jako Cowper-Symonds, jehož vstupní parametry mohou být získány pomocí rychlé tahové zkoušky (SHPB).
- Geometrie struktur tvořená pomocí nosníkových elementů by měla zahrnovat korekce tuhosti (případně průměrů) v blízkosti uzlů pro simulaci skutečného kontaktu prutů v této oblasti. Výsledky takto upravené simulace by potom měly být porovnány s ekvivalentní simulací s geometrií tvořenou objemovými elementy.
- Simulace kvazistatického zatěžování mikro-prutových struktur vyžadují velké deformace vzorků pro vyhodnocení absorbované energie. Tyto deformace umožňují simulovat moduly a řešiče pracující s explicitními algoritmy standardně využívané pro simulace dynamických dějů.
- Zahrnutím geometrických imperfekcí výrobního procesu do simulace může dojít ke zvýšení její přesnosti. Pro získání vstupních dat geometrických modifikací založených na skutečné geometrii je vhodné využít metod optické digitalizace nebo skenů μ -CT. Měřená data lze vyhodnotit pomocí automatizovaných skriptů a implementovat je do modelu geometrie jako konstantní nebo proměnnou odchylku.
- Pro účely absorpce mechanické energie je vhodné využít struktury a materiály jejichž deformační charakteristika kopíruje tvar ideální absorpční křivky (oblast elastické deformace – oblast rovnoměrných plastických deformací – oblast zhutnění materiálu). Využitím mikro-prutové struktury BCC (a její modifikací) vyrobené z nerezové oceli 316L je možné se k popsanému průběhu přiblížit.

5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

Podstatou disertační práce je sestavení výpočtového MKP modelu, který popisuje deformačního chování mikro-prutových struktur vyrobených technologií selective laser melting z nerezové oceli 316L. Dosavadní numerický popis umožňující predikovat vlastnosti struktur související s absorpcí mechanické energie při zatěžování v nelineární oblasti není kompletní a je tedy nutné se jím dále zabývat.

5.1 Zaměření disertační práce

Jedná se o výzkum, jehož součástí bude vytvoření nového nelineárního MKP modelu kvazistatického a dynamického zatěžování struktur určených pro absorpci mechanické energie. Model bude zahrnovat nelinearity trojího typu: materiálu, geometrie i okrajových podmínek (kontaktů). Pro zahrnutí materiálových nelinearit dojde vytvoření unikátního modelu materiálu stanoveného na základě testů tenkých prutových těles. V případě dynamického zatěžování by měl tento model reflektovat efekty spojené s rychlostí přetvoření ($\sim 5, 10$ a $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, C-S). Model geometrie bude obohacen o imperfekce výroby získané pomocí automatizovaného skriptu pro vyhodnocení dat z optické digitalizace nebo μ -CT analýzy vzorků. Za pomoci takto komplexního matematického popisu vlastností mikro-prutové struktury bude možné simulovat její chování s vysokou přesností pro různé geometrické konfigurace v širokém rozsahu zatěžujících podmínek. V důsledku by měla vzniknout predikční úloha umožňující provádět parametrické změny geometrie s možností pozorovat jejich dopad na absorpci energie.

5.2 Cíl disertační práce

Hlavním cílem práce je vytvoření numerického modelu pro predikci deformačního chování zatěžovaných mikro-prutových struktur vyrobených technologií selective laser melting z nerezové oceli 316L. Tento model by v sobě měl zahrnovat nelinearity vznikající při velkých deformacích, změny mechanických vlastností způsobené imperfekcemi výroby a poznatky o mechanismech poškození struktur. Dílčí cíle jsou:

- Definování a provedení testů kvazistatického a dynamického zatěžování pro získání vstupních dat modelu materiálu (do $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- Stanovení významu vlivů spojených s rychlostí zatěžování a jejich dopadu na absorpci energie a deformační chování mikro-prutové struktury

- Implementace konstitutivních vztahů zvažujících vlivy spojené s nelineární deformací modelu materiálu struktury
- Implementace signifikantních imperfekcí vzniklých v důsledku výroby do modelu geometrie struktury
- Sestavení výpočetní úlohy v prostředí modulu Explicit dynamics softwaru ANSYS Workbench
- Experimentální validování nelineární MKP úlohy

5.3 Vědecké otázky a pracovní hypotézy

V návaznosti na analýzu provedenou na základě rešeršní studie a stanovené cíle disertační práce byly formulovány následující vědecké otázky a pracovní hypotézy:

Vědecká otázka 1

„Jaké experimenty je třeba provést pro získání vhodných vstupních dat nelineárního modelu materiálu reprezentujícího chování mechanicky zatěžované mikro-prutové struktury vyrobené z nerezové oceli 316L technologií SLM?“

Pracovní hypotéza 1

„Na základě topologického uspořádání mikro-prutových struktur a jejich experimentálně stanoveného deformačního chování lze předpokládat, že provedením tahové zkoušky vzorků obsahujících sérii tenkých prutů mohou být získána korektní data vhodného elasticko-plastického (bilineárního nebo multilineárního) modelu materiálu.“

Odůvodnění pracovní hypotézy 1

Při stanovování nelineárního modelu materiálu v minulosti bylo zjištěno, že konvenční tahové vzorky nejsou schopné plně reflektovat deformační vlastnosti mikro-prutové struktury [33, 37]. Detailní analýzy vzorků odhalily rozdíly mezi porozitou podpovrchové vrstvy a vnitřní objemové části těles [14]. Tyto rozdíly se projevíly změnou mechanických vlastností, konkrétně oslabením podpovrchové části s vyšším podílem porozity. V případě konvenčních tahových těles je podíl podpovrchové vrstvy k vnitřnímu objemu zanedbatelný, a tím pádem oslabení mechanických vlastností není natolik znatelné. Zcela odlišná situace nastává v případě mikro-prutových struktur, kde je poměr podpovrchové oblasti k vnitřní objemové mnohem větší a oslabení mechanických vlastností je proto signifikantní. Vlastnosti odpovídající mikro-prutovým strukturám by proto měly být získány na základě testů těles s odpovídající geometrií [16, 45].

Vědecká otázka 2

„Jaké konstitutivní vztahy je třeba použít pro dosažení přesného matematického popisu deformačního chování mikro-prutové struktury vyrobené z houževnatého materiálu technologií SLM při nízko-rychlostním dynamickém zatěžování tlakem?“

Pracovní hypotéza 2

„Sledování vlastností nerezové oceli 316L při dynamickém tlakovém zatěžování ukázalo nárůst napětí v porovnání s kvazistatickým zatěžováním, a to i při relativně nízkých testovacích rychlostech. Podobný efekt je očekáván i v případě mikro-prutových struktur za předpokladu použití stejného základového materiálu.“

Odůvodnění pracovní hypotézy 2

Chování mikro-prutových struktur při dynamickém zatěžování je poměrně komplexní a odlišuje se od chování základového materiálu [64]. Při vyšších rychlostech se začínají projevovat efekty velkých deformací, mikro-setrvačnosti, dynamického zpevnění apod. [11, 14, 61] Nejvíce chování struktury ovlivňuje citlivost základového materiálu na rychlost poměrné deformace. Tu je možné popsat například pomocí Cowper-Symondsova [16] konstitutivního vztahu. Vstupní hodnoty tohoto vztahu je možné získat rychlou tahovou zkouškou prutových těles (SHPB). Jeho výhodou je poměrně jednoduché definování, na druhou stranu zohledňuje pouze působení jednoho dynamického efektu. Pro zohlednění ostatních vlivů je možné použít kombinaci podobných vztahů, nebo je nahradit složitějším, jako je například Johnson-Cookův [19] konstitutivní vztah uvažující navíc velké deformace a vliv teplotních změn.

Vědecká otázka 3

„Jak ovlivňují geometrické imperfekce tvaru a velikosti průřezu prutů mechanickou odezvu tlakově zatěžovaných mikro-prutových struktur vyrobených z nerezové oceli 316L?“

Pracovní hypotéza 3

„Mikro-prutové struktury vyrobené technologií SLM vykazují známky anizotropního chování vlivem nestejných geometrických imperfekcí vznikajících na prutech během výroby. Dle očekávání způsobují fenomény spojené především se změnou nosného průřezu prutu změnu výsledných mechanických. Tyto imperfekce se prozatím nepodařilo minimalizovat natolik, aby změna mechanických vlastností vyvolaná jejich výskytem mohla být považována za zanedbatelnou.“

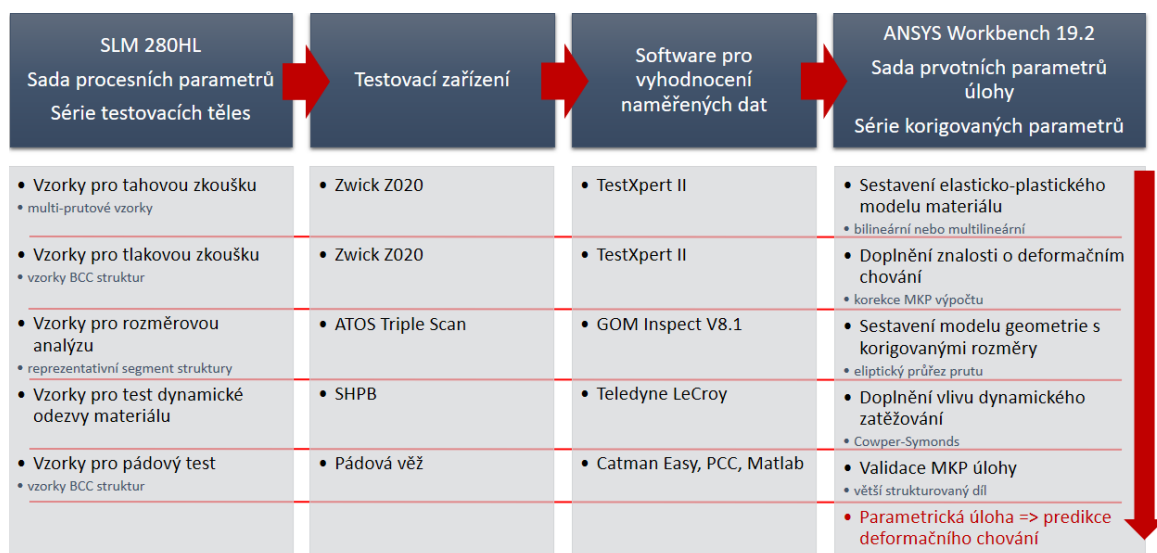
Odůvodnění pracovní hypotézy 3

Při důkladné inspekci mikro-prutových struktur po výrobě je možné pozorovat imperfekce několika typů. Jedná se především o vlnitost prutů [35], změnu tvaru jejich průřezu a průměru [14] nebo vnitřní porozitu [32]. Pro každý materiál, typ struktury a sadu procesních parametrů je výskyt těchto imperfekcí odlišný. Největší vliv na mechanické vlastnosti by mělo mít společné působení faktorů spojených se změnou průměru a průřezu prutu [22]. Vlivem přestupu tepla do okolního prostředí ve výrobním procesu SLM dochází k částečnému natavení zrn surového stavebního materiálu na stěny prutů. Převážná část tohoto materiálu ulpívá na spodní straně prutů [71]. To způsobí změnu (velmi často nárůst) průřezu ve vertikálním směru, který zpravidla bývá také směrem zatěžování struktury. Změna vlastností při zatěžování v tomto směru nabývá vysokého významu, a proto je třeba ji zahrnout v numerické simulaci.

5.4 Způsob řešení a použité metody zkoumání

V následující kapitole jsou popsány zařízení a metody, které budou použity pro sestavení nelineárního výpočtového MKP modelu zatěžované mikro-prutové struktury se zahrnutím dynamických efektů (např. rychlost poměrné deformace). V prvních krocích budou provedeny tahové zkoušky multi-prutových těles pro stanovení modelu materiálu při kvazistatickém zatěžování (viz Obr. 5-1). Poté bude provedena tlaková zkouška struktur sloužící ke kalibraci numerického modelu. Toto porovnání bude mimo jiné sloužit k posouzení míry nutnosti zavedení imperfekcí výroby. Dále bude určena skutečná topologie mikro-prutových struktur pomocí rozměrové analýzy s cílem zahrnutí imperfekcí do modelu geometrie. Následně bude provedena dynamická zkouška pro stanovení vstupních hodnot konstitutivního vztahu při dynamickém zatěžování. Nakonec proběhne pádová zkouška struktur pro verifikaci výpočtového modelu.

Ověřená simulace může být následně použita při parametrické studii za účelem nalezení výhodných konfigurací mikro-prutové struktury pro absorpci energie. Ideální konfigurace by měla disipovat velké množství energie rovnoměrně v čase bez skokových poklesů napětí při zachování nízké hodnoty objemového podílu. Poznatky týkající se prvotního definování a nastavení nelineárních úloh vychází z řešeršní studie provedené v kapitole 3. Metodika popsaná na schématu níže vychází do jisté míry z know-how Odboru reverzního inženýrství a aditivních technologií Ústavu konstruování.



Obr. 5-1 Schematický postup použitých metod výzkumu

5.4.1 Výroba a testování vzorků

Vstupní parametry pro sestavení nelineární MKP simulace budou získány z kvazistatických i dynamických mechanických testů. Pro tyto účely bude vyrobeno několik sérií testovacích těles. Všechny vzorky budou vyrobeny za pomoci zařízení SLM 280^{HL}, které pracuje na bázi technologie selective laser melting (SLM Solutions GmbH, Lübeck, Germany). Zařízení je vybaveno ytterbiovým vláknovým laserem, který má maximální výkon 400 W s Gaussovou distribucí energie v ohnisku o průměru 82 μm. Procesní parametry pro výrobu vzorků z nerezové oceli SS316L budou stanoveny na základě dat poskytnutých společností SLM Solutions, případně studie Gümürka a kolektivu [16].

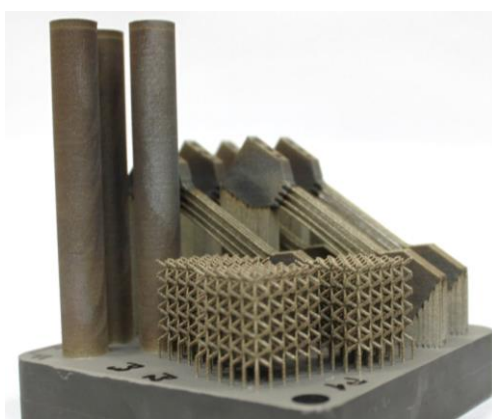
Testovaná struktura

Předmětem testování se stane mikro-prutová struktura typu BCC, která je jednou ze základních struktur používaných při výrobě technologií SLM [5, 9, 40, 72] (případně její modifikace popsané v kapitole SHRNUŤÍ současného stavu poznání). Základní geometrie se skládá z 8 prutů protínajících se v jejím středu (viz Obr. 2-3). Tyto pruty svým uspořádáním odpovídají tělesovým úhlopříčkám v krychli. Díky této geometrii dochází k téměř izotropnímu chování struktury při jejím zatěžování v různých směrech. Osy prutů svírají s platformou úhel přibližně 35,26°, což umožňuje výrobu prutů struktury BCC bez využití podpůrného materiálu (v omezeném rozsahu délky).

Příprava dat pro výrobu

Data pro výrobu testovacích těles budou připravena v softwaru *Magics* od společnosti *Materialise*. Zde budou vzorkům přiděleny procesní parametry pro materiál SS316L. Série parametrů bude zahrnovat údaje o tloušťce nanášené vrstvy, *hatch distance*, skenovací rychlosti, výkonu laseru, skenovací strategii apod..

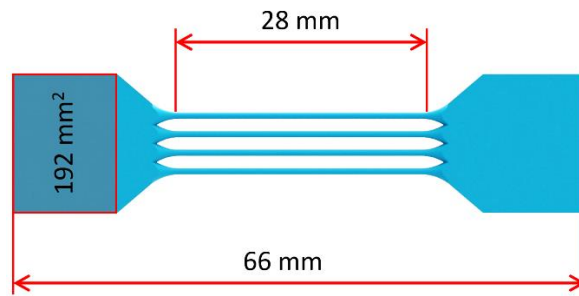
V průběhu výrobních sérií budou vyrobeny (pokud možno v průběhu jediné stavby) vzorky pro tlakovou i tahovou zkoušku (viz Obr. 5-2), rozměrovou analýzu i dynamickou zkoušku na Hopkinsonově zařízení. Všechna tělesa budou vyrobena se stejnými procesními parametry. To zaručí rovnocenné podmínky při mechanickém testování a porovnatelné odchylky při analýze jejich geometrie. Získané mechanické vlastnosti i údaje o geometrii vstupující do simulace tak budou ekvivalentní v celé sérii. Díky tomu bude možné korektním způsobem porovnat MKP výpočet s experimentálně provedeným tlakovým testem.



Obr. 5-2 Ilustrační foto konvenčních a multi-prutových vzorků pro tahovou zkoušku a struktur pro tlakovou zkoušku (SS316L)

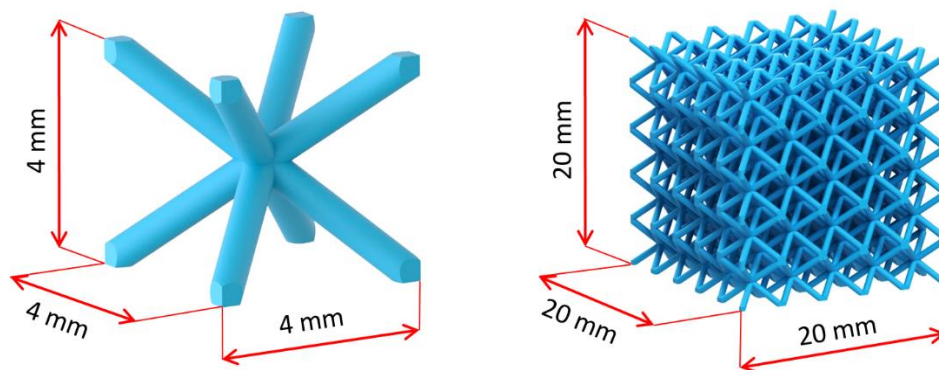
Vzorky

Vzorky pro tahovou zkoušku (prutové) – budou tvořeny z 12 rovnoběžných prutů o délce 28 mm (pro uchycení čelistí dotykového extenzometru) v uspořádání 3 x 4 pruty (viz Obr. 5-3) [9]. Při výrobě tenkých prutů mohou v tělesech vznikat vlivem procesních parametrů lokální defekty s velkou porozitou. Tento jev může způsobit lokální oslabení prutu při jeho zatěžování. Tahový vzorek s větším množstvím prutů vliv tohoto jevu výrazně redukuje, a navíc lépe reflektuje situaci při zatěžování struktury, kdy se na přenosu působících sil podílí větší množství prutů [16, 45].



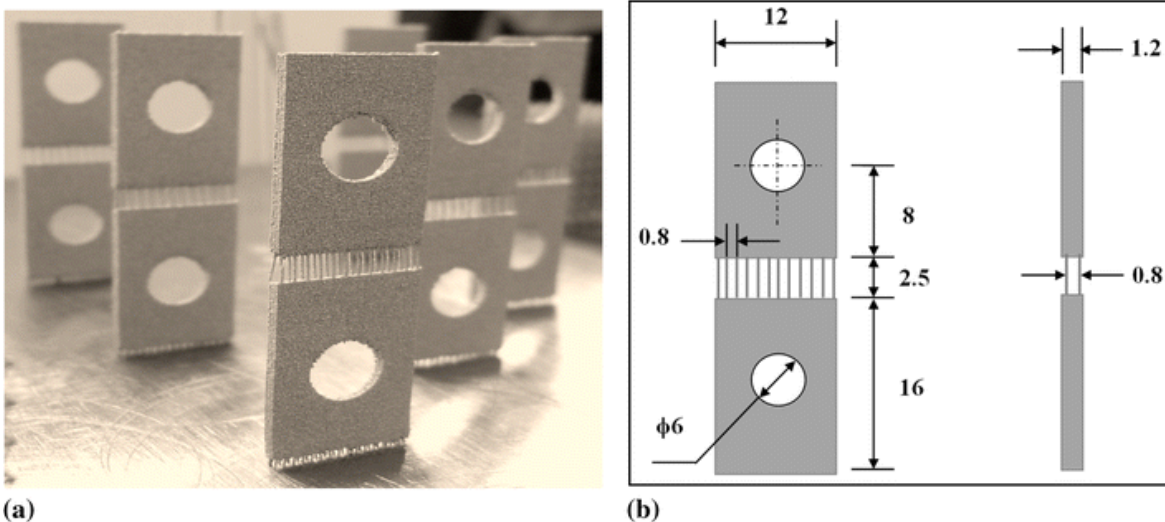
Obr. 5-3 Kombinované prutové těleso pro tahovou zkoušku

Vzorky pro tlakovou zkoušku – budou vyrobeny jako volná struktura bez zahrnutí okrajových plátů plného materiálu (viz Obr. 5-4 (vpravo)) [14, 27, 73]. Při tlakovém zatížení budou výsledné vlastnosti a charakteristiky přičítány pouze struktuře bez ovlivnění dalšími tělesy. Rozměry základních vzorků budou kupříkladu 20 x 20 x 20 mm s délkou strany základní buňky 4 mm (viz Obr. 5-4 (vlevo)). Díky ekvivalentní šířce a výšce bude možné během tlakové zkoušky pozorovat případný výskyt skluzových rovin na diagonále vzorku [74].



Obr. 5-4 Rozměry základní buňky BCC (vlevo), rozměry strukturovaného vzorku (vpravo)

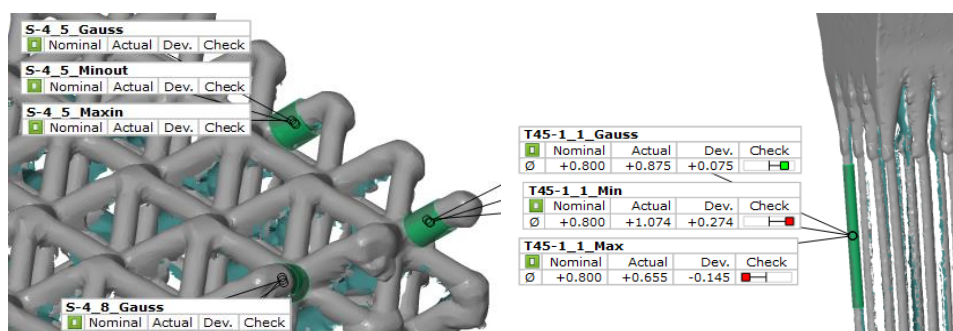
Vzorky pro dynamický SHPB test – budou vyrobeny pro testování na modifikovaném Hopkinsonově zařízení, tak aby odpovídaly těm, které ve své práci použil **Gümrük** a kolektiv (2018) [16] (viz Obr. 5-5). Nominální průměry jejich prutů budou odpovídat průměrům prutů těles použitých pro kvazistatickou tahovou zkoušku. K získání vypovídajících vstupních hodnot C-S konstitutivního vztahu je předpokládáno testování za rychlosti 5, 10 a 20 m·s⁻¹. Pro provedení testu je předpokládáno využití zařízení společnosti SVS FEM v Brně.



Obr. 5-5 a) fotografie vzorků pro test na modifikovaném Hopkinsonově zařízení, b) jejich CAD předloha s rozměry [16]

5.4.2 Model geometrie

Pro získání reálných rozměrů vzorků budou po výrobě některá z těles digitalizována skenerem ATOS Triple Scan (GOM GmbH, Braunschweig, Germany) [71, 75] s optickými čočkami MV170 kalibrovanými podle VDI/VDE 2634 normy. Před skenováním budou všechny vzorky pokryty vrstvou antireflexního oxidu titaničitého (přibližně 3 μm). Výsledná data v podobě 3D skenů skutečných rozměrů vzorků budou vyhodnocena softwarem GOM Inspect [76–79], profesionálním softwarem pro analyzování 3D skenů (SR1, GOM GmbH, Braunschweig, Germany) [76, 77]. Vzorky struktur pro tlakovou zkoušku (viz Obr. 5-6 (vlevo)) budou skenovány pro účely korekce modelu geometrie v nelineární MKP úloze. Tahová tělíska (viz Obr. 5-6 (vpravo)) budou skenována pro účely vyhodnocení mechanických vlastností s následným sestavením elasticko-plastického modelu materiálu.



Obr. 5-6 Ilustrační příklad výběru oblasti prutu k inspekci – na struktuře (vlevo), na tahovém vzorku (vpravo)

Na základě dat skenovaných struktur budou automatizovaným skriptem provedeny řezy jednotlivých prutů. Tyto řezy budou v softwaru prokládány jednoduchými geometrickými tvary (kružnice nebo elipsa), které budou sloužit k aproximaci skutečného tvaru prutů struktury [22, 35]. Statistickým vyhodnocením budou stanoveny průměrné hodnoty zjednodušených průřezů reprezentujících skutečnou geometrii. Tato zjednodušená reprezentace bude poté přenesena do MKP softwaru, kde bude tvořit geometrii prutů struktury s konstantními nebo plynule proměnnými průřezy.

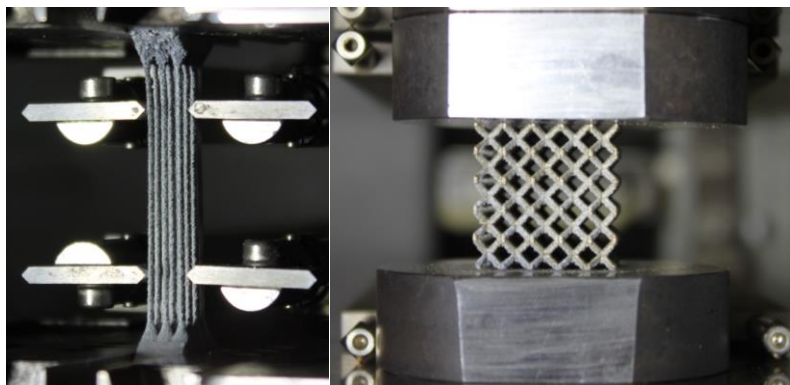
V případě nedostatečné reprezentace budou pro účely stejného vyhodnocení využity data získaná skenováním na μ -CT [34, 35]. Takto získaná data budou podávat komplexní informaci o geometrii všech prutů struktury včetně jejich vnitřní porozity.

5.4.3 Mechanické testování

Pro predikci chování mikro-prutové struktury při jejím zatěžování uvažujícím elastickou nebo plastickou deformaci je nutné znát mechanické vlastnosti základového materiálu. Ty jsou reprezentovány materiálovými konstantami a lze je stanovit pomocí mechanických testů. Pomocí získaných konstant je možné sestavit model materiálu, který je následně implementován do MKP softwaru.

Kvazistatické testování

Po optické digitalizaci budou provedeny mechanické testy. Na základě jednoosé tahové a tlakové zkoušky na zařízení Zwick Z250 (maximální síla 250 kN) budou získány materiálové konstanty. Pro tahovou zkoušku půjde zejména o modul pružnosti, tečný modul, mez kluzu a prodloužení prutů do poškození. Výstupem tlakové zkoušky by měly být údaje o deformačním chování struktur. Oba testy budou provedeny (viz Obr. 5-7) se zatěžováním rychlostí odpovídající přibližně 10^{-3} s^{-1} (s minimalizací vlivu rychlosti přetvoření). Deformace vzorků bude odečítána z údajů kontaktního extenzometru.



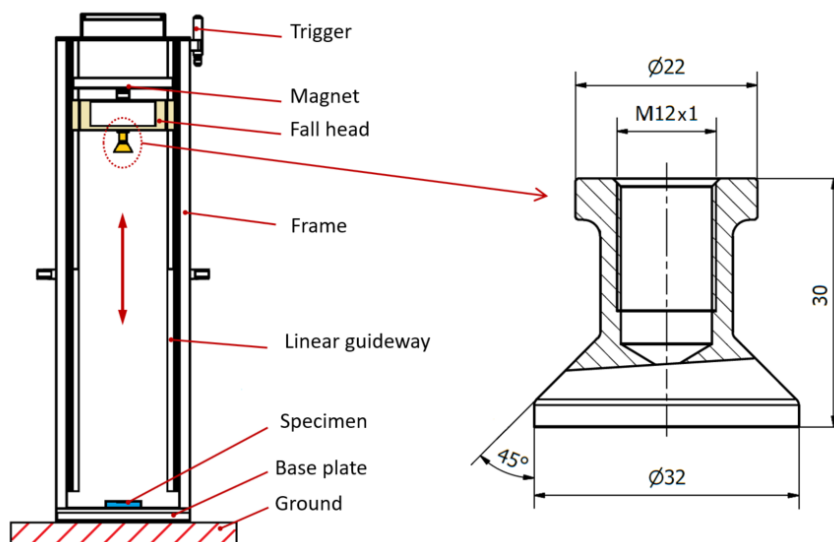
Obr. 5-7 Uchycení vzorků ve stroji Zwick – tahová zkouška (vlevo), tlaková zkouška (vpravo)

Dynamické testování

Test pro stanovení materiálových konstant dynamického zatěžování bude proveden na Hopkinsonově zařízení. Hlavní částí zařízení jsou vysoko-pevnostní měrné tyče, mezi nimiž je vložen vzorek [16, 61] (viz Obr. 3-25). Na jednu z tyčí udeří razník, čímž vyvolá v soustavě napěťový pulz. Tento pulz se šíří tyčí rychlostí zvuku až na rozhraní tyče a vzorku. Na rozhraní je část tlakové vlny odražena, část pohlcena do vzorku a část prochází do druhé tyče. Deformace jsou měřeny pomocí kapacitních, případně tenzometrických snímačů na tyčích. Na vzorku přenášejícím a absorbujícím tlakovou vlnu se měří deformace při tlakovém zatěžování. Výsledkem jsou hodnoty poměrné deformace, rychlosti poměrné deformace a napětí ve vzorku při dynamickém zatížení.

Pádový test bude proveden v laboratořích na Ústavu konstruování na pádovém zařízení Impactor 2.1 [41, 80] (viz Obr. 5-8). Zařízení pracuje na principu volného pádu hlavičky s nastavitelnou zátěží (maximální hmotností 12,25 kg a výškou pádu 1 m). Na hlavičce je umístěn indentor, který má ploché zakončení o průměru 32 mm. Během testu indentor deformuje vzorek, přičemž dochází k absorpci kinetické energie závaží.

Zařízení dosahuje maximální reálné rychlosti pádu $3,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a tím se řadí do skupiny nízkorychlostních testovacích zařízení [80, 81]. Tato rychlost je srovnatelná s testovacími rychlostmi používanými při vývoji ochranných prvků do sedadel bojových vozidel společnosti BOGE. Naměřená data pádového testu budou vyhodnocena v softwaru MATLAB. Ten kombinuje data získaná z tenzometru umístěného za indentorem na hlavičce s daty z vysokorychlostní kamery, která snímá pohyb hlavičky.

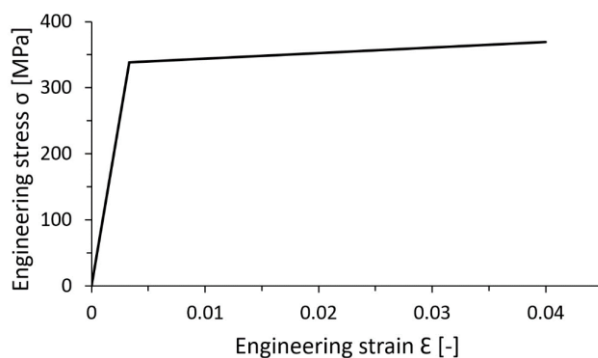


Obr. 5-8 Schematický náčrt pádového testeru včetně detailu deformačního členu [82]

Současně s prováděnými testy bude definována kalibrační MKP úloha dynamického zatěžování struktury v prostředí ANSYS. Použité okrajové podmínky budou vycházet z reálných podmínek při pádovém testu.

5.4.4 Model materiálu

K popisu modelu materiálu definujícího lineární oblast (*Isotropic Elasticity*) bude využit stejný přístup, který použil **Mohammed** [5] ve své práci. K modelu bude přidána část popisující chování materiálu po překročení meze kluzu. Na základě předcházejících výzkumů **Labease** [12] a **Vrány** [22] bude vybrán model *Bilinear Isotropic Hardening* (viz Obr. 5-9, případně *multilinear isotropic hardening* [7]). Na rozdíl od studie **Gryttena** [28] nebude model doplněn o kritérium poškození (*Plastic Strain Failure*), protože využitý materiál (SS 316L) je houževnatý, a ani při výraznějších deformacích nejeví známky makroskopických trhlin [13, 23]. Následně bude přidán Cowper-Symondsův konstitutivní vztah zvažující efekt rychlosti poměrné deformace struktury, kterou pro mikro-prutové struktury popsali **Ahmad** [83] a **Gümrük** [16]. Všechny hodnoty potřebné pro sestavení kvazistatického a dynamického modelu materiálu nerezové oceli 316L budou stanoveny na základě mechanických testů multi-prutových těles.



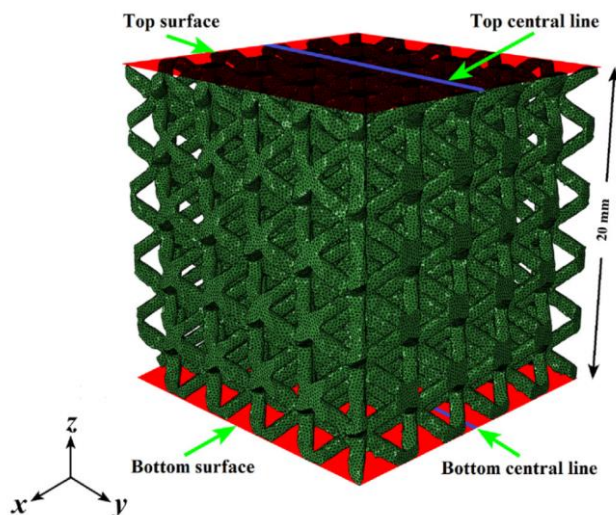
Obr. 5-9 Graf elasticko-plastického modelu materiálu SS316L

5.4.5 Výpočtové přístupy

Nelineární simulace deformačního děje bude vytvořena v modulu softwaru ANSYS Workbench s názvem *Explicit Dynamics* [42, 58]. V tomto modulu bude vytvořeno několik sérií úloh s různou konfigurací nastavení a použité geometrie. Úlohy budou umožňovat posouzení deformačních vlastností struktur včetně detailního popisu vývoje napětí během jejich deformace a absorpce energie. Výsledky simulací by měly být porovnatelné s experimenty.

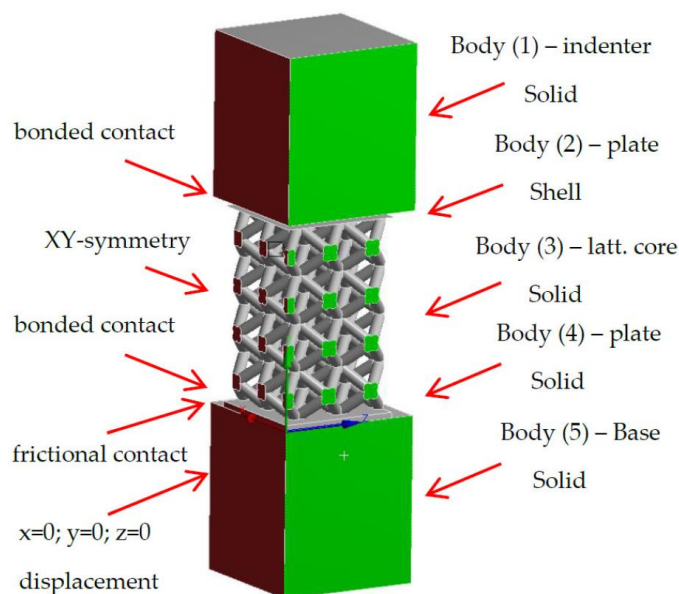
Za účelem dosažení výše popsaných výsledků budou modely vytvořeny pomocí dvou různých přístupů. První z nich tvořený pomocí objemových elementů (SOLID 187, čtyřstěn s kvadratickou bázovou funkcí) bude sloužit k detailnímu posouzení vývoje napětí na jednotlivých prutech a přechodech mezi pruty a uzly. Model bude uvažován jako referenční a bude použit pro simulaci zatěžování menších strukturovaných celků. Druhý model tvořený nosníkovými elementy (BEAM 189, Timoshenkova prutová teorie) bude sloužit k vytvoření rozsáhlejších parametrických studií sloužících ke sledování vývoje absorpce energie odlišných konfigurací struktur. U tohoto modelu dojde k modifikaci tuhosti elementů v blízkém okolí uzlů pro simulování reálného styku prutů [30]. Zvláštní pozornost bude věnována polygonální síti, protože kvalita a velikost elementů polygonální sítě mají významný vliv na validitu výsledků simulace. Oba modely budou podrobeny citlivosti studii pro stanovení vhodného počtu elementů rozdělujících pruty struktury.

Další nastavení simulace budou souviset s geometrií úlohy a vztahu strukturovaného vzorku vůči deformačnímu členu. Podobně jako v práci **Liua** [84] a **Amaniho** [32] budou i zde deformační člen a statická opora vytvořeny jako skořepinové desky (SHELL 93, uvažující plošné zatížení) v těsné blízkosti struktury (viz Obr. 5-10). Dojde tím ke zkrácení výpočetních časů a eliminaci nepřesností vzniklých při průchodu deformačního členu volným prostorem. Vzhledem k výpočetní náročnosti úlohy bude pravděpodobně zaveden model osově symetrické úlohy (viz Obr. 5-11) [22] – plochám řezů těles budou při zavedení symetrie automaticky odebrány některé stupně volností tak, že jejich pohyb v osách symetrie bude omezen.



Obr. 5-10 Okrajové podmínky mikro-prutové struktury BCC [32]

Následně budou na rozhraních deformační člen-struktura a struktura-statická opora definovány třecí kontakty (*Frictional*). Pro statický i dynamický koeficient tření budou zvažovány tabulkové hodnoty pro kontakt ocel-ocel (hladký suchý odmaštěný povrch – statický 0,15-0,2 a dynamický 0,1). V dalších krocích budou definovány okrajové podmínky, zatěžovací rychlosti a další nastavení výpočtu. Kvazistatické úlohy budou odeslány k vyřešení do řešiče Mechanical APDL a dynamické úlohy do řešiče AUTODYN (pro modul *Explicit Dynamics*).



Obr. 5-11 Osově symetrický model dynamicky zatěžované struktury [22]

Po kalibraci modelu budou vytvořeny další série úloh s různým nastavením. Tentokrát dojde ke změně vždy jen jednoho parametru v sérii (např.: průměr prutu), aby bylo možné posoudit, jak signifikantní změnu parametr vyvolá. Na základě vyhodnocení parametrických úloh budou získávány deformační charakteristiky struktur.

5.4.6 Verifikace výpočtového modelu

V prvním kroku bude funkčnost výpočtových MKP úloh ověřována přímo porovnáváním výsledků sledovaných veličin s experimentem tlakového zatěžování vzorků struktur (kalibrační úlohy). Pozorovány budou nejen velikosti klíčových parametrů (modul pružnosti, mez kluzu, deformační pevnost, oblast rovnoměrných deformací), ale také jejich průběhů (průběh síly reakce v závislosti na deformaci nebo nominálního napětí na přetvoření). Prostřednictvím takového porovnání pro sérii geometrických konfigurací struktur bude možné provádět dodatečné korekce modelu geometrie a modelu materiálu výpočtové úlohy.

V následujícím kroku bude finální výpočtový model validován pomocí úlohy zatěžování (kvazistatického i dynamického) rozměrnějšího strukturovaného celku. Rovněž i zde dojde k podobnému porovnání klíčových veličin. Ověření funkčnosti by mělo proběhnout pro variantu s objemovými i nosníkovými elementy s modifikací tuhosti v blízkosti uzlových bodů.

5.4.7 Plán publikací

Za účelem splnění požadavků doktorského studia na Ústavu konstruování bude vypracována přílohová disertační práce složená z publikací v odborném časopise/odborných časopisech. Publikační činnost autora bude rozdělena na tři studie zaměřením odpovídající výše popsané problematice. Výsledkem výzkumu by měla být predikční MKP simulace zatěžování mikro-prutové struktury zahrnující nelinearity materiálu, geometrie a okrajových podmínek.

K dosavadním studiím, vytvořeným přímo autorem této práce nebo s jeho spoluúčastí, bude doplněna připravovaná publikace s názvem Computational Approaches of Quasi-static Compression Loading of SS316L Lattice Structure Made by Selective Laser Melting Technology. Studie se zabývá popisem jednotlivých výpočtových přístupů kvazistatického zatěžování mikro-prutové struktury vyrobené z nerezové oceli se zahrnutím výrobních imperfekcí. Tato práce vzniká ve spolupráci s partnerským odborem Institute of Lightweight Design and Structural Biomechanics technické univerzity ve Vídni (TU Wien). V současné době je již práce připravena na odeslání k finálním kontrolám na partnerské instituci.

Další navazující studie se bude zaměřovat na výpočtové modelování mikro-prutových struktur zatěžovaných dynamicky. Studium v této oblasti umožní sestavení kompletního výpočtového modelu se zahrnutím výrobních imperfekcí i vlivů rázového zatížení. K tomu bude zapotřebí navázat spolupráci se společností SVS FEM v Brně a využít jejich testovací zařízení a znalosti ke stanovení vlastností dynamicky zatěžovaných struktur.

V souladu s platnou Metodikou hodnocení výsledků výzkumu a vývoje bude vyvinuta snaha o publikování v odborných časopisech v prvním nebo druhém kvartilu v oboru.

Seznam vhodných periodik pro publikaci výsledků:

- International Journal of Impact Engineering
(Q1 Aerospace Engineering, IF 3,173)
- Journal of the Mechanics and Physics of Solids
(Q1 Condensed Matter Physics, IF 4,087)
- Thin-Walled Structures
(Q1 Building and Construction, IF 3,488)
- Additive Manufacturing
(Q1 Industrial and Manufacturing Engineering), IF 7,173)
- Materials

(Q2 Material Science (miscellaneous), IF 2,972)

6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Následující kapitola mapuje souhrn dosavadní řešené problematiky především v oblasti nelineárního výpočtového modelu kvazistatického zatěžování. To značí především provedení tahových zkoušek za účelem stanovení modelu materiálu a optickou digitalizaci struktur za účelem stanovení modelu geometrie. Navíc již došlo k výrobě a testování (kvazistaticky i dynamicky) sad základních BCC struktur s odstupňovaným průměrem prutu. Tím byly získány informace o rozdílném chování při zatěžování struktur zvýšenou rychlostí pro různé objemové podíly. Dále byly sestaveny první verze simulačních úloh zahrnující objemové i nosníkové elementy s modifikací tuhosti v blízkosti uzlových bodů. Následující výzkum se bude zaměřovat především na verifikaci výpočtových modelů, stanovení konstitutivního vztahu dynamického zatěžování a významu imperfekcí.

6.1 Příprava výroby

V první fázi řešení byly stanoveny procesní parametry pro výrobu testovacích těles. Tyto parametry byly vybrány jako série nastavení doporučená výrobcem stroje, společností SLM Solutions, pro jim dodávaný materiál SS 316L (viz Tab. 6-1). Vybraná skenovací strategie byla označovaná jako *bidirectional hatching* se dvěma konturami. Nastavení těchto parametrů by mělo zaručovat vysoké hodnoty mechanických vlastností vyráběných dílů s minimalizací výskytu geometrickým imperfekcí a porozity.

Tab. 6-1 Základní procesní parametry nerezové oceli 316L

Parametr	Hodnota	Jednotka
Teplota platformy	100	°C
Inertní atmosféra	N ₂ (> 0,2 % O ₂)	-
Výška vrstvy	50	μm
<i>Contours</i>		
Výkon laseru	100	W
Skenovací rychlost	300	mm·s ⁻¹
<i>Hatching</i>		
Výkon laseru	275	W
Skenovací rychlost	700	mm·s ⁻¹
<i>Fill contours</i>		
Výkon laseru	150	W
Skenovací rychlost	400	mm·s ⁻¹

Následně byl pro výrobu vzorků vybrán materiál (TLS Technik GmbH, Bitterfeld, Germany). Svým chemickým složením (viz Tab. 6-2) a distribucí částic před prvním recyklačním cyklem ($Q_{10} = 10,07 \mu\text{m}$, $Q_{50} = 29,44 \mu\text{m}$ a $Q_{90} = 48,21 \mu\text{m}$) se odlišoval jen nepatrně v porovnání s materiálem dodávaným společností SLM Solutions. Jeho zpracovatelnost byla v minulosti na Ústavu konstruování testována s dobrým výsledkem. Byl proto shledán vhodným pro další výzkum, přičemž bylo rozhodnuto dále nepokračovat v bližší specifikaci a dalším vývoji procesních parametrů.

Tab. 6-2 Výsledek chemické analýzy prášku nerezové oceli 316L

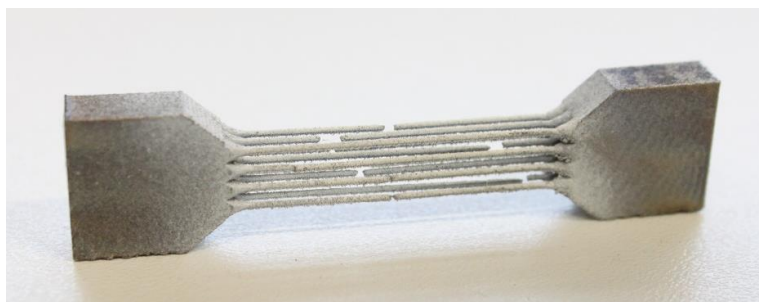
Elem.	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
wt-%	Bal.	0.03	0.8	1.8	17.5	2.2	11.3

6.2 Materiálové vlastnosti

V dalším kroku byla navržena základní tahová tělesa pro stanovení mechanických vlastností vstupujících do modelu materiálu v kvazistatickém stavu. Geometrie těchto těles byla koncipována tak, aby co nejlépe reflektovala specifické podmínky zatěžování mikroprutových struktur, tudíž byla použita konfigurace s více pruty uvedená v kapitole 5.4.1 (viz Obr. 5-3) [16, 45]. Vzorky byly navrženy s jednotným nominálním průměrem prutu (0,6 mm), který byl dále uvažován jako referenční [58]. Výrobní úhel byl stanoven na 35° , aby byly případné geometrické odchylky a vlastnosti porovnatelné s vlastnostmi prutů BCC struktury.

Pro srovnání výsledných mechanických vlastností byly vyrobeny i konvenční tahové vzorky svírající úhel 90° vzhledem k platformě. Tyto vzorky byly po výrobě obrobny podle normy DIN 50125 (byl odstraněn vliv povrchové a podpovrchové porozity).

Tahové zatěžování obou typů vzorků probíhalo až do jejich úplného selhání (přetržení všech prutů). Fotografie vzorku po testování (viz Obr. 6-1) vyobrazuje místa, ve kterých došlo k přetržení prutů. Odlišná poloha těchto míst poukazuje na náhodný výskyt oblastí s nejnižšími mechanickými vlastnostmi. Eventuální kumulace oblastí selhání prutů by znamenala možnou přítomnost negativních vlivů způsobujících degeneraci mechanických vlastností (způsobená např. zhoršeným odvodem tepla při výrobě vzorku).



Obr. 6-1 Multi-prutový tahový vzorek po experimentálním zatěžování

Pro stanovení závislosti napětí na přetvoření byla u multi-prutových vzorků vztahována působící síla k průřezu prutů, který byl stanovený optickou digitalizací před testováním. Tyto výpočtové průřezy byly v softwaru GOM Inspect získány proložením měřených průřezů elipsou, která aproximovala jejich skutečný tvar (viz Obr. 6-2 (vlevo)).

Výsledné průměrné hodnoty popisující pružně elastickou i plastickou deformaci vzorků jsou prezentovány v Tab. 6-3.

Tab. 6-3 Porovnání průměrné hodnoty měřených mechanických vlastností

Veličina	Průměrná hodnota		Jednotka
	Multi-prutové	Konvenční	
Modul pružnosti	102,5	166	GPa
Smluvní mez kluzu ($\epsilon=0,002$)	338	450	MPa
Mez pevnosti	397	541	MPa
Tečný modul	787	89	MPa
Přetvoření do poškození	0,053	0,356	-

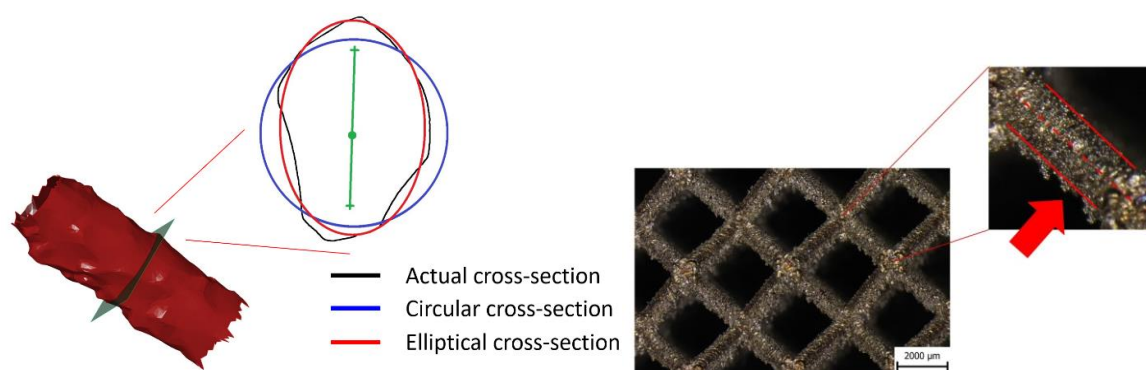
Při porovnání výsledků tahových zkoušek obou typů těles je patrný značný rozdíl. Zatímco vlastnosti konvenčních tahových vzorků jsou srovnatelné s tabulkovými údaji výrobce prášku SLM Solutions [85], tahové vzorky s tenkými pruty vykazují pokles sledovaných veličin. Zjištění je do určité míry shodné s předcházejícími studii jiných autorů, kteří se rovněž zabývali zatěžováním mikro-prutových struktur vyrobených z nerezové oceli 316L technologií SLM. Porovnání modulu pružnosti získaného na základě zkoušek prutových těles a korekcí ve studii **Smith** [54] ukázalo asi 40% pokles. Oproti tomu porovnání modulu s dvojím způsobem měření, které popsal **Lie** [24] ukázalo přibližně 30% nárůst. Dobrá shoda modulu pružnosti i dalších veličin nastala při porovnání výsledku s **Gümrükem** [23]. Velký rozsah vlastností je možné vysvětlit odlišnými procesními parametry a použitým materiálem. Tyto faktory hrají důležitou roli obzvláště při výrobě tenkostěnných těles.

Model materiálu vytvořený na základě získaných dat byl koncipován jako bilineární elasticko-plastický model (viz Obr. 5-9). Prozatím zde nebyly zahrnuty efekty spojené se zvýšenou rychlostí zatěžování.

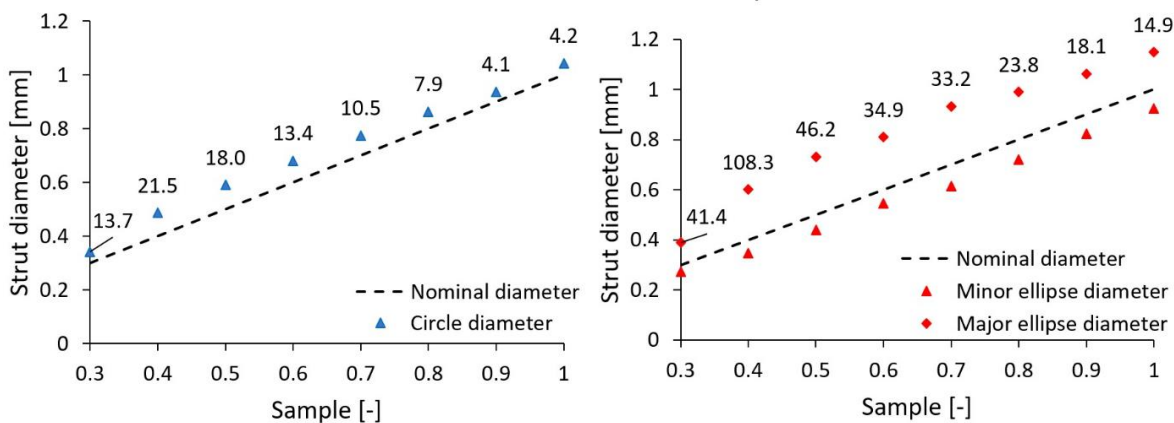
6.3 Geometrické imperfekce

V následujícím kroku byly vyrobeny vzorky struktur typu BCC. Tyto vzorky byly vyrobeny ve dvou sériích pro kvazistatické a nízko-rychlostní dynamické testování v konfiguracích popsanych v kapitole 5.4.1. Nominální průměr jejich prutu se pohyboval v rozmezí 0,3 mm až 1 mm. Jako referenční byly zvoleny vzorky s průměrem prutu 0,6 mm, což byl rovněž průměr použitý u multi-prutových těles.

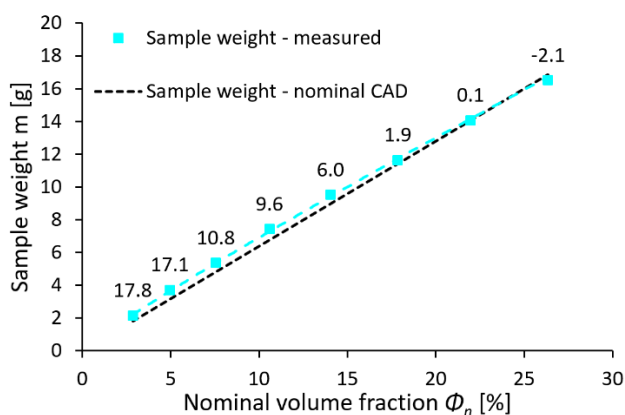
Po výrobě byly všechny vzorky struktur zváženy a digitalizovány. Na základě skenů byla podle popisu uvedeného v kapitole 5.4.2 [31] vyhodnocena skutečná geometrie včetně výrobních imperfekcí (viz Obr. 6-2 (vpravo)), které zahrnovaly změnu velikosti průměrů prutů a jejich průřezů. To umožnilo implementovat výrobní odchylky všech průměrů do softwaru (viz Obr. 6-3). Výsledky ukázaly nárůst velikosti skutečného průřezu v porovnání s nominálním pro oba sledované typy vyhodnocení. Porovnání skutečné a teoretické hmotnosti vzorků ukázalo podobný trend z hlediska přírůstků materiálu (Obr. 6-4). S rostoucí nominální velikostí prutu docházelo k procentuálnímu zmenšování těchto přírůstků. Již u předcházejících studií provedených pro materiály $AlSi_{10}Mg$ a 316L bylo zjištěno, že se přírůstek materiálu zmenšuje s rostoucím průměrem prutu až na zanedbatelnou hodnotu [49]. Nalezení této hraniční velikosti však prozatím stanovené nebylo.



Obr. 6-2 Porovnání tvarů aproximujících průřez prutu (vlevo), detail částečně natavených zrn prášku (vpravo)



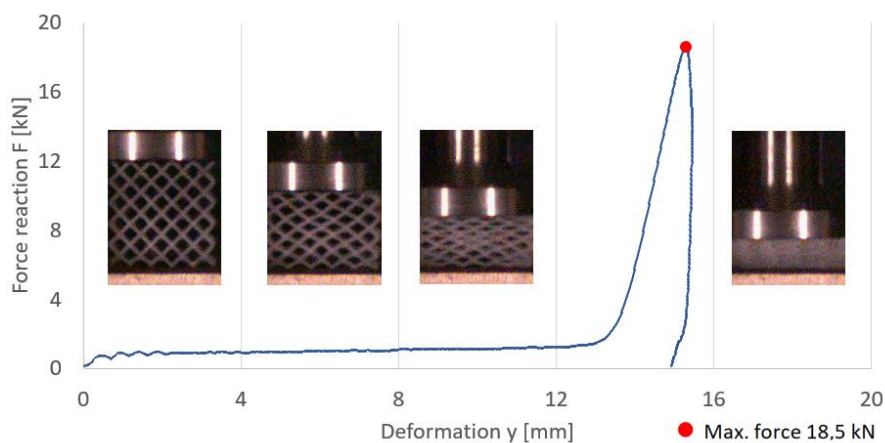
Obr. 6-3 Rozdíl mezi nominálním a měřeným průměrem prutu pro proložení průřezu kruhem (vlevo) a elipsou (vpravo); čísla nad body označují procentuální nárůst plochy průřezu v porovnání s CAD daty



Obr. 6-4 Porovnání měřené a teoretické hmotnosti vzorků po výrobě

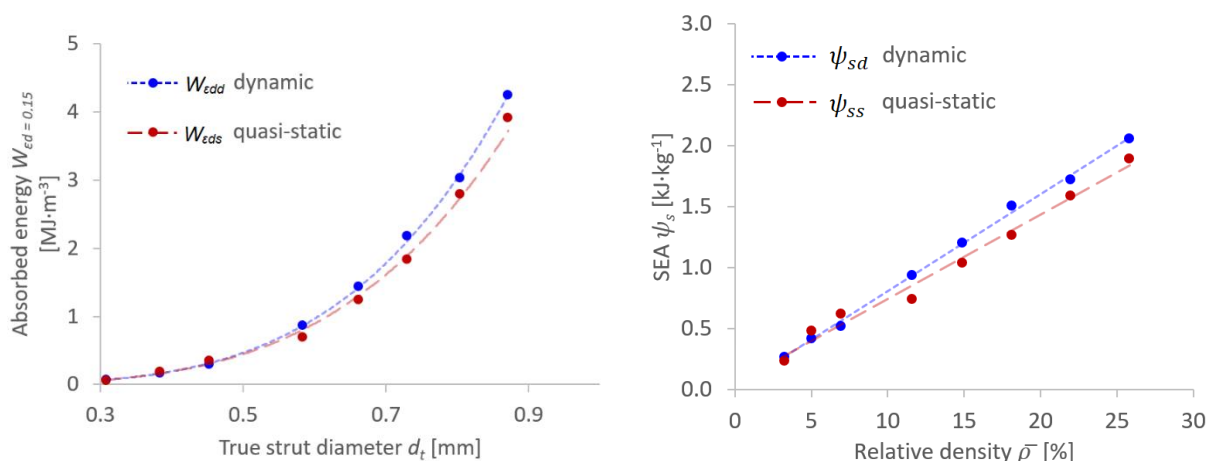
6.4 Vliv dynamického zatěžování

Následně byly vzorky testovány kvazistatickou (Zwick Z250) a nízko-rychlostní dynamickou (Impact tester) zkouškou. Výsledky obou zkoušek byly popisovány z hlediska působící síly reakce v závislosti na deformaci. Obr. 6-5 ukazuje typický průběh – je zde patrná oblast počátečního zatěžování, konstantních deformací i nárůstu síly působící při denzifikaci strukturovaného materiálu. Toto vyhodnocení bylo později změněno na závislost nominálního napětí na poměrné deformaci. Napětí bylo v tomto případě vztaženo k celkové ploše podstavy vzorku (400 mm^2) [15, 18] a absorbovaná energie definovaná plochou pod křivkou napětí působícího do přetvoření vzorků o 15 % (práce vykonaná při deformaci vzorku). Použitá metoda umožnila posouzení rozdílů absorbované energie u obou způsobů zatěžování (viz Obr. 6-6 (vlevo)).



Obr. 6-5 Závislost síly reakce na deformaci dynamicky zatěžované struktury s nominálním průměrem prutu 0,4 mm

Z grafu je patrné, že již při nízkých dynamických rychlostech odpovídajících rychlosti přetvoření 10^2 s^{-1} dochází u struktur s vyšším průměrem prutu k navýšení napětí (do 10 % pro vzorky s průměrem prutu $>0,5 \text{ mm}$), a tím také množství absorbované energie. Toto navýšení je vysvětleno nezanedbatelným projevem dynamických efektů, především citlivostí základového materiálu na rychlost přetvoření.



Obr. 6-6 Porovnání absorbované energie pro kvazistatické a dynamické tlakové testy (vlevo); porovnání SEA pro odlišné hodnoty relativních hustot (vpravo)

Podobné navýšení ukazuje i porovnání specifické absorpce energie ψ (SEA) (viz Obr. 6-6 (vpravo)) v závislosti na relativní hustotě. Tato veličina byla stanovena jako práce W vykonaná při deformaci strukturovaného vzorku vztažená k hmotnosti [57]:

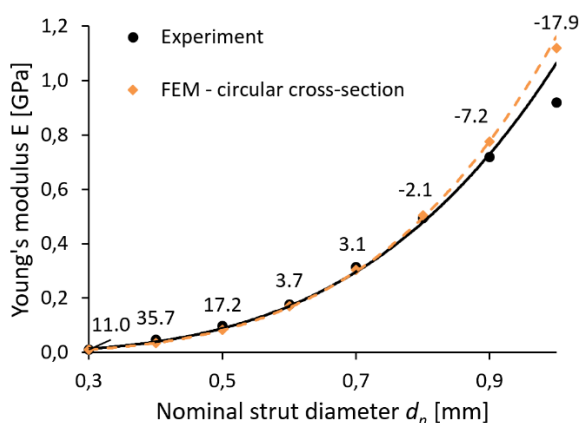
$$\psi = \frac{W}{\rho_s \bar{\rho}_t} = \left(\int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right) / \rho_s \bar{\rho}_t \quad (6-1)$$

kde $\bar{\rho}_t$ indikuje relativní hustotu struktury, ρ_s hustotu základového materiálu (z materiálového listu $8000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), ε_d přetvoření odpovídající 15 % a σ nominální napětí. Výsledek rozdílné absorpce energie poukazuje na možnou potřebu zavedení konstitutivních vztahů uvažujících rychlost poměrné deformace do výpočtového MKP modelu dynamického zatěžování struktur.

6.5 Výpočtová úloha

První simulace byla vytvořena za pomoci nosníkových elementů s korekcí průměrů prutů v blízkosti uzlových bodů. I přes relativně malé rozměry struktury byla tato korekce pro všechny pruty náročná, proto bylo rozhodnuto sestavení APDL skriptu, který automaticky přiřazoval průměry prutů jednotlivým segmentům. Úloha byla sestavená podle nastavení popsaného v kapitole 5.4.5. Model materiálu byl vytvořen jako elasticko-plastický se vstupními parametry získanými z tahových zkoušek multi-prutových těles (viz Tab. 6-3). Pro iniciační úlohy bylo nelineární chování materiálu vypnuto. Výsledné hodnoty v podobě modulů pružnosti všech struktur v sérii byly porovnány (viz Obr. 6-7).

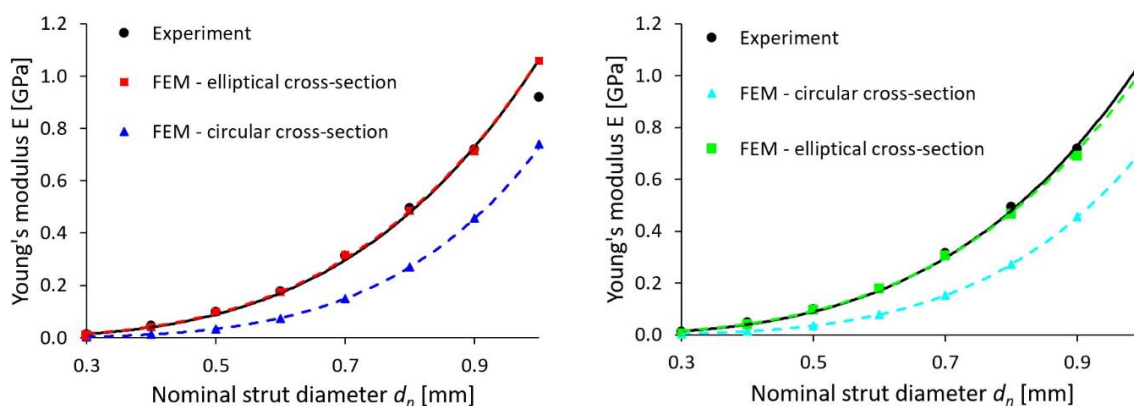
Porovnání ukázalo, že i bez zahrnutí výrobních imperfekcí se MKP simulace přibližuje experimentálním výsledkům. Tento jev byl nicméně pozorován pouze při uvážení lineárně elastického chování materiálu. Při zahrnutí nelineárního chování se začaly objevovat významné odchylky počátku kolapsu struktury. Model struktury v MKP simulaci se v porovnání s experimentem začínal progresivně deformovat za působení mnohem nižšího napětí. Bylo proto přistoupeno k vytvoření simulace zahrnující výrobní imperfekce spojené s nárůstem průřezu prutů struktury a změnou jejich skutečného tvaru.



Obr. 6-7 Porovnání experimentu a MKP úlohy (tvořené nosníkovými elementy s korekcí uzlových elementů)

Změnou velikosti a tvaru průřezu podle výše zmíněného vyhodnocení (viz Obr. 6-3 (vpravo)) byla vytvořena série nových úloh. Po jejich přepočítání pomocí modelu tvořeného nosníkovými elementy a modelu tvořeného objemovými elementy vzniklo nové porovnání s experimentem. Oba modely ukazovaly dobrou shodu mezi sebou z hlediska modulu pružnosti struktur, avšak při jejich porovnání s experimentem se jeví jako příliš tuhé. Zahrnutí imperfekcí v podobě změny průřezu prutů a navýšení jejich ploch nad očekávání zvýšilo i pevnost struktur. Tento výsledek poukázal na to, že měřené přírůstky materiálu na povrchu prutů experimentálně testovaných těles se plně nepodílejí na přenosu zatížení. Toto zjištění je v kontrastu s jednou z předcházejících studií [22], ve které bylo dosaženo výrazného zpřesnění výsledků numerické simulace zahrnutím imperfekcí podobným způsobem pro materiál AlSi₁₀Mg (dynamické zatěžování). Popisované zahrnutí geometrických odchylek tedy nemusí mít stejný efekt pro odlišné materiály.

Z tohoto důvodu byly v dalším kroku provedeny korekce Youngova modulu pružnosti základového materiálu v modelu. Výsledný modul pružnosti klesl téměř na třetinu ($E = 36$ GPa). Nové porovnání simulace s experimentem pro oba výpočtové modely (*beam* a *solid* elementy) ukázalo dobrou shodu trendů modulů pružnosti struktur (viz Obr. 6-8). V dalším kroku bude zapotřebí porovnat tyto struktury z hlediska počátku kolapsu struktur a průběhu absorpce energie. Podle dosavadních výsledků by také mohlo dojít ke změnám přístupů zahrnujících výrobní odchylky do výpočtových simulací. Tyto kroky budou náplní připravovaných studií.



Obr. 6-8 Porovnání kvazistatické tlakové zkoušky s numerickou simulací – využívající objemové elementy (vlevo), nosníkové elementy (vpravo)

6.6 Prezentace dosavadních výsledků

Vytvoření prvotní numerické simulace pracující se zatěžováním mikro-prutové struktury za vyšších rychlostí bylo již pro hliníkovou slitinu AlSi₁₀Mg představeno v jedné z předcházejících studií.

VRÁNA, R.; ČERVINEK, O.; MAŇAS, P.; KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D. Dynamic Loading of Lattice Structure Made by Selective Laser Melting-Numerical Model with Substitution of Geometrical Imperfections

Tato studie byla uveřejněna roku 2018 v impaktovaném open access žurnálu Materials (MDPI) s impakt faktorem 2,728 (2015). Model materiálu byl přizpůsoben hliníkové slitině a jeho vstupní data byla získána na základě kvazistatických tahových zkoušek. Byl zde využit pouze výpočtový přístup definující model geometrie pomocí objemových elementů.

Na tuto studii navazovaly dva konferenční příspěvky publikované roku 2019 na kongresu práškové metalurgie EURO PM2019. První z nich se zabýval posouzením schopnosti absorpce energie mikro-prutovou strukturou typu BCC vyrobenou z hliníkové slitiny při kvazistatickém zatěžování.

VRÁNA, R.; VAVERKA, O.; ČERVINEK, O.; PANTĚLEJEV, L.; HURNÍK, J.; KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D. Heat Treatment of the SLM Processed Lattice Structure Made of AlSi10Mg and Its Effect on the Impact Energy Absorption

Druhý z nich se zaměřoval na porovnání vlastností stejné struktury vyrobené z nerezové oceli 316L při kvazistatickém a nízko-rychlostním dynamickém zatěžování.

ČERVINEK, O.; VRÁNA, R. KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D. Static and Dynamic Compression Performance of Lattice Structures Made by Selective Laser Melting.

Další výsledky týkající se sestavení výpočtového přístupu využívajícího nosníkové elementy zahrnující geometrické imperfekce kvazistaticky zatěžované mikro-prutové struktury budou prezentovány formou připravované studie v impaktovaném periodiku (viz kapitola 5.4.7).

Po této studii bude následovat další publikace zahrnující vliv rychlosti zatěžování v modelu materiálu.

7 ZÁVĚR

Tato práce je pojednáním k doktorské disertační práci, jejíž podstatou je rozšíření stavu poznání v oblasti nelineárních MKP simulací zatěžování mikro-prutových struktur vyrobených technologií SLM. Předmětem pojednání je návrh výzkumu v této oblasti navazujícího na dosavadní poznatky.

První polovina práce je věnována přehledu metod a postupů využívaných pro zkoumání deformačního chování mikro-prutových struktur z hlediska absorpce energie. Podává informace především o možnostech sestavení výpočtových simulací s ohledem na typ struktury, způsob zatěžování, použitý materiál nebo výrobní imperfekce. Na základě rešeršní studie je provedena analýza kritických oblastí, které vyžadují důkladnější prozkoumání. Některé z klíčových poznatků v těchto oblastech nejsou kompletní, což vede k formulaci vědeckých otázek s hypotézami a konkrétními cíli disertační práce. Pro jejich objasnění je zapotřebí vytvořit MKP simulace zahrnující poznatky o mechanických vlastnostech, geometrii a deformačním chování struktur. Vhodnou interpretací výsledků výpočtových úloh porovnávaných s experimenty je možné zvolit potenciálně vhodný simulační přístup a posoudit platnost pracovních hypotéz.

Za účelem korektního sestavení simulací je v druhé polovině této práce navržen postup vedoucí k získání vstupních dat výpočtových úloh včetně počátečních nastavení. Tento postup spočívá především v korektním stanovení mechanických vlastností strukturovaných prvků a získání vypovídající informace o geometrii jejich povrchu. Následující část práce navazuje již provedenými testy s popisem zásadních výsledků dílčích experimentů i výpočtových úloh.

Na základě návrhu výzkumu bude vytvořena disertační práce, která přispěje k efektivnějším návrhům mikro-prutových struktur pro absorpci energie. Pomocí parametrických úloh bude možné měnit geometrii a materiál struktur a sledovat dopad na jejich absorpční schopnosti bez nutnosti jejich výroby. Tím bude katalyzováno výpočtové testování širokého spektra mikro-prutových struktur v krátkém čase. Získané znalosti přispějí k progresivnímu vývoji nové generace absorbérů energie. Specializované absorbéry navržené na cílený druh deformace a množství disipované energie zvýší bezpečnost v automobilové dopravě.

Doposud se povedlo částečně splnit dílčí cíle, čímž byly položeny první předpoklady pro úspěšné splnění disertační práce.

8 BIBLIOGRAFIE

- [1] AHMAD, Zaini. *Impact and Energy Absorption of Empty and Foam-filled Conical Tubes*. 2009.
- [2] LABEAS, G. N. a M. M. SUNARIC. Investigation on the static response and failure process of metallic open lattice cellular structures. *Strain* [online]. 2010. ISSN 00392103. Dostupné z: doi:10.1111/j.1475-1305.2008.00498.x
- [3] WANG, Yonghui, Ximei ZHAI, Wenjian YING a Wei WANG. Dynamic crushing response of an energy absorption connector with curved plate and aluminum foam as energy absorber. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2018, **121**, 119–133. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2018.07.016
- [4] AHMAD, Z. a D. P. THAMBIRATNAM. Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading. *Materials and Design* [online]. 2009, **30**(7), 2393–2403. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2008.10.017
- [5] MOHMMED, Ramadan, Fa ZHANG, Baozhong SUN a Bohong GU. Finite element analyses of low-velocity impact damage of foam sandwiched composites with different ply angles face sheets. *Materials and Design* [online]. 2013, **47**, 189–199. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2012.12.016
- [6] *ERG materials & aerospace* [online]. 2019. Dostupné z: <http://ergaerospace.com/applications/duocel-foam-energy-absorbers/>
- [7] TANCOGNE-DEJEAN, Thomas, Adriaan B. SPIERINGS a Dirk MOHR. Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading. *Acta Materialia* [online]. 2016, **116**, 14–28. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2016.05.054
- [8] 2020 ERG AEROSPACE CORP. *ERG materials and aerospace* [online]. Dostupné z: <http://ergaerospace.com/technical-data/duocel-foam-energy-absorption/>
- [9] VRÁNA, R. *Návrh porézních struktur pro aditivní výrobu technologií selective laser melting*. B.m., 2014. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] HASAN, Rafidah, Robert A.W. MINES, E. SHEN, S. TSOPANOS, Wesley J. CANTWELL, W. BROOKS a C.J. SUTCLIFFE. Comparison of the Drop Weight Impact Performance of Sandwich Panels with Aluminium Honeycomb and Titanium Alloy Micro Lattice Cores. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2010, **24–25**, 413–418. ISSN 1662-7482. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.24-25.413
- [11] RASHED, M. G., Mahmud ASHRAF, R. A.W. MINES a Paul J. HAZELL. Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications. *Materials and Design* [online]. 2016. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.01.146
- [12] LABEAS, G a E PTOCHOS. Investigation of sandwich structures with innovative cellular metallic cores under low velocity impact loading. *Plastics, Rubber and Composites* [online]. 2013. ISSN 1465-8011. Dostupné z: doi:10.1179/1743289811Y.0000000056

- [13] LABEAS, G. a Evangelos PTOCHOS. Homogenization of selective laser melting cellular material for impact performance simulation. *International Journal of Structural Integrity* [online]. 2015, **6**(4), 439–450. ISSN 17579872. Dostupné z: doi:10.1108/IJSI-10-2014-0059
- [14] MINES, R. A.W., S. TSOPANOS, Y. SHEN, R. HASAN a S. T. MCKOWN. Drop weight impact behaviour of sandwich panels with metallic micro lattice cores. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2013, **60**, 120–132. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2013.04.007
- [15] TANCOGNE-DEJEAN, Thomas a Dirk MOHR. Stiffness and specific energy absorption of additively-manufactured metallic BCC metamaterials composed of tapered beams. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2018. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.03.027
- [16] GÜMRÜK, Recep, R. A.W. MINES a Sami KARADENIZ. Determination of Strain Rate Sensitivity of Micro-struts Manufactured Using the Selective Laser Melting Method. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2018, **27**(3), 1016–1032. ISSN 15441024. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-018-3208-y
- [17] MINES, Robert A.W., Sozohn TSOPANOS a S.T. MCKOWN. Verification of a Finite Element Simulation of the Progressive Collapse of Micro Lattice Structures. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2011, **70**, 111–116. ISSN 1662-7482. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.70.111
- [18] XIAO, Lijun a Weidong SONG. Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiments. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2018, **111**, 255–272. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2017.09.018
- [19] CHEN, Zeyao, Zhe WANG, Shiwei ZHOU, Jianwang SHAO a Xian WU. Novel negative poisson's ratio lattice structures with enhanced stiffness and energy absorption capacity. *Materials* [online]. 2018, **11**(7). ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11071095
- [20] RADEK VRANA, ONDREJ VAVERKA, ONDREJ CERVINEK, LIBOR PANTELEJEV, JAKUB HURNIK, DANIEL KOUTNY, David Palousek. Heat Treatment of the SLM Processed Lattice Structure Made of AlSi10Mg and Its Effect on the Impact Energy Absorption. In: *Conference: Euro PM2019 Congress & Exhibition*. 2019, s. 6.
- [21] OZDEMIR, Zuhail, Andrew TYAS, Russell GOODALL a Harm ASKES. Energy absorption in lattice structures in dynamics: Nonlinear FE simulations. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2017, **102**, 1–15. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2016.11.016
- [22] VRÁNA, R., O. CERVINEK, P. MANAS, D. KOUTNÝ a D. PALOUŠEK. Dynamic loading of lattice structure made by selective laser melting-numerical model with substitution of geometrical imperfections. *Materials* [online]. 2018, **11**(11). ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11112129
- [23] GÜMRÜK, R. a R. A W MINES. Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2013. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2013.01.006

- [24] LI, P., Z. WANG, N. PETRINIC a C. R. SIVIOUR. Deformation behaviour of stainless steel microlattice structures by selective laser melting. *Materials Science and Engineering A* [online]. 2014. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2014.07.015
- [25] MASKERY, I., N. T. ABOULKHAIR, A. O. AREMU, C. J. TUCK a I. A. ASHCROFT. Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices. *Additive Manufacturing* [online]. 2017, **16**. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2017.04.003
- [26] ŽMINDÁK, Milan, Zoran PELAGIĆ, Peter PASTOREK, Martin MOČILAN a Martin VYBOŠŤOK. Finite element modelling of high velocity impact on plate structures. In: *Procedia Engineering* [online]. 2016, s. 162–168. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2016.01.191
- [27] WANG, Bing, Lin-Zhi WU, Li MA a Ji-Cai FENG. Low-velocity impact characteristics and residual tensile strength of carbon fiber composite lattice core sandwich structures. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2011, **42**(4), 891–897. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2011.01.007
- [28] GRYTTE, F., T. BØRVIK, O. S. HOPPERSTAD a M. LANGSETH. Low velocity perforation of AA5083-H116 aluminium plates. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2009, **36**(4), 597–610. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2008.09.002
- [29] MOHMMED, Ramadan, Azzam AHMED, Mohamed Ahmed ELGALIB a Hashim ALI. Low Velocity Impact Properties of Foam Sandwich Composites: A Brief Review. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*. 2014, **3**(2), 579–591.
- [30] LUXNER, Mathias H., Juergen STAMPFL a Heinz E. PETTERMANN. Finite element modeling concepts and linear analyses of 3D regular open cell structures. In: *Journal of Materials Science* [online]. 2005. ISSN 00222461. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-005-5020-y
- [31] VRÁNA, Radek, Ondrej CERVINEK, Pavel MANAS, Daniel KOUTNÝ a David PALOUŠEK. Dynamic loading of lattice structure made by selective laser melting-numerical model with substitution of geometrical imperfections. *Materials* [online]. 2018. ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11112129
- [32] AMANI, Yasin, Sylvain DANCETTE, Pauline DELROISSE, Aude SIMAR a Eric MAIRE. Compression behavior of lattice structures produced by selective laser melting: X-ray tomography based experimental and finite element approaches. *Acta Materialia* [online]. 2018. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2018.08.030
- [33] KARAMOOZ RAVARI, M. R., M. KADKHODAEI, M. BADROSSAMAY a R. REZAEI. Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2014. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2014.08.009

- [34] LEI, Hongshuai, Chuanlei LI, Jinxin MENG, Hao ZHOU, Yabo LIU, Xiaoyu ZHANG, Panding WANG a Daining FANG. Evaluation of compressive properties of SLM-fabricated multi-layer lattice structures by experimental test and μ -CT-based finite element analysis. *Materials and Design* [online]. 2019. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.107685
- [35] LOZANOVSKI, Bill, Martin LEARY, Phuong TRAN, Darpan SHIDID, Ma QIAN, Peter CHOONG a Milan BRANDT. Computational modelling of strut defects in SLM manufactured lattice structures. *Materials and Design* [online]. 2019. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.107671
- [36] LIU, Lu, Paul KAMM, Francisco GARCÍA-MORENO, John BANHART a Damiano PASINI. Elastic and failure response of imperfect three-dimensional metallic lattices: the role of geometric defects induced by Selective Laser Melting. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* [online]. 2017, **107**. ISSN 00225096. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmps.2017.07.003
- [37] TSOPANOS, S., R. A.W. MINES, S. MCKOWN, Y. SHEN, W. J. CANTWELL, W. BROOKS a C. J. SUTCLIFFE. The influence of processing parameters on the mechanical properties of selectively laser melted stainless steel microlattice structures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME* [online]. 2010, **132**(4), 0410111–0410112. ISSN 10871357. Dostupné z: doi:10.1115/1.4001743
- [38] FANG, Dai Ning, Yu Long LI a Han ZHAO. *On the behaviour characterization of metallic cellular materials under impact loading* [online]. 2010. ISBN 0567-7718. Dostupné z: doi:10.1007/s10409-010-0392-x
- [39] HARRIS, J. A., R. E. WINTER a G. J. MCSHANE. Impact response of additively manufactured metallic hybrid lattice materials. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2017, **104**. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2017.02.007
- [40] MASKERY, I., C. TUCK, A.O. AREMU, I. MASKERY, C. TUCK, I.A. ASHCROFT, R.D. WILDMAN a R.I.M HAGUE. A comparative Finite Element study of cubic unit cells for Selective Laser Melting. *International Solid Freeform Fabrication Symposium2*. 2014, 1238–1249.
- [41] VRANA, RADEK, Daniel KOUTNY a David PALOUSEK. IMPACT RESISTANCE OF DIFFERENT TYPES OF LATTICE STRUCTURES MANUFACTURED BY SLM. *MM Science Journal* [online]. 2016, (06), 1579–1585. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2016_12_2016186
- [42] ZHAO, Miao, Fei LIU, Guang FU, David ZHANG, Tao ZHANG a Hailun ZHOU. Improved Mechanical Properties and Energy Absorption of BCC Lattice Structures with Triply Periodic Minimal Surfaces Fabricated by SLM. *Materials* [online]. 2018, **11**(12), 2411. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11122411
- [43] LUXNER, Mathias H., Juergen STAMPFL a Heinz E. PETERMANN. Linear and nonlinear numerical investigations of regular open cell structures. In: *American Society of Mechanical Engineers, Aerospace Division (Publication) AD* [online]. 2004. ISSN 07334230. Dostupné z: doi:10.1115/IMECE2004-62545

- [44] LUXNER, Mathias H., Alexander WOESZ, Juergen STAMPFL, Peter FRATZL a Heinz E. PETERMANN. A finite element study on the effects of disorder in cellular structures. *Acta Biomaterialia* [online]. 2009. ISSN 17427061. Dostupné z: doi:10.1016/j.actbio.2008.07.025
- [45] DONG, Guoying a Yaoyao Fiona ZHAO. Numerical and experimental investigation of the joint stiffness in lattice structures fabricated by additive manufacturing. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2018. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.09.014
- [46] GIBSON, Lorna J. a Michael F. ASHBY. *Cellular solids: Structure and properties, second edition* [online]. 2014. ISBN 9781139878326. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781139878326
- [47] GENG, Xiaoliang, Liyang MA, Chao LIU, Chen ZHAO a Zhu Feng YUE. A FEM study on mechanical behavior of cellular lattice materials based on combined elements. *Materials Science and Engineering A* [online]. 2018. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2017.11.082
- [48] ZHANG, Lei, Stefanie FEIH, Stephen DAYNES, Shuai CHANG, Michael Yu WANG, Jun WEI a Wen Feng LU. Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading. *Additive Manufacturing* [online]. 2018. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.08.007
- [49] KOUTNY, Daniel, Mechanical ENGINEERING a Czech REPUBLIC. Dimensional accuracy of single beams of AlSi10Mg alloy and 316Lstainless steel manufactured by SLM. *Proceedings of 5th International Conference on Additive Technologies*. 2014.
- [50] LIU, Yabo, Zhichao DONG, Jun LIANG a Jingran GE. Determination of the strength of a multilayer BCC lattice structure with face sheets. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2019. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2019.01.026
- [51] SIMULIA, Dassault Systèmes. Abaqus 6.14 / Analysis User's Guide. *ABAQUS 6.14 Analysis User's Guide* [online]. 2014, I, 862. ISSN 1098-6596. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- [52] USHIJIMA, K., W. J. CANTWELL, R. A.W. MINES, S. TSOPANOS a M. SMITH. An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures. *Journal of Sandwich Structures and Materials* [online]. 2011. ISSN 10996362. Dostupné z: doi:10.1177/1099636210380997
- [53] YADROITSEV, I., L. THIVILLON, Ph BERTRAND a I. SMUROV. Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder. *Applied Surface Science* [online]. 2007. ISSN 01694332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2007.08.046
- [54] SMITH, M., Z. GUAN a W. J. CANTWELL. Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2013, 67, 28–41. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2012.12.004

- [55] SMITH, M., Z. GUAN a W. J. CANTWELL. Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2013. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2012.12.004
- [56] CHAWLA, N. a X. DENG. Microstructure and mechanical behavior of porous sintered steels. *Materials Science and Engineering A* [online]. 2005. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2004.08.046
- [57] TANCOGNE-DEJEAN, Thomas, Adriaan B. SPIERINGS a Dirk MOHR. Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading. *Acta Materialia* [online]. 2016, **116**. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2016.05.054
- [58] LI, Chuanlei, Hongshuai LEI, Yabo LIU, Xiaoyu ZHANG, Jian XIONG, Hao ZHOU a Daining FANG. Crushing behavior of multi-layer metal lattice panel fabricated by selective laser melting. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2018. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.07.029
- [59] LI, Dawei, Wenhe LIAO, Ning DAI, Guoying DONG, Yunlong TANG a Yi Min XIE. Optimal design and modeling of gyroid-based functionally graded cellular structures for additive manufacturing. *CAD Computer Aided Design* [online]. 2018. ISSN 00104485. Dostupné z: doi:10.1016/j.cad.2018.06.003
- [60] LANGDON, G. S. a G. K. SCHLEYER. Unusual strain rate sensitive behaviour of AISI 316L austenitic stainless steel. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design* [online]. 2004. ISSN 03093247. Dostupné z: doi:10.1177/030932470403900106
- [61] HARRIS, J. A., R. E. WINTER a G. J. MCSHANE. Impact response of additively manufactured metallic hybrid lattice materials. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2017, **104**, 177–191. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2017.02.007
- [62] WINTER, R. E., M. COTTON, E. J. HARRIS, D. J. CHAPMAN, D. EAKINS a G. MCSHANE. Plate-impact loading of cellular structures formed by selective laser melting. In: *WIT Transactions on the Built Environment* [online]. 2012, s. 145–156. ISBN 17433509. Dostupné z: doi:10.2495/SU120131
- [63] OZDEMIR, Zuhail, Andrew TYAS, Russell GOODALL a Harm ASKES. Energy absorption in lattice structures in dynamics: Nonlinear FE simulations. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2017. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2016.11.016
- [64] TANCOGNE-DEJEAN, Thomas a Dirk MOHR. Stiffness and specific energy absorption of additively-manufactured metallic BCC metamaterials composed of tapered beams. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2018, **141**, 101–116. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.03.027
- [65] WANG, Yonghui, J. Y. Richard LIEW, Siew Chin LEE a Wei WANG. Experimental and analytical studies of a novel aluminum foam filled energy absorption connector under quasi-static compression loading. *Engineering Structures* [online]. 2017. ISSN 18737323. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2016.10.020

- [66] ZHANG, Pan, Yuansheng CHENG, Jun LIU, Yong LI, Changzai ZHANG, Hailiang HOU a Chunming WANG. Experimental study on the dynamic response of foam-filled corrugated core sandwich panels subjected to air blast loading. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2016, **105**. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2016.08.038
- [67] CHEN, Liming, Jian ZHANG, Bing DU, Hao ZHOU, Houchang LIU, Yongguang GUO, Weiguo LI a Daining FANG. Dynamic crushing behavior and energy absorption of graded lattice cylindrical structure under axial impact load. *Thin-Walled Structures* [online]. 2018, **127**, 333–343. ISSN 02638231. Dostupné z: doi:10.1016/j.tws.2017.10.048
- [68] BANERJEE, A., S. DHAR, S. ACHARYYA, D. DATTA a N. NAYAK. Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel. *Materials Science and Engineering A* [online]. 2015. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2015.05.073
- [69] LUXNER, Mathias H., Juergen STAMPFL a Heinz E. PETTERMANN. Numerical simulations of 3D open cell structures - influence of structural irregularities on elasto-plasticity and deformation localization. *International Journal of Solids and Structures* [online]. 2007. ISSN 00207683. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijsolstr.2006.08.039
- [70] LUXNER, M. H. a H. E. PETTERMANN. Modeling and simulation of highly porous open cell structures: Elasto-plasticity and localization Versus disorder and defects. In: *IUTAM Bookseries* [online]. 2009. ISBN 9781402094033. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4020-9404-0_14
- [71] PYKA, Grzegorz, Greet KERCKHOFS, Ioannis PAPANTONIOU, Mathew SPEIRS, Jan SCHROOTEN a Martine WEVERS. Surface Roughness and Morphology Customization of Additive Manufactured Open Porous Ti6Al4V Structures [online]. 2013, 4737–4757. Dostupné z: doi:10.3390/ma6104737
- [72] BREMEN, Sebastian, Wilhelm MEINERS a Andrei DIATLOV. Selective Laser Melting A manufacturing technology for the future? *Laser Technik Journal* [online]. 2012. ISSN 16137728. Dostupné z: doi:10.1002/latj.201290018
- [73] DHARMASENA, Kumar P., H. N G WADLEY, Zhenyu XUE a John W. HUTCHINSON. Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2008, **35**(9), 1063–1074. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2007.06.008
- [74] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. Praha: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [75] THIJS, Lore, Karolien KEMPEN, Jean Pierre KRUTH a Jan VAN HUMBEECK. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Materialia* [online]. 2013, **61**(5), 1809–1819. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2012.11.052
- [76] ČERMÁK, Jan. *Metody 3D skenování objektů*. B.m. 2015.
- [77] URBÁNEK, Aleš. *Kontrola součástí pomocí metod reverzního inženýrství: Bakalářská práce*. B.m., 2008. Vysoké učení technické v Brně.

- [78] YAHAYA, M. A., D. RUAN, G. LU a M. S. DARGUSCH. Response of aluminium honeycomb sandwich panels subjected to foam projectile impact - An experimental study. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2015, **75**, 100–109. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2014.07.019
- [79] VRÁNA RADEK, KOUTNÝ DANIEL, PALOUŠEK DAVID, Zikmund Tomáš. Influence of Selective Laser Melting Process Parameters on Impact Resistance of Lattice Structure made from AlSi10Mg. 2016, 6.
- [80] VRANA, R., D. KOUTNY, D. PALOUSEK a T. ZIKMUND. Impact resistance of lattice structure made by selective laser melting from AlSi12 alloy. *MM Science Journal* [online]. 2015, **2015**(DECEMBER), 849–852. ISSN 18050476 18031269. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2015_12_201547
- [81] ŠLAIS, Miroslav. *Studium vlivu rychlostních a teplotních parametrů na tvařitelnost Ti slitin*. B.m., 2012. Vysoké učení technické v Brně.
- [82] ČERVINEK, Ondřej, Radek VRÁNA, Daniel KOUTNÝ a David PALOUŠEK. Static and Dynamic Compression Performance of Lattice Structures Made by Selective Laser Melting. nedatováno.
- [83] AHMAD, Z., D. P. THAMBIRATNAM a A. C C TAN. Dynamic energy absorption characteristics of foam-filled conical tubes under oblique impact loading. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2010, **37**(5), 475–488. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2009.11.010
- [84] ZHANG, C, J LIU, Y ZHAO, P ZHANG, J PAN a Y CHENG. Dynamic response of sandwich panels with functionally graded aluminum foam cores subjected to underwater explosion. In: *ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2016* [online]. 2016. ISBN 9780791850008 (ISBN). Dostupné z: doi:10.1115/OMAE201655122
- [85] SHEET, Material Data. Material daten blatt. nedatováno.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

SLM	selective laser melting
SLA	stereolitografie
SLS	selective laser sintering
MKP	metoda konečných prvků
FEM	finite element method
FEA	finite element analysis
BCC	based cubic centred
BCCz	based cubic centred s vertikálními pruty
FCC	faced cubic centred
PFCC	faced cubic centred s vertikálními pruty
C-S	Cowper-Symonds
J-C	Johnson-Cook
SHPB	Split Hopkinson Pressure Bar
SEM	scanning electron microscope
CAD	computer aided design
DIC	digital image correlation
TPMS	triply periodic minimal surface
SEA	specific energy absorption
GTN	Gurson-Tvergaard-Needleman
SIE	specific impact energy
DIF	dynamic increase factor
DAF	dynamic amplification factor
σ	nominální napětí
$\varepsilon, \varepsilon_d$	přetvoření
σ_{peak}	vrcholné napětí dosažené na počátku zatěžování struktury
$\sigma_{plateau}$	napětí působící za rovnoměrných plastických deformací
E	Youngův modul pružnosti
$\varepsilon_{compact}$	přetvoření odpovídající denzifikaci struktury
d	průměr prutu struktury

m_b	měřená hmotnost vzorku
ρ_p	hustota základového materiálu
N	počet buněk
L	délka základní buňky
σ'_o	dynamicky působící napětí při jednoosé plastické deformaci
$\dot{\epsilon}, \dot{\epsilon}_p$	poměrná rychlost deformace
σ_o	staticky působící napětí
D, q	konstanty materiálových parametrů C-S
B31, B32, C3D4	označení nosníkových elementů v softwaru Abaqus
C3D10M, C3D8	označení objemových elementů v softwaru Abaqus
S4R	označení skořepinových elementů v softwaru Abaqus
d_{gauss}	průměr vytvořený na základě Gaussovského rozložení
d_{in}	průměr vytvořený na základě maximálního vepsaného válce
d_{out}	průměr vytvořený na základě minimálního opsaného válce
F	síla reakce
t	měřený čas
t^*	celkový čas zatěžování
1-D	1-dimensional
3-D	3-dimensional
μ -CT	počítačová tomografie
E^*	počáteční tuhost
σ^*	počáteční deformační pevnost
d/L	poměr průměru prutu k jeho délce
U	osový posuv
a, b	průměr hlavní a vedlejší osy elipsy
dx, dy	vertikální a horizontální posuv těžiště vzhledem k teoretické ose prutu
x', y'	pootočení osy průřezu
σ_Y	smluvní mez kluzu (na přetvoření 0,002)

$\sigma_{0,2SLM}$	smluvní mez kluzu pro vzorky vyrobené technologií SLM
σ_{utsSLM}	mez pevnosti pro vzorky vyrobené technologií SLM
Ra	drsnost povrchu
$\sigma_{0,2TB}$	smluvní mez kluzu
σ_{utsTB}	mez pevnosti základového materiálu
ε_{fSLM}	velikost přetvoření do poškození vzorku vyrobeného technologií SLM
ε_{fTB}	velikost přetvoření do poškození základového materiálu
σ_t	skutečné napětí
ε_p	logaritmické přetvoření
$n_i, C_i,$	parametry konstitutivních vztahů plastického zpevnění
α	parametr zúžení prutů
L_0	počáteční délka vzorku
W_v	absorbovaná energie
a	koeficient počáteční schopnosti energie
b	exponent zvyšující se rychlost kumulativní absorpce
t	parametr odsazení povrchu
$k_i (i = x, y, z)$	periodicky proměnné hodnoty velikosti základové buňky v
n_i	počet základových buněk
L_i	absolutní velikost struktury
n_i	velikost ve směrech x, y a z
A	mez kluzu
B	modul zpevnění (<i>hardening modulus</i>)
C	citlivost na rychlost deformace (<i>strain rate hardening coefficient</i>)
n	exponent zpevnění (<i>hardening coefficient</i>)
m	teplotní koeficient změknutí (<i>thermal softening coefficient</i>)
ψ	specifická absorpce energie
W	práce vykonaná při deformaci strukturovaného vzorku
$\bar{\rho}_t$	relativní hustota struktury
ρ_s	hustota základového materiálu
d_n	nominální průměr prutu struktury

10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Idealizovaná křivka napětí v závislosti na přetvoření mikro-prutové struktury v tlaku [2]	4
Obr. 2-2 Optimální chování napětí v závislosti na poměrné deformaci absorbéru při zatěžování [8]	5
Obr. 2-3 Prutová struktura BCC a) základní buňka b) struktura [41]	8
Obr. 3-1 Porovnání numerických přístupů z hlediska normalizovaného Youngova modulu pružnosti v rovině (100) pro BCC strukturu (vlevo); porovnání experimentu jednoosého tlakového testu v hlavním směru a simulací (vpravo) - struktury s relativní hustotou 10 % [30]	12
Obr. 3-2 Model nárazového testu při použití čtvrtinové symetrie (PAM-Crash) [12]	13
Obr. 3-3 Porovnání experimentálních a vypočítaných deformací bloku s BCC strukturou [12]	13
Obr. 3-4 Porovnání síly v závislosti na deformaci pro pádový test (206 J) [13]	14
Obr. 3-5 Změna modulu pružnosti mikro-prutové struktury s počtem intervalů (vlevo); změna deformačního napětí mikro-prutové struktury s počtem intervalů (vpravo) [33]	15
Obr. 3-6 Porovnání simulace uvažující objemové prvky se simulací uvažující nosníkové prvky bez modifikace tuhosti v blízkosti uzlů; a) namáhání ohybem; b) namáhání tahem [45]	17
Obr. 3-7 Porovnání simulace uvažující objemové prvky se simulací uvažující nosníkové prvky s modifikací tuhosti v blízkosti uzlů; a) namáhání ohybem; b) namáhání tahem [45]	17
Obr. 3-8 Kombinované MKP modely geometrie a) rhombic dodecahedron; b) BCCz1; c) BCCz2 [47]	18
Obr. 3-9 Tvary použité pro popis skutečného průřezu prutu po optické digitalizaci (elipsa, kružnice z měření Gaussovským válcem, minimálním opsaným a maximálním vepsaným) [24]	19
Obr. 3-10 a) Porovnání výsledků experimentu a simulace bez zahrnutí imperfekcí, b) porovnání se zahrnutím imperfekcí [24]	20
Obr. 3-11 Model geometrie panelu mikro-prutové struktury BCCz se zahrnutím geometrických imperfekcí [48]	21
Obr. 3-12 Porovnání výsledků mechanických vlastností experimentu a numerických simulací [48]	22

Obr. 3-13 Křivka průběhu nominálního napětí v závislosti na přetvoření pro BCC strukturu s 8 x 8 x 3 buněk (vlevo); porovnání teoretického výpočtu a MKP pro strukturu 6 x 6 x 2 buňky (vpravo) [50]	23
Obr. 3-14 Rozsah počátečních tuhostí (a) a počátečních pevností (b) vztažených k podílům průměru a délky prutu [23]	25
Obr. 3-15 Eliptický průřez prutu mikro-prutové struktury včetně proměnných parametrů definujících rozměry a tvar elipsy: a – průměr hlavní osy, b – průměr vedlejší osy, dx, dy – vertikální a horizontální posuv těžiště vzhledem k teoretické ose prutu, x', y' – pootočené osy průřezu [35]	26
Obr. 3-16 Porovnání modulu pružnosti a meze kluzu pro simulace s idealizovanou geometrií a simulace se zahrnutím imperfekcí pro strukturu FCZ [35]	27
Obr. 3-17 Výsledek jednoosé tahové zkoušky tenkého prutu z nerezové oceli 316L získaný na základě odečtu prodloužení z posuvu hlavice: a) porovnání korigovaných dat pro různé úhly stavby (výkon laseru = 140 W, čas skenování = 500 μ s), b) porovnání korigovaných dat pro odlišné procesní parametry (úhel stavby prutu 90°) [37]	29
Obr. 3-18 Rozměry modelu geometrie základní buňky tvořeného nosíkovými elementy a) BCC, b) BCCz [55]	30
Obr. 3-19 Porovnání výsledků v grafu počáteční tuhosti struktury (vlevo) a plastické deformace (vpravo) v závislosti na poměru průměru prutu k jeho délce pro strukturu typu BCC [55]	31
Obr. 3-20 a) Křivky napětí v závislosti na poměrném přetvoření prutu měřeného přímo při tahové zkoušce a nepřímě pomocí snímkových korekcí; b) křivky fitované v elastické oblasti na jednu z křivek [24]	32
Obr. 3-21 Porovnání měřené a predikované křivky stress-strain při kvazistatické deformaci (vlevo); účinnost disipace energie v závislosti na přetvoření vypočítaná na základě experimentálního měření (denzifikační přetvoření 0,66) (vpravo) [24]	33
Obr. 3-22 Efekt geometrie a počtu vrstev na mechanické vlastnosti BCCz panelu: a) modul pružnosti v tlaku, b) počáteční deformační pevnost (plné značky reprezentují výsledky simulace, prázdné značky reprezentují výsledek teoretické predikce)	34
Obr. 3-23 Ukázka základní buňky struktury BCC s červeně zvýrazněnými lokálními póry	35
Obr. 3-24 Křivky napětí v závislosti na poměrném přetvoření získaném experimentem a simulacemi a) pro strukturu s tenkými pruty, b) pro struktury s tlustými pruty	36
Obr. 3-25 a) Schéma Hopkinsonova zařízení upraveného pro vysokorychlostní tahové zkoušky, b) uchycení vzorku navrženého pro tento typ zkoušky [21]	37

Obr. 3-26 Křivky napětí v závislosti na poměrné deformaci bloků mikro-prutových struktur získaných pádovým testem v porovnání s kvazistatickou tlakovou zkouškou a MKP simulací [16]	38
Obr. 3-27 Množství energie spotřebované na deformaci struktury vztažené k její hmotnosti pro několik typů porézních struktur [11]	40
Obr. 3-28 a) Základní buňka mikro-prutové struktury octet truss bez zúžení b) zúžená geometrie jediného prutu [37]	42
Obr. 3-29 Odezva struktury při kvazistatickém jednoosém zatěžování pro různé hodnoty relativních hustot [56]	42
Obr. 3-30 Koncept hybridní geometrie: nahrazování stěn čtvercové struktury honeycomb mikro-prutovými prvky (o konstantní relativní hustotě) [33]	44
Obr. 3-31 Hodnoty SEA stanovené kvazistatickým testováním (poměrná deformace do 50 %) [33]	45
Obr. 3-32 Základní buňky mikro-prutové struktury s negativní hodnotou Poissonova čísla; (zleva doprava) typ A, B, C a D [38]	46
Obr. 3-33 Porovnání SEA v závislosti na deformaci čtyř typů mikro-prutových struktur [19]	47
Obr. 3-34 Skoková změna objemového podílu pro různé přechody mikro-prutové struktury BCC znázorněná graficky (a-b) i odpovídajícím vzorkem (c-d) [33]	48
Obr. 3-35 Rozložení lokálního přetvoření podle DIC analýzy; rychlost poměrné deformace (a) 500 s^{-1} , (b) 1000 s^{-1} [33]	50
Obr. 3-36 Základní buňka BCC struktury složená (a) z prutů konstantního kruhového průřezu ($\alpha = 1$), (b) ze zužujících se prutů ($\alpha = 0,7$); (c) Parametry popisující geometrii prutu [58]	50
Obr. 3-37 (levý) Vliv zúžení prutu na průběh napětí při deformaci struktury pro objemový podíl 10 %; (pravý) Porovnání specifické absorpce energie pro struktury s různým objemovým podílem [64]	51
Obr. 3-38 Experimentálně měřené křivky napětí-deformace mikro-prutové struktury se zúženými (červená) a konstantními (černá) pruty s objemovým podílem 0,2; (levý) kvazistatické zatěžování, (pravý) dynamické zatěžování [32]	52
Obr. 3-39 (a-c) konvenční mikro-prutová struktura typu BCC, (d-f) modifikovaná mikro-prutová struktura BCC TPMS [42]	53
Obr. 3-40 Hodnoty koeficientu (a) a exponentu (b) stanovené z křivek absorbované energie (tři opakování, střední hodnoty a odchylky) [42]	54
Obr. 5-1 Schematický postup použitých metod výzkumu	66

Obr. 5-2 Ilustrační foto konvenčních a multi-prutových vzorků pro tahovou zkoušku a struktur pro tlakovou zkoušku (SS316L)	67
Obr. 5-3 Kombinované prutové těleso pro tahovou zkoušku	68
Obr. 5-4 Rozměry základní buňky BCC (vlevo), rozměry strukturovaného vzorku (vpravo)	68
Obr. 5-5 a) fotografie vzorků pro test na modifikovaném Hopkinsonově zařízení, b) jejich CAD předloha s rozměry [16]	69
Obr. 5-6 Ilustrační příklad výběru oblasti prutu k inspekci – na struktuře (vlevo), na tahovém vzorku (vpravo)	69
Obr. 5-7 Uchycení vzorků ve stroji Zwick – tahová zkouška (vlevo), tlaková zkouška (vpravo)	70
Obr. 5-8 Schematický náčrt pádového testeru včetně detailu deformačního členu [82]	71
Obr. 5-9 Graf elasticko-plastického modelu materiálu SS316L	72
Obr. 5-10 Okrajové podmínky mikro-prutové struktury BCC [32]	73
Obr. 5-11 Osově symetrický model dynamicky zatěžované struktury [22]	74
Obr. 6-1 Multi-prutový tahový vzorek po experimentálním zatěžování	79
Obr. 6-2 Porovnání tvarů aproximujících průřez prutu (vlevo), detail částečně natavených zrn prášku (vpravo)	80
Obr. 6-3 Rozdíl mezi nominálním a měřeným průměrem prutu pro proložení průřezu kruhem (vlevo) a elipsou (vpravo); čísla nad body označují procentuální nárůst plochy průřezu v porovnání s CAD daty	81
Obr. 6-4 Porovnání měřené a teoretické hmotnosti vzorků po výrobě	81
Obr. 6-5 Závislost síly reakce na deformaci dynamicky zatěžované struktury s nominálním průměrem prutu 0,4 mm	82
Obr. 6-6 Porovnání absorbované energie pro kvazistatické a dynamické tlakové testy (vlevo); porovnání SEA pro odlišné hodnoty relativních hustot (vpravo)	82
Obr. 6-7 Porovnání experimentu a MKP úlohy (tvořené nosníkovými elementy s korekcí uzlových elementů)	83
Obr. 6-8 Porovnání kvazistatické tlakové zkoušky s numerickou simulací – využívající objemové elementy (vlevo), nosníkové elementy (vpravo)	84

11 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 6-1	Základní procesní parametry nerezové oceli 316L	78
Tab. 6-2	Výsledek chemické analýzy prášku nerezové oceli 316L	79
Tab. 6-3	Porovnání průměrné hodnoty měřených mechanických vlastností	80

