



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

Výpočtový model dynamického zatěžování mikro-prutové struktury vyrobené technologií Selective Laser Melting

NUMERICAL MODEL OF LATTICE STRUCTURE UNDER DYNAMIC LOADING MADE BY SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY

PhD projekt

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ondřej Červinek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2018

ANOTACE

Rozvoj aditivních technologií v posledních letech umožnil výrobu mikro-prutových struktur z několika typů kovových slitin. Pomocí těchto struktur je možné vyvíjet odlehčené díly, které mají potenciál v oblasti absorpce rázové energie. Jednou z předností mikro-prutového materiálu je vysoká kapacita absorpce energie vztažená k jednotce hmotnosti (SEA). Aby bylo možné použít tyto díly pro konkrétní aplikace, je nutné znát jejich chování při dynamickém zatěžování. Dosavadní výzkum ukázal, že tyto struktury jeví specifický druh chování v porovnání se základovým materiálem. Za účelem efektivního využití mikro-prutových struktur pro absorpci energie je nutné matematicky popsat jejich deformační chování. Tato práce je zaměřená na posouzení chování mikro-prutové struktury typu BCC a jejich modifikací při dynamickém zatěžování. Struktura je vyrobena z nerezové oceli 316L technologií Selective Laser Melting. Cílem práce je vytvořit dynamický výpočtový model, který bude reflektovat jevy spojené s rychlostí zatěžování struktury. Parametrická studie založená na tomto modelu povede k nalezení výhodné konfigurace pro absorpci rázové energie.

KLÍČOVÁ SLOVA

Selective Laser Melting, dynamické testování, metoda konečných prvků, absorpce energie, ANSYS Explicit

ANNOTATION

Development of additive technologies in recent years enabled manufacturing of lattice structures from several types of metal alloys. With these structures is possible to develop light-weight parts with potential in the field of impact energy absorption. One of the advantages of lattice structured material is high level of specific energy absorption (SEA). In order to use these parts for specific applications is required to evaluate their dynamic loading behaviour. Recent research shown that these structures appear atypical type of properties compared to the base material. In order to efficient use of lattice structures for energy absorption applications, their deformation behaviour must be mathematically described. This paper focuses on behaviour of BCC lattice structure and its modifications under dynamic loading. The structure is made of stainless steel 316L using Selective Laser Melting. The main point of interest is to create a dynamic numerical model which reflects effect connected with strain-rate dependency of the structure. A parametric study based on this model will serve to find high performance energy absorption configuration.

KEYWORDS

Selective Laser Melting, dynamic testing, finite element method, energy absorption, ANSYS Explicit

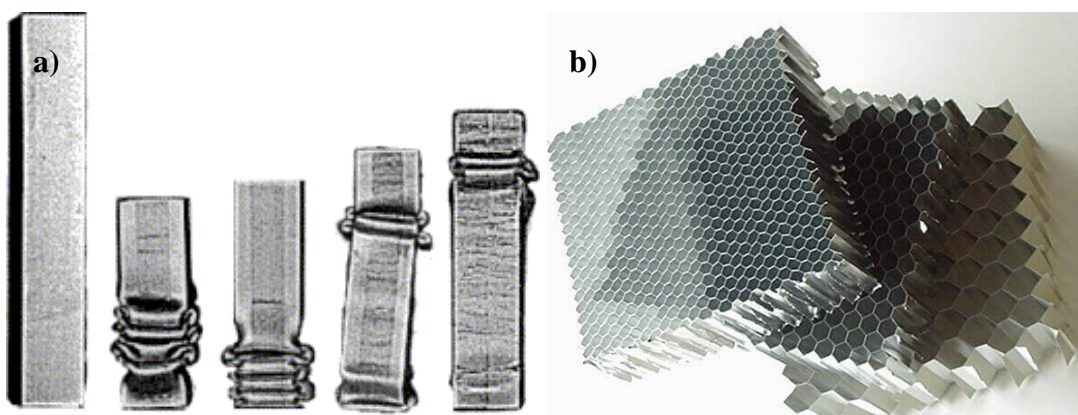
OBSAH

1	ÚVOD	4
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	6
2.1	Obecný přehled problematiky	6
2.2	Klíčové studie	9
3	ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ	34
3.1	Absorpční vlastnosti struktury	34
3.2	Vliv materiálu a geometrie	34
3.3	Přístupy k vytvoření simulace	35
3.4	Nezmapovaná oblast poznání	37
4	PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE	38
4.1	Podstata disertační práce	38
4.2	Cíle práce	38
4.3	Přínos práce	39
5	VĚDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÍ HYPOTÉZY	40
6	ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY ZKOUMÁNÍ	41
6.1	Dynamická MKP	41
6.2	Výroba testovacích vzorků	44
6.2.1	Testovaná struktura	44
6.2.2	Příprava dat pro výrobu	44
6.2.3	Vzorky	45
6.3	Rozměrová analýza	47
6.4	Mechanické testování	47
6.4.1	Kvazistatické testování	48
6.4.2	Dynamické testování	48
7	ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ	50
8	ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY	51

9	SPOLUPRÁCE S JINÝMI INSTITUCEMI	52
10	PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY SPOJENÉ S ŘEŠENÍM A JEJICH ZDROJE	53
11	CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU	54
12	BIBLIOGRAFIE	55
13	VĚDECKÝ ŽIVOTOPIS	61

1 ÚVOD

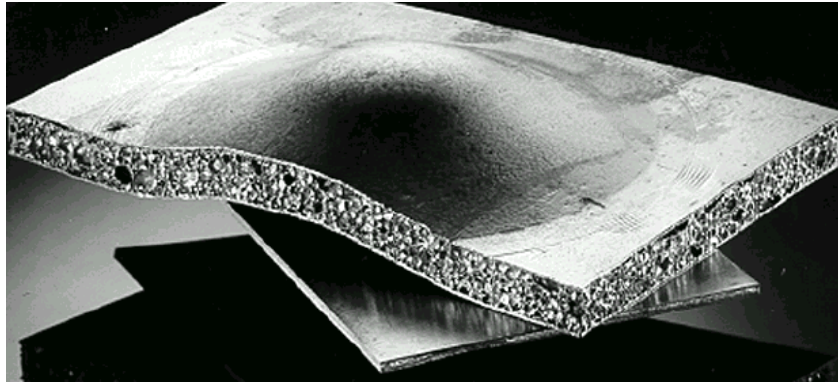
V současné době se pro tlumení velkých rázů mechanické energie (např. náraz automobilu) využívají především absorbéry ze speciálních profilů. Jejich hlavním účelem je disipace kinetické energie v průběhu rázového děje [1, 2]. Společným rysem absorbérů je snaha o rovnoměrné pohlcení energie rázového zatížení v čase při jejich současné deformaci. Obecně je možné tyto absorbéry dělit podle několika kritérií, například na elasticky (opakovaně) a plasticky (jednorázově) deformované. Mezi nejpoužívanější plasticky deformované absorbéry patří speciálně tvarované trubky a jekly z měkkých ocelí nebo hliníkových slitin [3, 5] (viz Obr. 1-1a)). Změnou tvaru a použitého materiálu lze tyto absorbéry přizpůsobit pro konkrétní využití. Výhodou je jejich nenáročná výroba.



Obr. 1-1 Příklady absorbérů energie – a) čtyřhranný profil (jekl) i s deformací [62], b) plát porézní struktury honeycomb [31]

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 [3, 4] nebo strukturu typu *honeycomb* [6] (viz Obr. 1-1 b)). 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.

V některých případech jsou druhy absorbérů kombinovány pro dosažení vyššího absorpčního účinku a univerzálnosti použití [8] (viz Obr. 1-2). Tím je především získána vyšší efektivita absorpce energie oproti samostatnému využití porézního materiálu.



Obr. 1-2 Absorbér s porézním jádrem a okrajovými pláty plného materiálu [8]

Alternativní možností je využití strukturovaných dílů vyrobených aditivní technologií 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 dvou typů. V porovnání s využitím hliníkových pěn [10] lze takto zpracovávat více druhů kovových materiálů, jako jsou např. titanové slitiny nebo nástrojové oceli. Dalšími benefity jsou velká tvarová volnost a možnost poměrně přesného řízení tvaru mikro-prutových struktur. Pomocí toho lze navrhnout strukturovaný materiál na specifický objemový podíl a tím řídit například jeho tuhost [20].

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

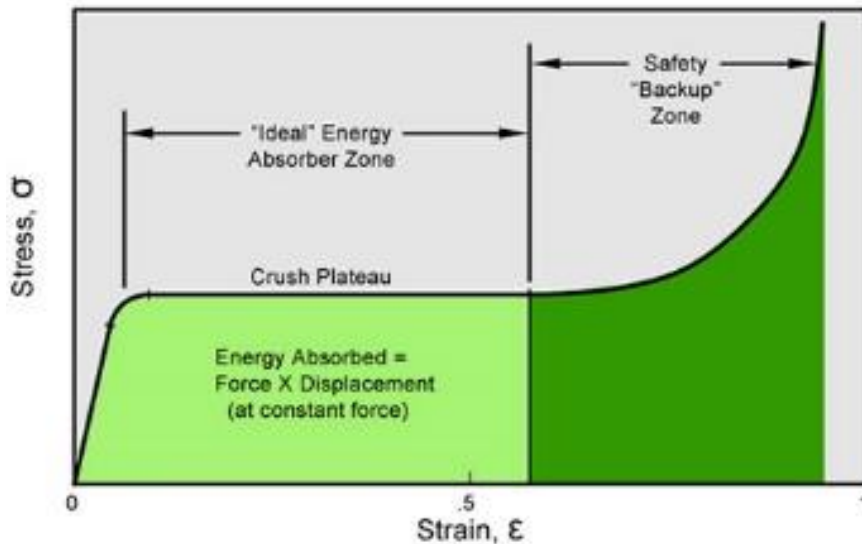
2.1 Obecný přehled problematiky

Pro absorpci rázové energie, například v dopravním průmyslu, jsou běžně využívány speciálně tvarované profily z plechů, trubek a jeklů. Vhodným tvarováním geometrie dílů lze zvýšit množství energie, které je schopen absorbér při své deformaci disipovat jak ukázal **Ahmad** a kolektiv (2009) [11]. 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). Tento skokový nárůst síly je nežádoucí a může ohrozit posádku vozidla.

Nové aplikace kombinují tyto konvenční absorbéry s porézními materiály [1] za účelem zvýšení jejich absorpčním účinků při současné redukci silového píku, čehož využil **Ahmad** a kolektiv (2009) [12] ve své další studii. Nejčastěji používanými materiály jsou hliníkové pěny nebo struktury typu *honeycomb*, které porovnával **Mines** a kolektiv (2013) [7]. Použitím pěn o různých hustotách lze docílit odlišného množství absorbované energie při ekvivalentních deformacích absorbérů [11]. Vliv na to má i směr zatěžování.

V optimálním případě by mělo při zatěžování struktury dojít k plynulému přechodu z oblasti elastických deformací do oblasti rovnoměrných plastických deformací, které budou probíhat do zhutnění porézního materiálu (viz Obr. 2-1) [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 [15]. Po této oblasti by měla následovat oblast zhutňování materiálu, za kterou již není absorbér schopen disipovat energii. Některé ze současných kovových pěn se tomuto modelu přibližují.

Masivní rozvoj aditivních technologií v posledních letech umožnil využívat nové typy porézního materiálu, který má potenciál v aplikacích uvažujících absorpci rázové energie, čehož využil **Vrána** (2014) a další autoři [14, 15, 16]. Jedná se o mikro-prutové struktury vyrobené technologií Selective Laser Melting (SLM) [7, 9, 19–21]. Porovnáním mikro-prutových struktur se strukturami typu *honeycomb* a hliníkovými pěnami bylo zjištěno [17, 22], že mohou dosahovat podobného potenciálu v oblasti absorpce rázové energie. Navíc lze pro výrobu těchto struktur použít celou škálu materiálů (SS316L, Ti₆V₄Al, AlSi₁₀Mg...). Geometrii mikro-prutových struktur je možné řídit poměrně přesně a parametricky ji navrhnout na cílený druh deformace nebo množství absorbované energie, jako to udělal **Ozdemir** a kolektiv (2017) [20, 23, 24].



Obr. 2-1 Optimální chování napětí v závislosti na poměrné deformaci absorbéru při zatěžování [22]

Aby bylo možné přesně řídit vlastnosti strukturovaných dílů při dynamickém zatížení, je nutné predikovat průběh deformace při zatížení nárazem výpočtovým modelem [25]. Tento model obsahuje poznatky o vlastnostech struktur získané mechanickým testováním, jak ukázal **Mines** a kolektiv (2011) [22]. Pro popis mechanických vlastností mikro-prutové struktury je třeba provést tahové a tlakové testy strukturovaného materiálu.

Z důvodu nákladného návrhu absorbéru se provádějí zjednodušené experimenty a numerické simulace. Pro simulace se využívají softwary pracující s dynamickými MKP analýzami [26–28]. Tyto analýzy spočívají ve výpočtovém řešení interakcí rázových vln nebo pevných projektilů se sendvičovými bloky, které reflektují podmínky experimentů, čehož jako jeden z prvních využil **Grytten** a kolektiv (2008) [29]. Pomocí simulace je možné provádět změny modelu geometrie a pozorovat jejich dopad na chování struktury bez nutnosti její výroby.

Pro vytvoření spolehlivého výpočtového modelu je třeba přesně definovat okrajové a počáteční podmínky, sestavit model geometrie a definovat model materiálu [19, 29, 30]. Sérii nastavení simulací pro mikro-prutové struktury určil **Labeas** a kolektiv (2013) [9]. K vytvoření modelu geometrie lze přistupovat několika způsoby:

1. Je použita zjednodušená geometrie prutů struktury. Ty jsou modelovány jako nosníkové elementy typu *beam* (Timoshenko), kterým je přidělen kruhový průřez prutu [19, 22]. Tento přístup využil **Labeas** i **Mines** ve svých studiích (2013 a 2011). Výsledná přesnost výpočtu nicméně není vysoká, neboť elementy tohoto typu nereflakují ohybové momenty, které vznikají v uzlech struktury při jejím zatěžování.

2. Je použita zjednodušená geometrie struktury. Celá struktura je nahrazena blokem kubických *solid* elementů s vlastnostmi struktury [9]. Každá základní buňka je reprezentována jedním nebo více elementy. Tento přístup umožňuje výpočty i rozměrných struktur, protože je rychlý. Na druhou stranu není přesný a vyžaduje dodatečné úpravy.
3. Je použita geometrie prutů se zahrnutím imperfekcí výroby. Jednotlivé pruty jsou modelovány pomocí čtyřstěnných elementů typu *solid* i s nedokonalostmi výroby. Tento přístup realizoval **Vrána** (2018) [24] ve své studii, přičemž pro jeho dosažení využil metod optické digitalizace. Je ze zmíněných metod nejpresnější, ale vyžaduje nejdelší výpočetní časy.

Model materiálu zásadním způsobem ovlivňuje chování struktury v MKP při jejím zatěžování, a proto by měl co nejlépe popisovat vlastnosti skutečné struktury. Na základě kvazistatických testů je možné získat vstupní hodnoty standardně využívaného elasticko-plastického (bilineárního, případně multilineárního materiálového modelu) [13, 24, 31]. Tento model je poté možné doplnit o kritérium poškození struktury, které popsal **Grytten** a kolektiv (2009) [29]. Vstupní hodnoty modelu získané z kvazistatických testů nicméně plně nereflektují chování materiálu při dynamickém zatěžování, jak zjistil **Fang** a kolektiv (2010) [32]. 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.

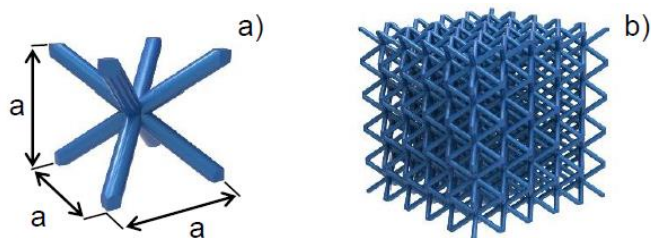
Nejvíce se při deformaci struktury projevuje citlivost základového materiálu na rychlost poměrné deformace, což vyvodil **Gümruk** a kolektiv ze závěrů své studie (2018) [21]. Tento efekt je potřeba zanést do materiálového modelu v dynamické MKP simulaci. Toho je možné docílit například přidáním Cowper-Symondsova vztahu, použitého již **Ahmadem** (2009), ke stávajícímu elasticko-plastickému modelu [11, 21]:

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

kde σ'_o je dynamicky působící napětí při jednoosé plastické deformaci o poměrné rychlosti 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 provedení dynamické tahové zkoušky na modifikovaném Hopkinsonově zařízení (*split Hopkinson pressure bar*), které popsal ve své práci **Gümruk** a kolektiv (2018) [21]. Sérii měření byly získány hodnoty napětí při různých rychlostech poměrné deformace, které byly proloženy křivkou. Z křivky byly následně odečteny hodnoty materiálových konstant. Podobným způsobem je možné do materiálového modelu zavést některý z konstitutivních vztahů deformačního zpevnění, jako to udělal **Harris** a kolektiv (2017) [33].

Důležitý je také výběr samotné mikro-prutové struktury. Testováním několika typů těchto struktur se zabýval **Aremu** a kolektiv (2014) [34]. Porovnával jednotlivé buňky struktur i samotné struktury při kvazistatickém zatěžování v MKP softwaru. Podle jeho závěrů byla ze sledovaných buňka s nejvyšší tuhostí FCC a struktura s nejvyšší tuhostí PFCC. Na tuto studii navázal **Vrána** a kolektiv (2016) [35], který podrobil několik typů mikro-prutových struktur pádovým testům. Při tom bylo zjištěno, 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. 2-2).



Obr. 2-2 Prutová struktura BCC a) základní buňka b) struktura [35]

S tímto typem struktury dále pracoval **Dejean-Tancogne** a kolektiv (2018) [20], který dynamicky testoval její modifikovanou geometrii za účelem dosažení zvýšené absorpce energie. Výsledky numerických simulací i experimentu ukázaly, že je možné toho dosáhnout i bez vzniku silového píku v počátku zatěžování. Odlišný přístup u stejné struktury volil **Zhao** a kolektiv (2018) [36], který pro zvýšení mechanických vlastností struktury BCC použil její matematicky definované modifikace. Tím došlo k odstranění ostrých hran v uzlech prutů, což mělo za následek pokles výskytu imperfekcí na jejím povrchu. Kvazistatické tlakové zkoušky ukázaly více než dvojnásobný nárůst pohlcené energie oproti původní konfiguraci. Potenciál struktury typu BCC tímto stále nebyl vyčerpán. Modifikace geometrie této mikro-prutové struktury by měly být v budoucnu testovány i dynamicky.

2.2 Klíčové studie

V oblasti výzkumu mikro-prutových struktur vyráběných aditivními technologiemi pro účely absorpce rázové energie vznikla celá řada studií. Pro vypracování tohoto projektu jsou některé z nich klíčové. Následující kapitola obsahuje jejich detailní analýzu.

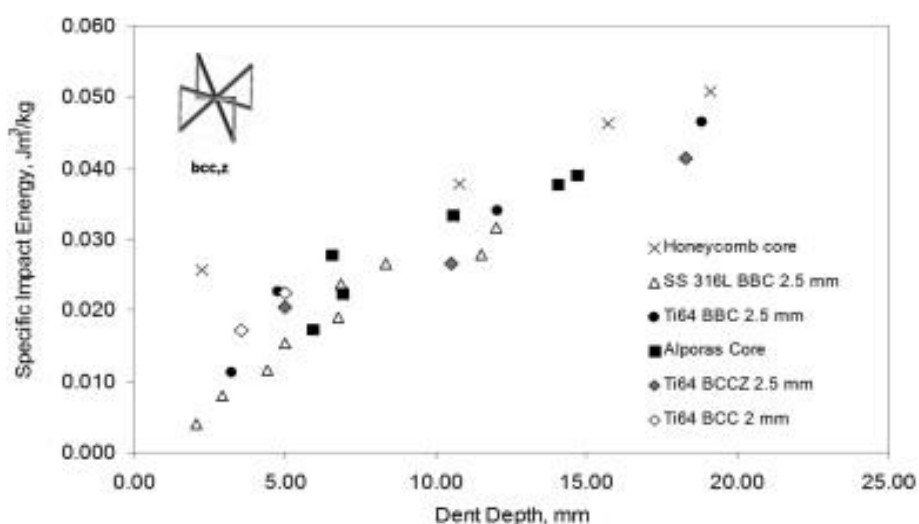
Drop weight behaviour of sandwich panels with metallic micro lattice cores (Mines, 2013) [7]

Cíl práce: Pomocí kvazistatických a dynamických mechanických testů porovnat 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.

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

Získané poznatky: Chování mikro-prutových struktur bylo porovnáno při pádovém 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 cizího tělesa jako struktura typu *honeycomb*. Struktura vyrobená z nerezové oceli dosahovala vyšší kvality povrchu po výrobě a vykazovala nižší citlivost 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. 2-3) vztažené k průměrné hustotě vzorku – specifická rázová energie (SIE). Tímto parametrem bylo možné porovnat vzorky s odlišným objemem struktury z různých materiálů. Výsledky ukázaly porovnatelné množství energie absorbované pro všechny typy struktur, přičemž nejvyšších hodnot dosahovala struktury typu *honeycomb*.



Obr. 2-3 Množství energie spotřebované na deformaci struktury vztažené k její hmotnosti pro několik typů porézních struktur [11]

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 imperfekcemi by měly být zahrnuty v geometrii dynamické simulace.

Význam a užitečnost: 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 .

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 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.

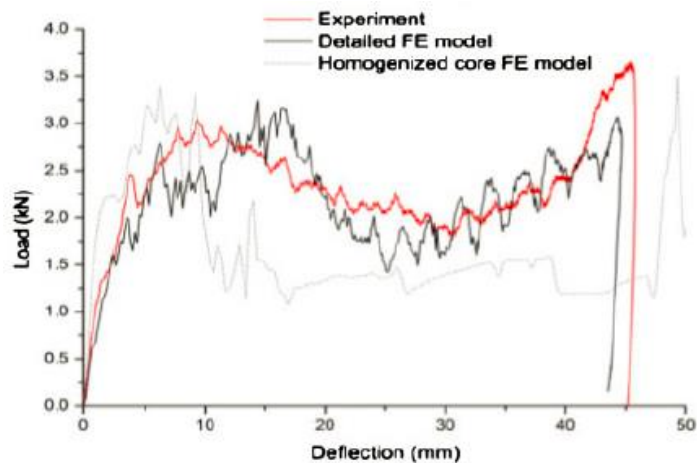
Investigation of sandwich structures with innovative cellular metallic cores under low velocity impact loading (Labeas, 2013) [9]

Cíl práce: Zmapovat proces deformačního chování mikro-prutových struktur vyrobených z nerezové oceli 316L technologií SLM při nízko-rychlostním dynamickém zatěžování.

Testované hypotézy: Numerické MKP simulace dynamických dějů je možné použít pro detailní porozumění procesům probíhajícím uvnitř struktur při progresivní deformaci.

Získané poznatky: V průběhu studie byly vyvinuty dva numerické modely predikující průběh deformace mikro-prutové struktury typu BCC při nízko-rychlostním zatěžování odpovídající pádovému testu. První typ modelu uvažoval vytvoření geometrie modelu mikro-prutové struktury pomocí *beam* elementů, které reprezentovaly jednotlivé pruty struktury. Druhý typ modelu nahradil mikro-prutovou strukturu blokem *solid* elementů s vlastnostmi ekvivalentnímu strukturovanému materiálu. Oba dva přístupy vyžadovaly samostatné definování modelů materiálu a okrajových podmínek. Při jejich porovnání s experimentem (viz Obr. 2-4) pro různé hladiny zatěžující energie bylo zjištěno, že MKP simulace provedená podle prvního přístupu dokáže lépe reflektovat skutečný průběh experimentu (pro oblast progresivních deformací – mezi dvěma silovými píky).

Význam a užitečnost: Při vytváření modelu materiálu nerezové oceli 316L strukturovaných vzorků v simulaci byl zohledněn vliv výrobní technologie SLM na mechanické vlastnosti výsledného dílu – vstupní hodnoty byly získány na základě kvazistatické tahové zkoušky prutů a tlakové zkoušky bloků struktury. Model byl vybrán na základě průběhu napětí v závislosti na poměrném přetvoření u tlakové zkoušky struktury.

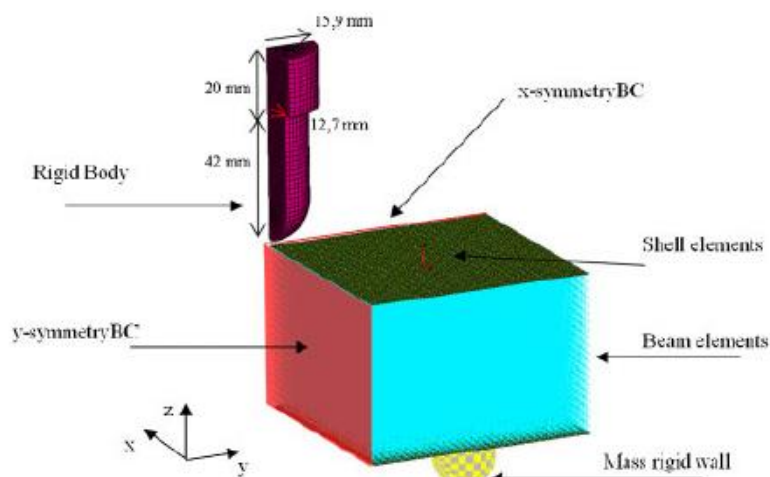


Obr. 2-4 Porovnání experimentálních a vypočítaných deformací bloku s BCC jádrem [9]

Numerická simulace pádového testu byla provedena v explicitním MKP řešiči PAM-Crash s následujícími okrajovými podmínkami (viz Obr. 2-5):

- Prutová struktura jádra byla vytvořena nosníkovými elementy typu *beam*.
- 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 jádro zaveden model materiálu *bilinear plasticity*.
- Na pláty panelu byla aplikována polygonální síť *layered shell* 163 prvků.
- Pro jádro z prutové struktury byl definován sebe-protínající kontakt *type 46*.
- Mezi indentorem a horním plátem bloku byl definován kontakt *type 33*.

Použití modelu materiálu se neobešlo bez kalibrace vstupních parametrů.



Obr. 2-5 Model nárazového testu při použití čtvrtinové symetrie (PAM-Crash) [9]

Pro významné zkrácení výpočetních časů byl vytvořen zjednodušený numerický model zahrnující strukturu modelovanou jako blok elementů s vlastnostmi struktury. Každá základní buňka struktury byla reprezentována jedním nebo více elementy. K vytvoření modelu bylo využito softwaru LS DYNA. Okrajové podmínky i modelované povrchové pláty zůstaly zachovány. Došlo k obměně materiálových modelů:

- Jako model materiálu plátů sloužil model *Mat-54* s příslušným kritériem poškození.
- Jádru bylo modelováno jako plný materiál s polygonální sítí typu *solid 164*.
- Jako model materiálu jádra byl zvolen typ *Mat-26 (Honeycomb)*.

Homogenization of selective laser melting cellular material for impact performance simulation (Labeas, 2015) [19]

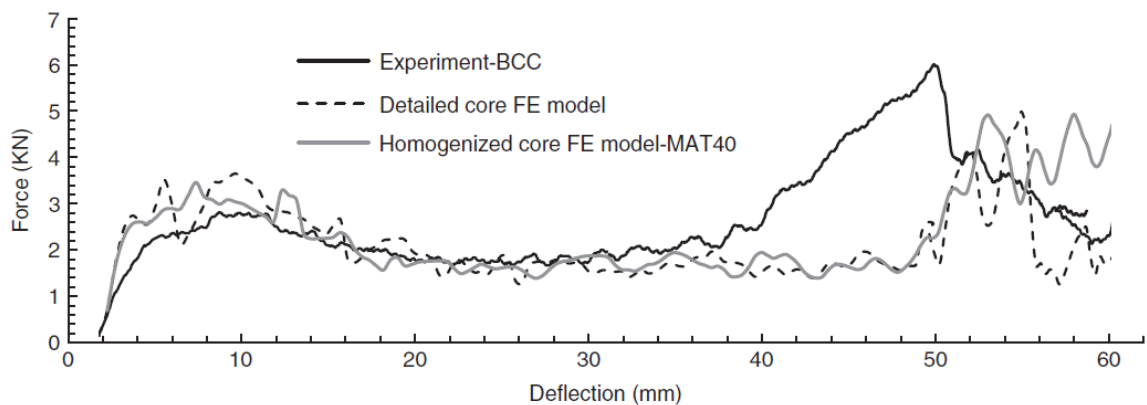
Cíl práce: Otestovat rozdílné přístupy při vytváření numerické simulace dynamického zatěžování mikro-prutových struktur vyrobených aditivními technologiemi.

Testované hypotézy: Nahrazení struktury blokem *solid* elementů s vlastnostmi strukturovaného materiálu může vést k řešení interakcí poměrně komplexních soustav při dynamickém zatěžování bez poklesu přesnosti výsledku.

Získané poznatky: Model geometrie uvažující skutečné rozmístění prutů mikro-prutové struktury byl 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 materiálového modelu pro napětí v závislosti na poměrném přetvoření.

Autoři zmínili budoucí potřebu využívání validovaných výpočtových modelů pro účely virtuálního testování různých typů materiálu, průměru prutů a geometrických konfigurací. To by mělo být provedeno za účelem přizpůsobení mikro-prutových struktur pro konkrétní aplikace.

Význam a užitečnost: Při vytváření simulací využili autoři dvou přístupů, podobným těm, které popsali v minulé studii. Jako materiálový model zjednodušené geometrie struktury byl tentokrát využit *Mat-40* za účelem zpřesnění výpočtu. Pro validaci MKP simulací bylo opět použito experimentálně provedeného pádového testu (viz Obr. 2-6). Výsledky obou simulací tentokrát v porovnání s experimentem vykazovaly podobný průběh v elastické oblasti i oblasti progresivních deformací struktury. Při nastupujícím zhuťování materiálu přestaly simulace reflektovat vývoj sledovaných veličin experimentu.



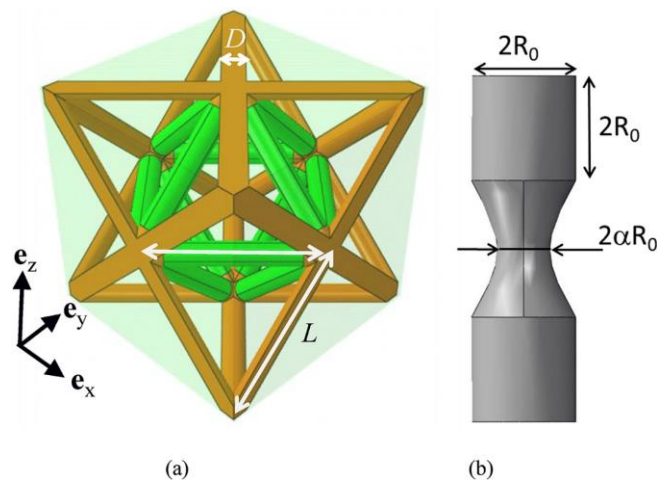
Obr. 2-6 Porovnání síly v závislosti na deformaci pro pádový test (206 J)

Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading (Dejean-Tancogne, 2016) [37]

Cíl práce: Zmapovat deformační chování modifikací mikro-prutových struktur vyrobených z nerezové oceli 316L technologií SLM při kvazistatickém a dynamickém zatěžování.

Testované hypotézy: Vhodným parabolickým zúžením prutů lze dosáhnout monotónního růstu napětí při zatěžování a deformaci struktury s jejím současným zvýšením tuhosti.

Získané výsledky: Použití mírně zúžených osově symetrických prutů (viz Obr. 2-7 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).



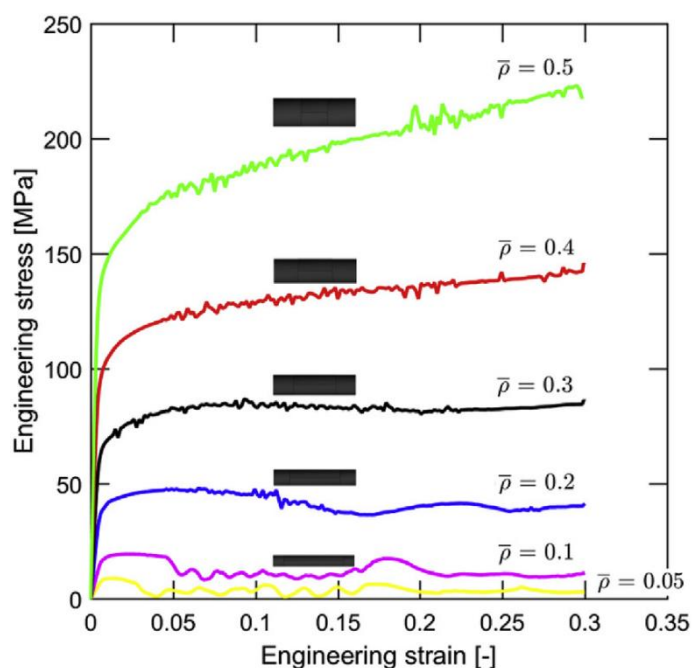
Obr. 2-7 a) Základní buňka mikro-prutové struktury octet truss bez zúžení b) zúžená geometrie jediného prutu [37]

Deformační chování mikro-prutové struktury *octet truss* (viz Obr. 2-7 a)) se stalo stabilním při relativních hustotách vyšších než 0,3 (viz Obr. 2-8). Při této relativní hustotě začala být křivka napětí v závislosti na poměrném přetvoření deformované struktury monotónně vzrůstající.

SEA (definovaná jako energie absorbovaná do poměrné deformace o velikosti 0,3 vztažená k hmotnosti vzorku) byla monotónně rostoucí funkcí relativní hustoty. Pro mikro-prutovou strukturu z nerezové oceli 316L byl typický výskyt oblasti rovnoměrných deformací (rovnoměrného napětí), 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*.

Pokusy 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.



Obr. 2-8 Odezva struktury při kvazistatickém jednoosém zatěžování pro různé hodnoty relativních hustot [37]

Význam a užitečnost: MKP simulace byly vytvořeny za účelem predikce velkých poměrných deformací 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 elastického chování byla geometrie omezena na pruty s kruhovým průřezem. Všechny konfigurace prutů měly na koncích konstantní průřez a ve středu byly parabolicky zúženy. Pro všechny typy struktur byly vytvořeny polygonální sítě s velikostí elementu 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.

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

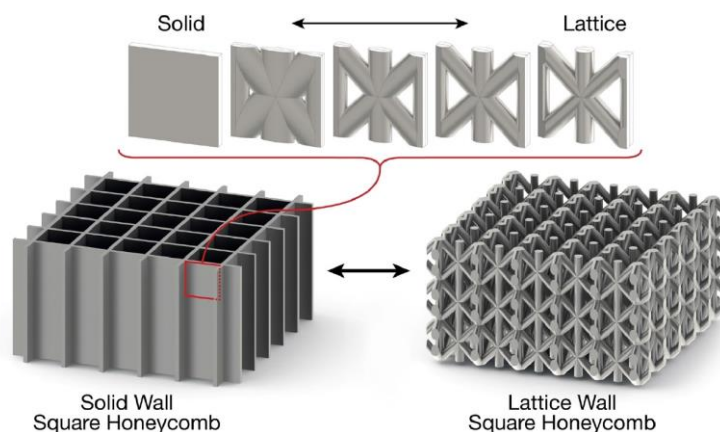
Impact response of additively manufactured metallic hybrid lattice materials
(Harris, 2017) [33]

Cíl práce: Posoudit dopad změny procesních parametrů výroby a geometrie struktury vyrobené z nerezové oceli 316L technologií SLM na mechanické vlastnosti při dynamickém zatěžování.

Testované hypotézy: Mechanické vlastnosti konvenčních poréznych struktur vyrobených aditivními technologiemi mohou dosahovat vyšších hodnot při částečné modifikaci jejich geometrie na mikro-prutové struktury.

Získané výsledky: Na začátku studie byla navržena aditivně vyrobiteľná *honeycomb* struktura, které byla uměle navýšena porozita nahrazením jejich stěn mikro-prutovými prvky o stejné relativní hustotě (viz Obr. 2-9). Při dynamickém zatěžování hybridní geometrie výrazně překonala vlastnosti mikro-prutových struktur vyráběných v minulých studiích Harris [38, 39]. Zvýšení hodnot mechanických vlastností bylo zaznamenáno v případě pevnosti, SEA a efektivity absorpce.

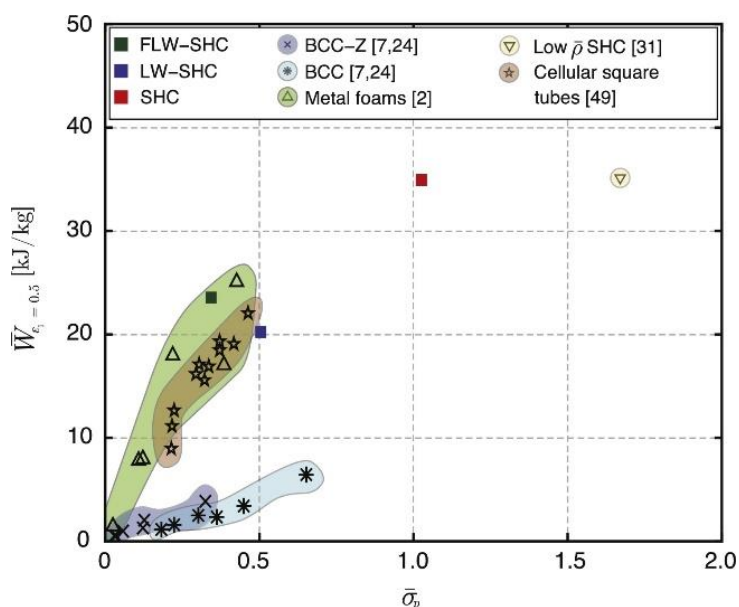
V průběhu studie byly vyrobeny geometrické konfigurace mikro-prutových struktur s různými průměry prutů. V případech, kdy se průměr prutu začínal blížit průměru ohniska laseru výrobního zařízení, docházelo k velkým odchylkám hodnot relativních hustot oproti nominálním (velký přírůstek materiálu). Během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



Obr. 2-9 Koncept hybridní geometrie: nahrazování stěn čtvercové struktury honeycomb mikro-prutovými prvky (o konstantní relativní hustotě) [33]

Součástí studie bylo také kvazistatické zatěžování ($0,6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, což odpovídalo rychlosti relativní 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 BCC-Z. Při porovnání se strukturou typu *honeycomb* vyrobenou aditivními technologiemi však byly tyto hodnoty nižší (viz Obr. 2-10).

Silový pík působící na počátku deformace struktury byl v případě *honeycomb* mnohem větší v porovnání s mikro-prutovými strukturami. Největší účinnosti při dynamickém zatěžování dosahovaly vzorky z *honeycomb* struktury při nižších a vyšších rychlostech (50 a $150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). 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. 2-10 Hodnoty specifické absorpce energie 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 $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Význam a užitečnost: Součástí studie bylo i provedení tahových testů objemových vzorků (*dogbone*). Výsledné křivky závislosti skutečného napětí σ_t na logaritmičtěm poměrném 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:

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

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

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

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

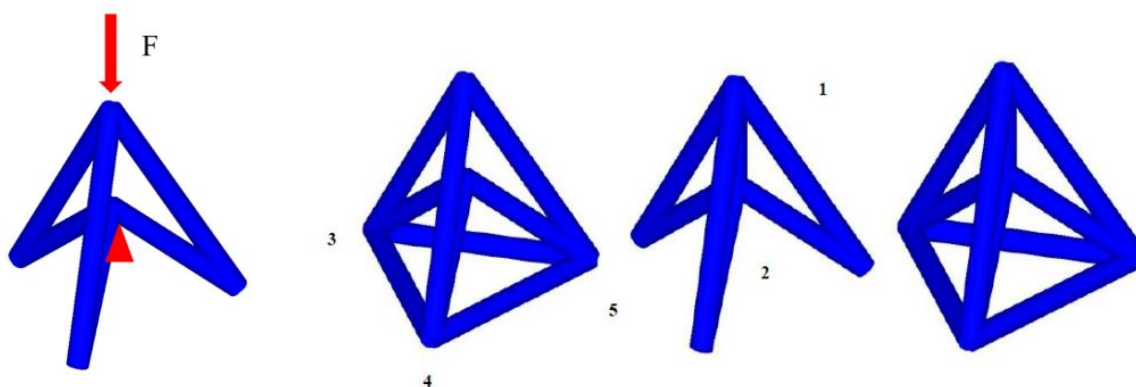
Vztahy lze využít při vytváření modelu chování zatěžovaných austenitických nerezových ocelí vyrobených aditivními technologiemi. Každý z nich reprezentuje mírně odlišný vývoj napětí v závislosti na poměrné deformaci.

Novel negative Poisson's ratio lattice structures with enhanced stiffness and energy (Chen, Z., 2018) [40]

Cíl práce: Zvýšit tuhost, pevnost a kapacitu absorbované energie mikro-prutových struktur vyráběných aditivními technologiemi s negativními hodnotami Poissonova čísla.

Testované hypotézy: Implementací vhodné kombinace podpůrných žebër do struktur lze docílit zvýšení Youngova modulu, meze kluzu a působícího napětí při deformaci a zhutnění struktury.

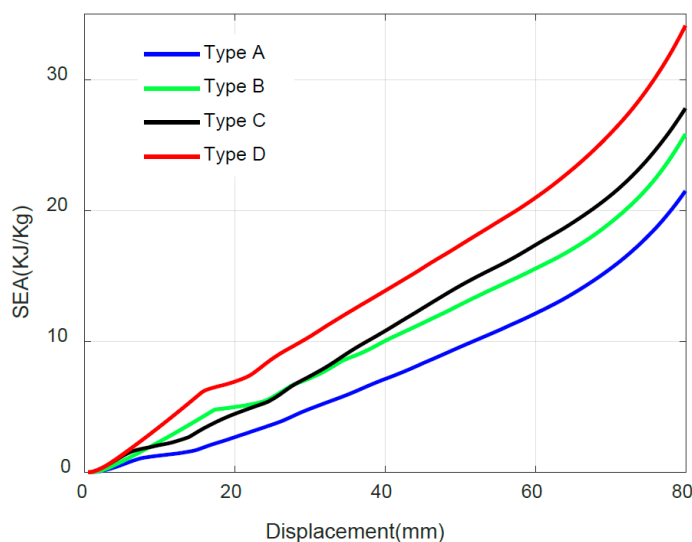
Získané výsledky: Výzkumný tým chtěl dosáhnout příčného rozšíření struktur při tahovém namáhání implementací různých typů žebër do konvenční struktury (viz Obr. 2-11).



Obr. 2-11 Základní buňky mikro-prutové struktury s negativní hodnotou Poissonova čísla; (zleva doprava) typ A, B, C a D [38]

Studie byla realizována prostřednictvím 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 (viz Obr. 2-12).

Porovnáním experimentu se simulací byly zjištěny minimální rozdíly, přičemž celkové trendy křivek byly podobné. Dále byly porovnány SEA různých konfigurací struktur na základě MKP simulace. 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. 2-12 Porovnání specifické absorpce energie v závislosti na deformaci čtyř typů mikro-prutových struktur [40]

Autoři studie na závěr 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.

Význam a užitečnost: 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. Ze softwarové knihovny byl zvolen typ Belytschko-Schwer, který dokázal simulovat plastické ohyby, protahování a torzní namáhání. Pro vytvoření modelu materiálu byl použit empirický konstitutivní Johnson-Cookův vztah (MAT-98) se zanedbáním vlivu teploty:

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

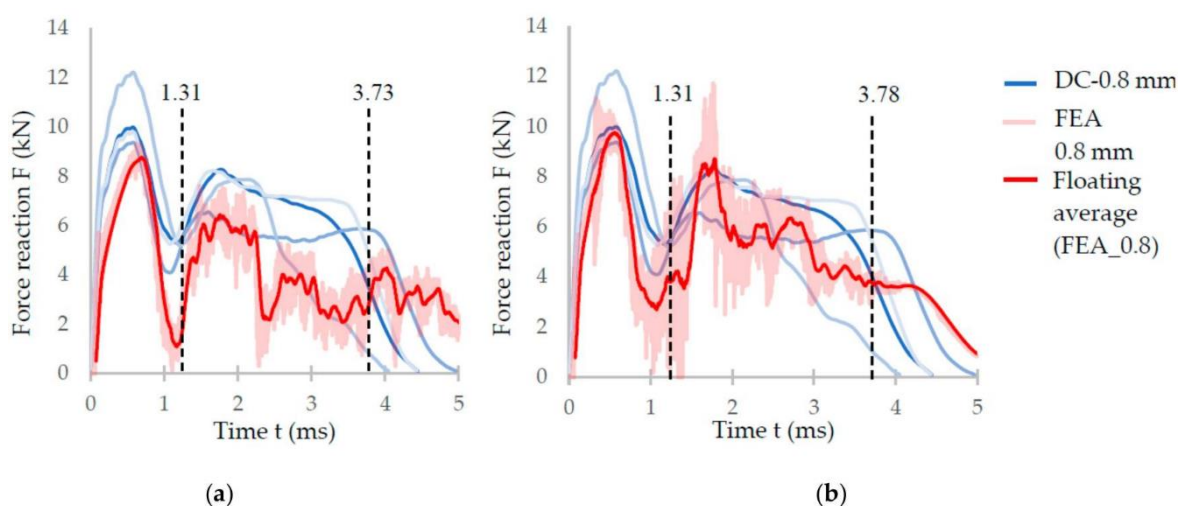
Hodnoty parametrů použité ve studii ($A = 448 \text{ MPa}$; $B = 343 \text{ MPa}$; $C = 0,01$; $n = 0,41$) byly definovány pro hliníkovou slitinu 7075. Indentor byl modelován jako dokonale tuhý pohyblivý plát (MAT-20). Pro přenos působících sil mezi indentorem a strukturou byl definován tzv. jednosměrný kontaktní algoritmus (CONTACT AUTOMATIC NODES TO SURFACE), který zahrnoval pouze elementy struktury aktuálně interagující s elementy indentoru. 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.

Dynamic loading of lattice structure made by selective laser melting – numerical model with substitution of geometrical imperfections (Vrana, 2018) [24]

Cíl práce: Vytvořit výpočtový model dynamicky zatěžované mikro-prutové struktury vyrobené technologií SLM z hliníkové slitiny AlSi₁₀Mg a validovat ho pomocí pádového testu.

Testované hypotézy: Zahrnutí výrobních imperfekcí struktur do modelu geometrie v simulaci povede k přiblížení výsledků experimentálně získaným hodnotám.

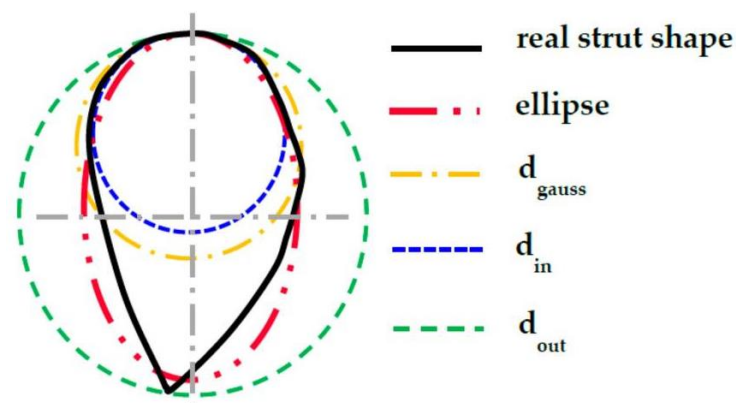
Získané výsledky: Výsledky ukázaly (viz Obr. 2-13), že zahrnutím výrobních imperfekcí do modelu geometrie úlohy došlo k jejich přiblížení k reálným hodnotám. Průběh i maximální velikosti deformace, doby deformace i sil reakce se více blížily experimentu. Z důvodu nízké zatěžující rychlosti (kolem 3 m·s⁻¹) autoři neuvažovali vliv rychlosti poměrné deformace na chování materiálu, což mohlo způsobit zvětšení odchylky od experimentu.



Obr. 2-13 a) Porovnání výsledků experimentu a simulace bez zahrnutí imperfekcí, b) porovnání se zahrnutím imperfekcí [24]

Testovány byly konfigurace mikro-prutové struktury typu BCC s různými průměry prutu (0,6-1,2 mm) ve dvou módech zatěžování (plošné a průřezem). V případě plošného zatížení došlo ke zpřesnění odhadu průběhu veličin MKP výpočtem i pro struktury s odlišným průměrem prutu. V případě zatěžování průřezem nebyl tento benefit natolik patrný. Pro zvýšení efektivity tohoto postupu by měly být provedeny kalibrační mechanické zkoušky pro všechny průměry uvažovaných prutů.

Význam a užitečnost: Tým sestavil numerickou simulaci pádového děje, která byla experimentálně validovaná. Pro její sestavení bylo využito kvazistatických mechanických zkoušek (tahová a tlaková zkouška). Na základě těchto testů byla vyhodnocena mez kluzu, modul pružnosti, tečný modul a mez kritického poměrného přetvoření do poškození vzorku. Získané hodnoty byly použity při sestavování elasticko-plastického modelu materiálu s doplňujícím kritériem poškození polygonální sítě materiálu. Toto kritérium spočívalo v přerušení vazeb mezi elementy s jejich následným vymazáním při dosažení kritické hodnoty přetvoření.



Obr. 2-14 Elementy použité pro popis skutečného průřezu prutu po optické digitalizaci [24]

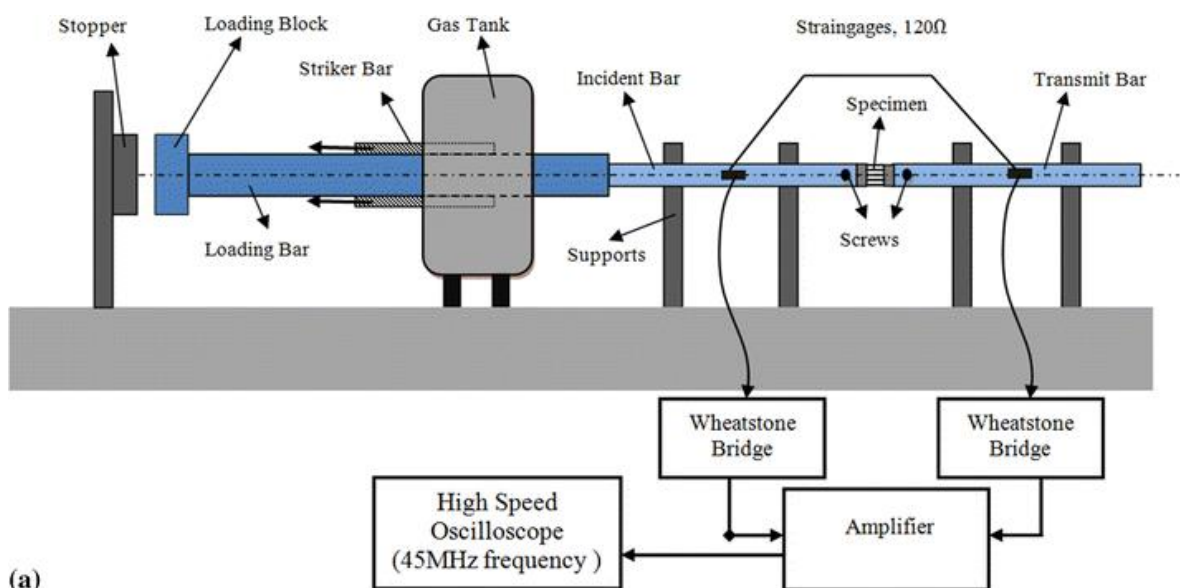
Za účelem vytvoření modelu geometrie mikro-prutové struktury byly vzorky podrobeny optické digitalizaci 3D skenerem ATOS Triple Scan. Na základě vzniklých skenů byly v softwaru GOM Inspect změřeny skutečné rozměry i průřezy prutů. (viz Obr. 2-14). Z těchto dat byly vyhodnoceny hodnoty průměrné velikosti 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), neboť ty dokázaly reflektovat nově vzniklou geometrii a přenos napětí při dynamickém zatížení. Součástí vytvoření modelu geometrie bylo také provedení parametrické studie sledující velikost elementů na měnících se výstupních hodnotách.

Determination of strain rate sensitivity of micro-struts manufactured using the selective laser melting method (Gümrük, 2018) [21]

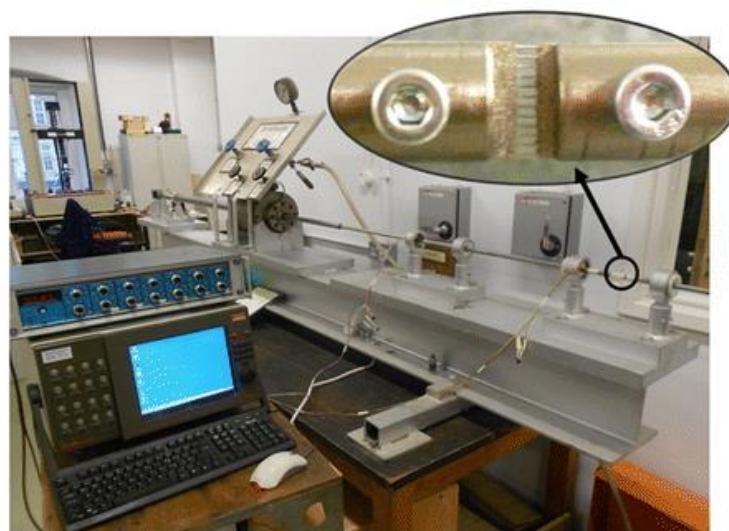
Cíl práce: Vytvořit výpočtový model působícího napětí v závislosti na rychlosti poměrné deformace pro mikro-prutové struktury z nerezové oceli 316L vyrobených technologií SLM.

Testované hypotézy: Se zvyšující se rychlostí poměrné deformace se mění dynamická mez kluzu mikro-prutové struktury, kterou je možné popsat pomocí konstitutivních vztahů.

Získané výsledky: 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 [32]. Pro účel tahového testování za vysokých rychlostí sloužilo modifikované Hopkinsonovo zařízení (SHPB test), které bylo původně určeno pro rychlé tlakové zkoušky (viz Obr. 2-15 a)). Zde byla použita kombinovaná více prutová tělesa (21 prutů, viz Obr. 2-15 b)). Upravená konstrukce se osvědčila, nicméně autoři zmínili budoucí nutnost modifikace vzorků i konstrukce zařízení.



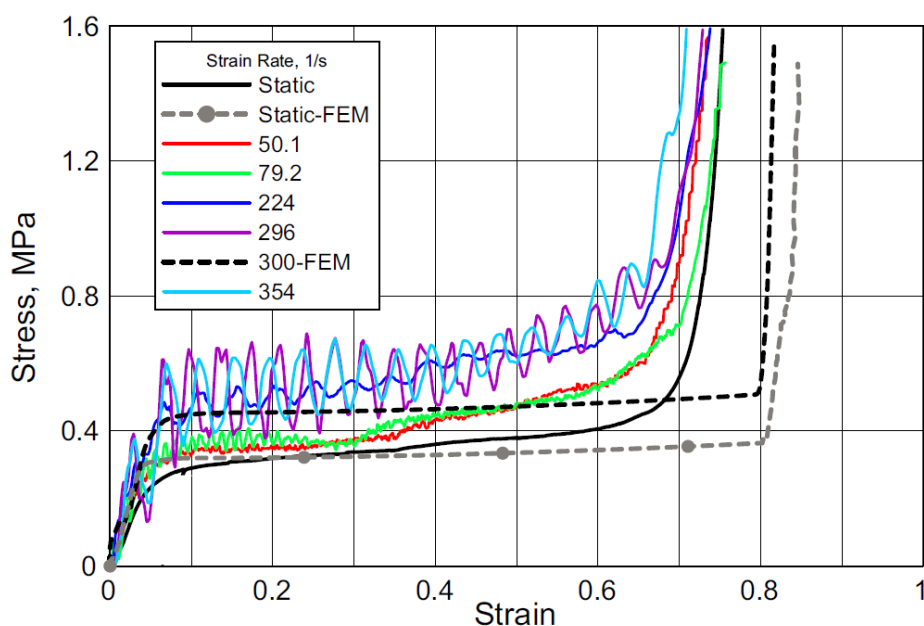
(a)



(b)

Obr. 2-15 a) Schéma Hopkinsonova zařízení upraveného pro vysokorychlostní tahové zkoušky, b) uchycení vzorku navrženého pro tento typ zkoušky [21]

Získané křivky popisující závislost napětí na poměrné deformaci při různých rychlostech poměrné deformace byly konzistentní napříč testovaným spektrem a jejich hodnoty odpovídaly studii **Langdona** a kolektivu [41]. Hodnoty mezi kluzu a mezi pevnosti všech měření byly proloženy křivkou Cowper-Symondsovy (C-S) konstitutivní rovnice za účelem získání materiálových konstant dynamického materiálového modelu (rov. 2-1). 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 a dynamickým pádovým testem bloků mikro-prutových struktur typu BCC (viz Obr. 2-16). Testování odhalilo až 50% nárůst napětí při zvýšení rychlosti testování. Tento jev byl přisuzován především citlivosti základového materiálu na rychlosti zatěžování.



Obr. 2-16 Křivky napětí v závislosti na poměrné deformaci bloků mikro-prutových struktur získaných pádovým testem v porovnání s kvazistatickou tlakovou zkouškou a MKP simulací [21]

Důkladné porovnání výsledků ukázalo, že přesnost modelu se zvyšujícími rychlostmi klesá, neboť dochází ke zvýšení vlivu velkých deformací a působení 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.

Význam a užitečnost: MKP simulace byla provedena za účelem ověření platnosti experimentálně získaných koeficientů Cowper-Symondsova konstitutivního vztahu (rov. 2-1). Jako ověřovací úloha byl vybrán pádový test. Tento test byl simulován v softwaru LS-DYNA 3D s nastavením převzatým z předcházející studie [42]. Oproti dřívější studii byl materiálový model doplněn o chování závislé na rychlosti poměrné deformace (*Material 24*) s využitím konstant $D = 17 \cdot 10^6$ a $q = 12$. 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, natanenému materiálu na stěny jejich prutů a změnám průměru prutů, což simulace nezahrnovala.

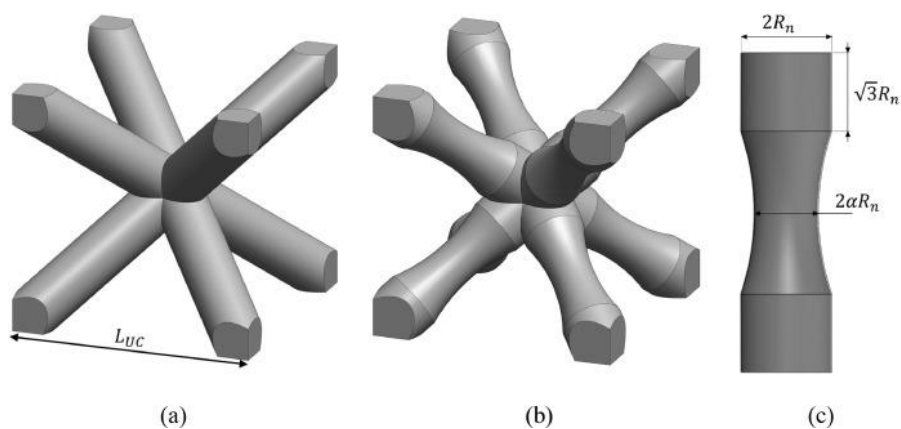
Geometrie prutů struktury byla v simulaci vytvořena pomocí *beam* (Hughes-Liu) elementů s 16 integračními body napříč tloušťkou. Každý prut byl tvořen 8 elementy. V uzlech byly prutům odebrány rotační stupně volnosti.

Stiffness and specific energy absorption of additively-manufactured metallic BCC materials composed of tapered beams (Tancogne-Dejean, 2018) [43]

Cíl práce: Stanovení modulů mikro-prutových struktur vyrobených technologií SLM pomocí analytického a numerického výpočtu.

Testované hypotézy: Vhodným zúžením prutů mikro-prutové struktury typu BCC z titanové slitiny Ti₆Al₄V lze dosáhnout zvýšení hodnot Youngova modulu a SEA.

Získané výsledky: Numerické simulace sloužily především k ověření předběžných analytických výpočtů a posouzení chování struktur při deformaci. Testovány byly struktury s konvenčními pruty i pruty s parabolicky se zužujícími průřezy (viz Obr. 2-17) podobně jako v předcházející studii tohoto týmu [37].

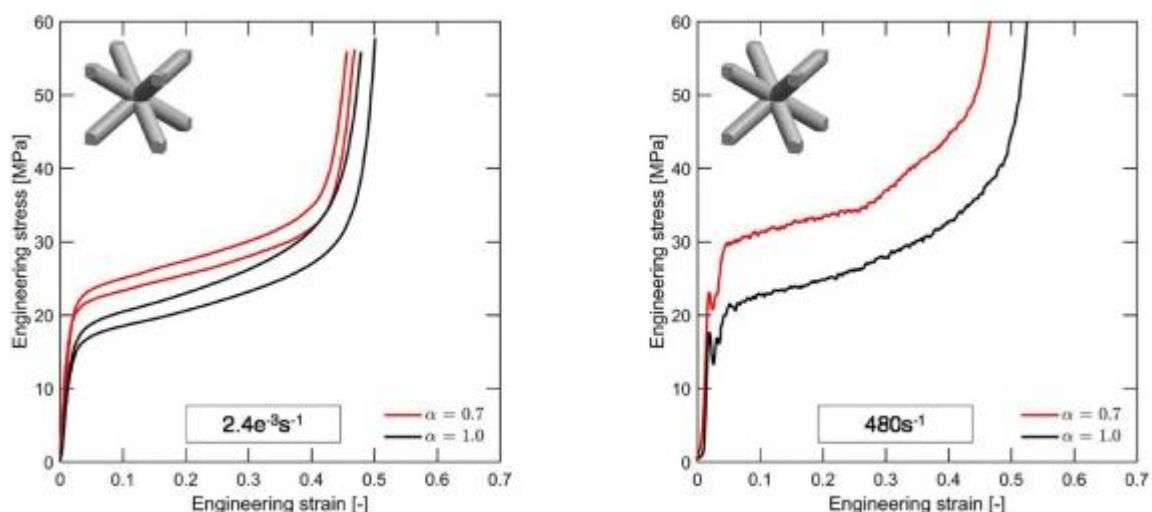


Obr. 2-17 Základní buňka BCC struktury složená (a) z prutů konstantního kruhového průřezu ($\alpha = 1$), (b) ze zužujících se prutů ($\alpha = 0,7$); (c) Parametry popisující geometrii prutu [43]

Výsledky analytických a numerických výpočtů ukázaly, že struktura při deformaci (s rostoucí relativní hustotou v rozmezí 1-50 %) jeví známky stabilního hroucení. Velikost napětí se v závislosti na poměrné deformaci monotónně zvyšovala až do okamžiku ztuhnutí. Struktury se zúženými průřezy prutů jeví známky vyšších mechanických vlastností (viz Obr. 2-19 a)), zejména Youngova modulu (až o 70 %) a vyšší absorpce energie (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.

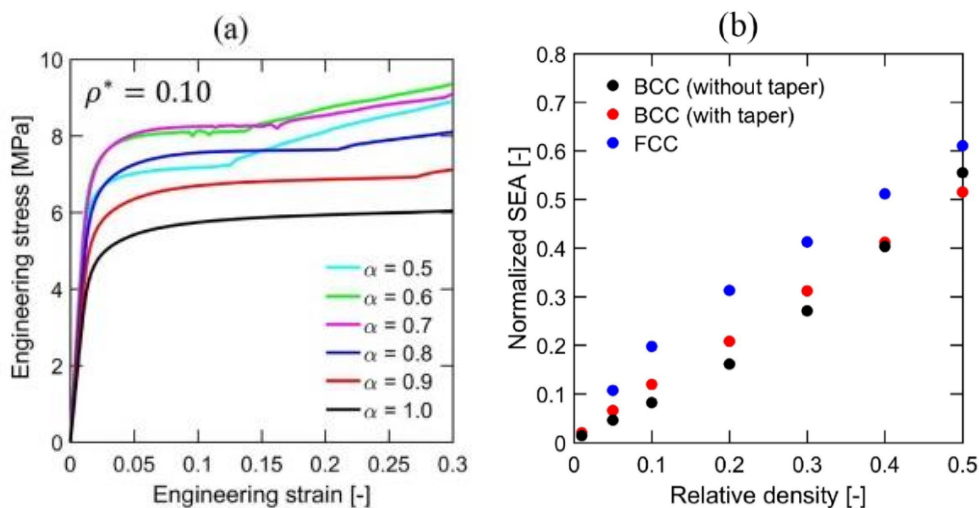
Za účelem validace výpočtu specifické absorpce energie byly provedeny kvazi-statické a dynamické (SHPB) tlakové testy na vzorcích s relativní hustotou 10 %, 20 % a 30 %, a minimálním průměrem prutu 0,3 mm. Zatěžující rychlost Hopkinsonovi tyče byla 10 m/s, což při dané velikosti vzorků odpovídalo nominální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

Dynamická odezva materiálu byla průběhem podobná té kvazistatické. Rozdíl mezi odezvou materiálu na kvazistatické zatěžování a dynamické zatěžování 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 porovnání byl zaznamenán přibližně 30 % rozdíl napětí (viz Obr. 2-18). Tento rozdíl byl pozorovatelný pro struktury s různým průřezem prutů. DIF zjištěný v této studii byl podobný hodnotě zjištěné v minulé studii 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. 2-18 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]

Specifická absorpce energie mikro-prutových struktur byla určena z křivek znázorňujících závislost napětí na poměrné deformaci. SEA 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. 2-19 b)). Při vysokých objemových podílech se blížily podobným hodnotám.



Obr. 2-19 (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

Navzdory svým kvantitativním nedostatkům zůstala BCC struktura atraktivní 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.

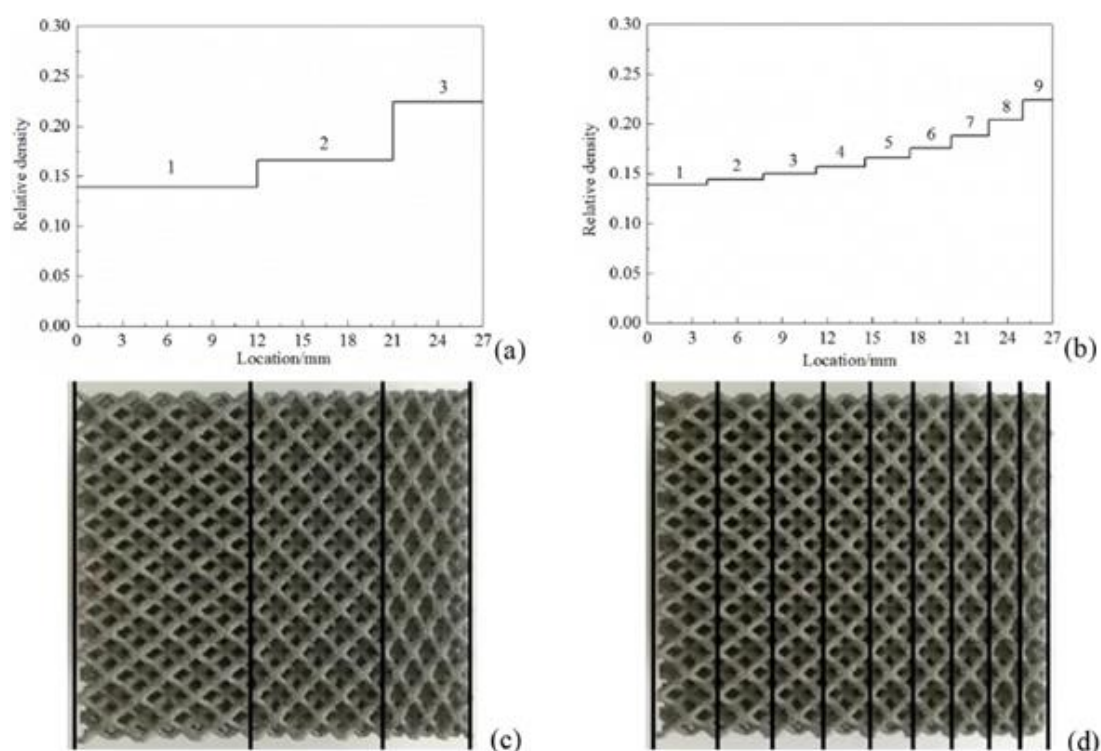
Význam a užitečnost: Numerické simulace byly provedeny na základových buňkách mikro-prutové struktury za účelem stanovení vlivu zúžení prutů na elastický modul a sledování velkých plastických deformací. Jako základový model materiálu byl použit homogenizovaný *Levy-von Mises* s izotropním zpevněním napodobujícím vlastnosti nerezové oceli 316L. Možná anizotropie, závislost materiálu na rychlosti poměrné deformaci, kinematické zpevnění, fázové přeměny a nehomogenity vzniklé v procesu aditivní výroby byly zanedbány. Youngův modul pružnosti byl stanoven na 210 GPa a Poissonovo číslo na 0,3. Základové buňky byly modelovány pomocí šestistěnných *solid* elementů prvního řádu s redukovanou integrací (C3D8R v knihovně elementů softwaru Abaqus). Velikost elementů byla volena tak, aby bylo dosaženo minimálně 4 elementů napříč zúženým průřezem prutu. Výsledky numerické simulaci byly validovány experimentem.

Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with strength under static and dynamic loading: Experiments (Xiao, 2018) [44]

Cíl práce: Otestovat potenciál absorpce energie při dynamickém zatěžování mikro-prutových struktur se skokovou změnou objemového podílu.

Testované hypotézy: Skokově měnící se objemový podíl může vést ke zmenšení silového píku v počátečních rázového zatěžování a navýšení kapacity absorbované energie.

Získané výsledky: Podobným směrem se ubíral také výzkum **Xiao** a jeho týmu (2018) [44]. Zaměřil se na kvazistatické a dynamické testování mikro-prutové struktury BCC vyrobené technologií SLM z titanové slitiny Ti_6Al_4V . Objemový podíl struktury se skokově měnil, čehož bylo docíleno změnou délky základních buněk struktury ve směru zatěžování (viz Obr. 2-20).



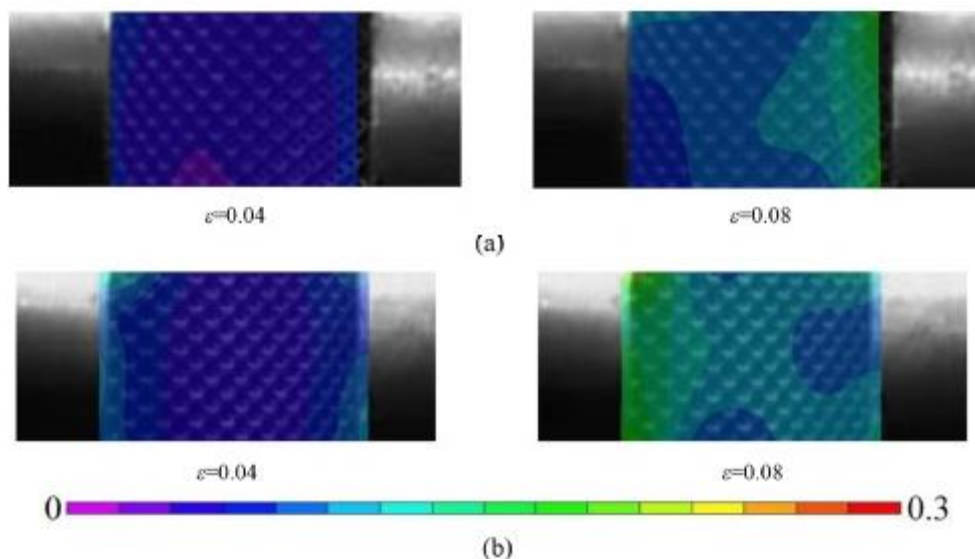
Obr. 2-20 Skoková změna objemového podílu pro různé přechody mikro-prutové struktury BCC znázorněná graficky (a-b) i odpovídajícím vzorkem (c-d) [33]

Dynamické testy byly provedeny na Hopkinsonově zařízení za účelem stanovení mechanických vlastností materiálu pro rychlosti poměrné deformace do 1000 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* elementů, které reflektovaly její dynamickou odezvu. 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.

Porovnání experimentálních výsledků s předcházející studií s konvenčními BCC strukturami 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 směr zatížení (ve svislém směru) neměl významný dopad na absorpci energie v rozmezí testovaných rychlostí, což bylo potvrzeno i výsledky numerické simulace.

Při porovnání kvazistatických ($0,001 \text{ s}^{-1}$) a dynamických (1000 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. 2-21), že před poškozením struktury jsou deformace 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 u oblastí s relativně nízkou hodnotou objemového podílu (výška základní buňky $>3 \text{ mm}$). Toto poškození se projevovalo ve smykových rovinách a bylo nejčastější příčinou kolapsu struktur při kvazistatickém i dynamickém zatěžování.

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



Obr. 2-21 Rozložení lokálního přetvoření podle DIC analýzy; rychlost poměrné deformace (a) 500 s^{-1} , (b) 1000 s^{-1} [33]

Význam a užitečnost: Numerická simulace rázového děje byla provedena v softwaru LS-DYNA. Pro vytvoření modelu struktury byly použity elementy typu *beam 154*, které zahrnovaly plastické chování a schopnost velkých deformací. Metody vytváření modelu byly převzaty ze studie Ozdemira [45]. Každý prut byl na základě citlivostní studie polygonální síť rozdělen na elementy o velikosti 0,1 mm. Modelované prostředí bylo zjednodušeno na dvě tuhé stěny (statická a dynamická) a model mikro-prutového vzorku. Skutečný průměr prutu (0,44 mm) byl stanoven na základě SEM analýzy a zahrnut v simulaci. Rychlost pohybující se stěny (v) byla stanovena z rychlosti poměrné deformace ($\dot{\epsilon}$) jako:

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

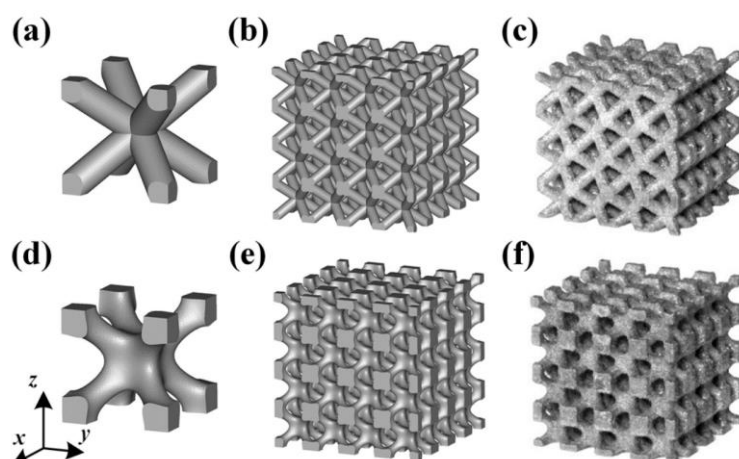
kde L_0 tvořilo počáteční délku vzorku ve směru zatížení. Za účelem zahrnutí plasticity, deformačního zpevnění a efektu rychlosti poměrné deformace byly v modelu materiálu použity křivky napětí v závislosti na poměrné deformaci při různých rychlostech zatěžování struktur. Modul pružnosti byl zvolen na 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.

Improved mechanical properties and energy absorption of BCC lattice structures with triply periodic minimal surface fabricated by SLM (Zhao, 2018) [36]

Cíl práce: Stanovit vlastnosti matematicky definované modifikace mikro-prutové struktury typu BCC při kvazistatickém tlakovém zatěžování.

Testované hypotézy: Matematickým definováním struktury lze dosáhnout hladkých přechodů mezi jednotlivými pruty, což má za následek výhodnější distribuci působícího napětí při zatěžování struktury.

Získané výsledky: 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. 2-22). Vzorky struktury byly následně vyrobeny technologií SLM z titanové slitiny Ti₆Al₄V, podrobeny kvazistatickým tlakovým testům a porovnány s konvenční strukturou typu BCC.



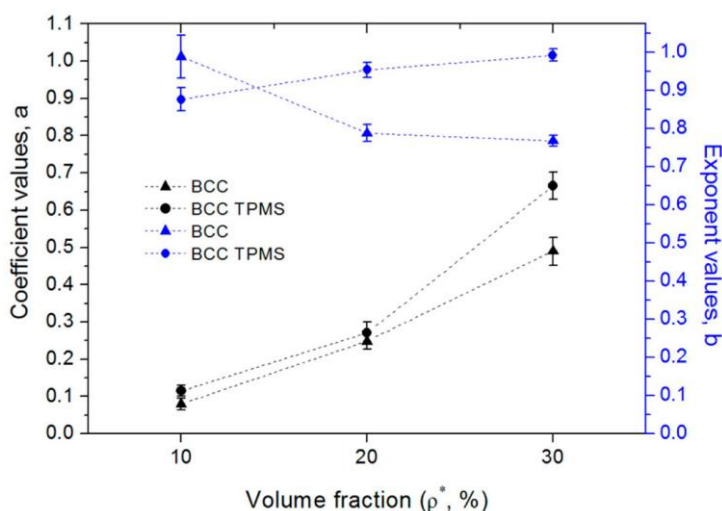
Obr. 2-22 (a-c) konvenční mikro-prutová struktura typu BCC, (d-f) modifikovaná mikro-prutová struktura BCC TPMS [36]

Tlakové testy strukturovaných vzorků, teoretické výpočty jednotlivých prutů a snímky z mikroskopu ukázaly, že vzorky BCC TPMS byly náchylnější na působení osové síly, přičemž docházelo k jejich křehkému lomu. Oproti tomu pruty konvenční BCC vzorky jevíly známky poškození vlivem ohybového momentu, přičemž docházelo k poškození v uzlech tvárným lomu. 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 poměrné deformaci do velikosti poměrné deformace 50 % (podle ISO 13314:2011). Velikost pohlcené energie se měnila s objemovým podílem a geometrií struktur. BCC TPMS struktura s objemovým podílem kolem 30 % absorbovala větší množství 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. 2-23). 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 nižší kapacitu kontinuální absorpce energie. Výsledek jasně ukázal, že modifikace geometrie vzorků BCC struktury může zvýšit absorpci energie.



Obr. 2-23 Hodnoty koeficientu (a) a exponentu (b) stanovené z křivek absorbované energie (tři opakování, střední hodnoty a odchylky) [36]

Nový přístup v generování modifikovaných mikro-prutových struktur byl konkurenceschopný v porovnání s jejich konvenčním vytvářením. Nicméně práce zahrnovala pouze struktury s rovnoměrně rozloženou modifikací, 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.

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

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

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:

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

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.

3 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ

Následující kapitola popisuje analýzu poznatků získaných na základě souhrnu dosavadních studií z oblasti MKP výpočtů dynamicky zatěžovaných struktur vyrobených aditivními technologiemi. Klíčové studie a s nimi související poznatky, jsou shrnuty v myšlenkové mapě na konci kapitoly (viz Obr. 3-1).

3.1 Absorpční vlastnosti struktury

Z rešeršní studie provedené v minulé kapitole vyplývá, že využitím dynamických MKP simulací pro predikci deformačního chování mikro-prutových struktur může dojít ke zvýšení efektivity návrhu strukturovaného materiálu s potenciálem absorpce energie [15]. 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. To značí zpravidla struktury s nejvyšším podílem absorbované energie v poměru k jejich hmotnosti [7]. Tato vlastnost však není jediným určujícím parametrem pro výběr dané konfigurace. K dalším klíčovým vlastnostem patří také průběh absorpce nebo délka jejího trvání. Upřednostňovaným typem je rovnoměrná absorpce energie za působení přibližně konstantního napětí při progresivním kolapsu struktury. Takový typ průběhu by měl zároveň omezit nárůst napětí před nástupem prvních plastických deformací struktury [11, 12, 46].

3.2 Vliv materiálu a geometrie

Při využití mikro-prutových struktur pro účely absorpce rázové energie je důležitým faktorem nejen absorpční kapacita, ale také stabilní průběh absorpce [43]. Křehké materiály s nízkou tažností nejsou pro tento účel zcela vhodné [36]. U mikro-prutových struktur dochází při jejich zatěžování ke vzniku kombinovaného namáhání prutů [47]. Když při tomto typu namáhání dojde k překročení meze kluzu, vznikají mezi uzly a pruty struktury trhliny, které vedou ke kolapsu struktury podél skluzových rovin. Potenciál struktury tak není zcela využit. Z tohoto důvodu je vhodné předcházet tomuto jevu použitím houževnatého materiálu (např. nerezová ocel 316L) [37].

Absorpci energie ovlivňuje zásadním způsobem také geometrie základních buněk struktury [34]. 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 [35] (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 [44]. Využitím modifikované struktury lze, kromě zvýšení kapacity absorbované energie, navíc dosáhnout stabilního průběhu kolapsu s monotónně rostoucím napětím [43].

3.3 Přístupy k vytvoření simulace

Deformační chování mikro-prutových struktur je možné simulovat pomocí MKP softwarů vybavených explicitním řešičem [15, 48]. V tomto modulu výpočetního softwaru je třeba provést nastavení týkající se počátečních a okrajových podmínek, specifických typů kontaktů mezi tělesy nebo výpočetních časů souvisejících s rázovými ději (např. ANSYS Explicit Dynamics nebo LS-Prepost).

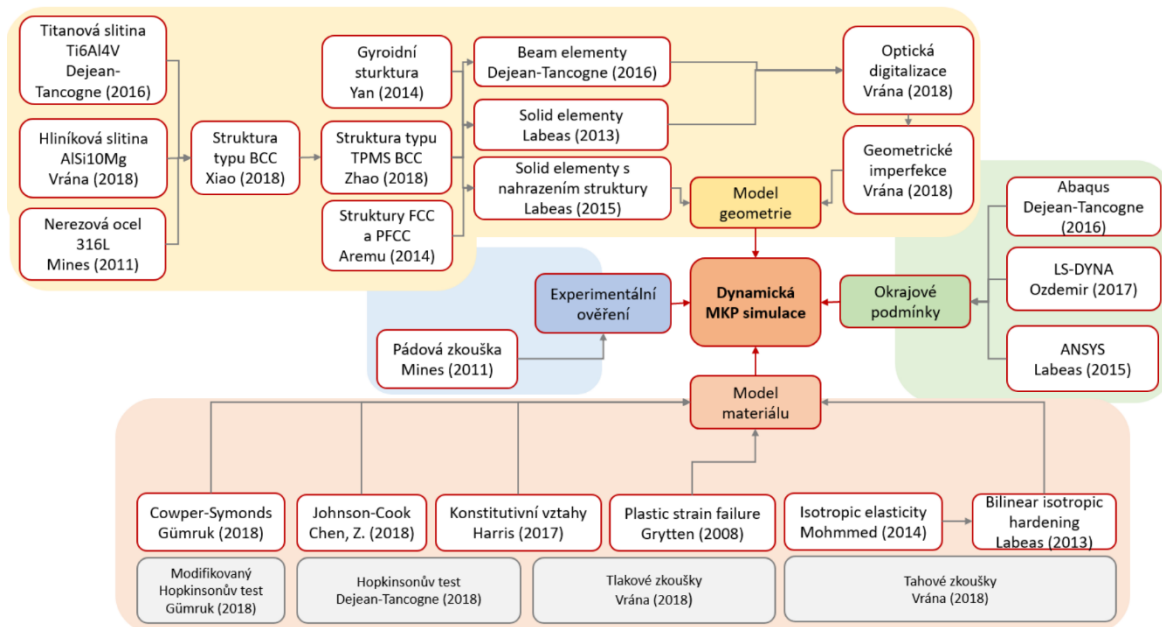
Další nastavení simulace jsou provedena na modelu geometrie. Mikro-prutové struktury je možné modelovat podle třech základních přístupů. První z nich zvažuje nahrazení struktury blokem *solid* elementů o ekvivalentních vlastnostech [9]. Tento přístup je nejjednodušší z hlediska vytváření kontaktů mezi prvky struktury, nabízí však nejnižší přesnost a vyžaduje dodatečné výpočty. Druhý přístup využívá přesnější vyjádření geometrie struktury, u které jsou jednotlivé pruty vytvářeny pomocí nosíkových *beam* elementů [7]. Tento přístup poskytuje přesnější výsledky v porovnání s předchozí metodou. Na druhou stranu vazby mezi jednotlivými pruty nereflektují skutečné podmínky styku prutů a typ elementů neumožňuje tvarovou variabilitu. Poslední přístup uvažuje geometrií prutů, která je tvořena pomocí *solid* elementů [49]. Tento přístup je nejpřesnější a nabízí možnosti tvarování prutů a uzlů pro případ zanesení geometrických imperfekcí. Jedná se především proměnnou velikost prutu a skutečný tvar jeho průřezu [49].

Mimo geometrii struktury je dalším klíčovým prvkem model materiálu. Typ zvoleného modelu materiálu a jeho vstupní hodnoty (materiálové konstanty) zásadním způsobem ovlivňují chování dynamicky zatěžované struktury [50, 51]. Materiálové konstanty základního elasticko-plastického modelu je možné získat na základě kvazistatické tahové zkoušky [9]. Tyto konstanty tvoří smluvní mez kluzu, modul pružnosti a tečný modul. K modelu je potřeba navíc přiřadit kritérium poškození polygonální sítě, které může být definováno několika způsoby. Nejpoužívanější typ poškození je spjatý s překročením meze kritického přetvoření elementů [29]. Vstupní hodnoty tohoto kritéria lze získat na základě kvazistatické tlakové zkoušky struktur.

Vstupní hodnoty modelu získané z kvazistatických testů nicméně plně nereflektují chování materiálu při dynamickém zatěžování [32]. Se zvyšující se rychlostí zatěžování přesnost numerické simulace klesá, neboť se začínají projevovat efekty související s dynamickým zatěžováním, jako je citlivost základového materiálu na rychlost poměrné deformace, mikrosetrvačnost, nárazové zpevnění apod. [21]. Pro zahrnutí těchto podmínek je nutné provést doplňující dynamické testy například na modifikovaném Hopkinsonově zařízení. Výsledky testu jsou implementovány do konstitutivních vztahů – upravují hodnoty mezi působícím napětím a poměrnou deformací struktur při dynamickém zatížení.

Nejjednodušším používaným vztahem je Cowper-Symondsův konstitutivní vztah. Tento vztah v sobě zahrnuje vliv efektu, který způsobuje změnu napětí při různých rychlostech poměrné deformace [11, 21]. Ta je dána rychlostí zatěžování, geometrií vzorku a zatěžující energií. Pro přesnější matematický popis chování deformované struktury za vyšších rychlostí je možné přidat další konstitutivní vztahy zvažující vlivy jiných efektů [33]. Alternativní možností je nahrazení většího počtu vztahů jediným, který uvažuje více efektů jako je například Johnson-Cookův konstitutivní vztah [40]. Tento vztah zahrnuje mimo efektu měnící se rychlosti poměrné deformace také vliv velkých deformací nebo působící změny teploty. Působení jednotlivých konstitutivních vztahů je třeba otestovat a posoudit, který z nich vystihuje přiměřeným způsobem chování mikro-prutových struktur.

Závěrem je nutné numerickou simulaci validovat pomocí dynamického testu provedeného například na pádovém zařízení [49]. Pomocí funkční simulace bude možné testovat řadu geometrických konfigurací, materiálových vlastností a způsobů zatěžování a pozorovat jejich vliv na chování struktury [18].



Obr. 3-1 Myšlenková mapa sestavená na základě řešeršní studie projektu

3.4 Nezmapovaná oblast poznání

Za účelem vytvoření přesného matematického popisu dynamicky zatěžované mikro-prutové struktury je třeba doplnit stávající elasticko-plastický bilineární (multilineární) model materiálu o konstitutivní vztahy, které zahrnují efekty spojené s rázovými jevy. Navíc je nutné do popisu modelu geometrie zahrnout i imperfekce spojené s výrobou struktur pomocí aditivních technologií. K ověření platnosti a přínosu těchto přístupů je vhodné sledovat změny chování na strukturách s výše popsanými absorpčními vlastnostmi (viz Obr. 2-1). Těchto vlastností lze dosáhnout s využitím houževnatého materiálu s vysokou mírou prodloužení do porušení, jako je například nerezová ocel 316L. Dále je nutné dodržet předpoklad související s geometrickou konfigurací struktury. Rozmístění prutů struktury by nemělo při jejím zatížení způsobit skokový nárůst síly, který povede k nerovnoměrné deformaci.

Prozatím nebyla publikována studie, která by popisovala vznik a ověření platnosti výpočtového modelu dynamického zatěžování mikro-prutové struktury na této úrovni se zahrnutím výše popsaných parametrů.

4 PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE

4.1 Podstata disertační práce

Podstatou disertační práce je sestavení numerického popisu deformačního chování dynamicky zatěžovaných mikro-prutových struktur vyrobených technologií Selective Laser Melting z nerezové oceli 316L. Jedná se o základní výzkum, jehož součástí bude vytvoření nového nelineárního MKP modelu rázového děje. Tento model bude zahrnovat unikátní kombinaci modelu materiálu stanoveného na základě dynamických testů a modelu geometrie obohaceného o imperfekce výroby. 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 dynamických podmínek. V důsledku by měla vzniknout predikční úloha umožňující provádět parametrické změny geometrie s možností pozorovat jejich dopad na absorpci energie. Předpokládané budoucí využití simulace spočívá v aplikacích uvažujících disipaci mechanické rázové energie.

4.2 Cíle práce

Hlavním cílem práce je vytvoření numerického modelu pro predikci chování dynamicky zatěžovaných mikro-prutových struktur vyrobených technologií Selective Laser Melting z nerezové oceli 316L. Tento model by v sobě měl zahrnovat efekty působící při rychlé deformaci, změny mechanických vlastností způsobené imperfekcemi výroby a poznatky o mechanismech poškození struktur. Dílčí cíle jsou:

- Definování a provedení testů kvazistatického a dynamického zatěžování
- Stanovení vlivů spojených s rychlostí zatěžování a jejich dopadu na absorpci energie a deformační chování mikro-prutové struktury
- Implementace konstitutivních vztahů zvažujících vlivy spojené s rychlou deformací do materiálového modelu struktury
- Implementace imperfekcí vzniklých v důsledku výroby do modelu geometrie struktury
- Experimentální validování dynamické MKP úlohy

4.3 Přínos práce

Dosavadní publikace v této oblasti se zaměřovaly především na popis chování mikro-prutových struktur při kvazistatickém zatěžování. Malá část publikací zaměřených na mapování vlastností struktur při dynamickém zatěžování sleduje zejména jejich potenciál v oblasti absorpce rázové energie. Experimentální studie jsou doplněny o MKP simulace rázových dějů za účelem porozumění procesů probíhajících uvnitř struktur při jejich deformaci. Tyto procesy je možné v simulaci pozorovat za předpokladu jejich matematického popisu a zanesení do výpočtového modelu. Zahrnutí těchto procesů je možné provést prostřednictvím modelu materiálu, modelu geometrie a nastavení počátečních a okrajových podmínek.

Deformační chování mikro-prutových struktur je při dynamickém zatěžování poměrně komplexní a velmi se liší od chování základového materiálu. Publikované studie doposud tento typ chování popisovaly pomocí materiálových modelů jejichž vstupní hodnoty byly stanoveny na základě kvazistatických testů. Pro přesnější popis materiálu při dynamickém zatížení je nutné přidat konstitutivní vztahy se vstupními hodnotami stanovenými dynamickým testováním.

Podobné problematice čelí model geometrie struktury v MKP softwarech. Skutečná geometrie struktur po výrobě obsahuje imperfekce několika druhů podílejících se na změně mechanických vlastností. Reprezentace imperfekcí souvisejících s tvarem mikro-prutové struktury byla v dosavadních simulacích zastoupena minimálně nebo úplně zanedbána. Matematické popisy mikro-prutové struktury zahrnující imperfekce a efekty spojené s dynamickým zatěžováním prozatím nebyly použity současně.

Přínos této práce tedy spočívá ve vytvoření numerického popisu dynamického deformačního chování mikro-prutové struktury se zahrnutím výrobních imperfekcí a vlivů rychlého zatěžování za účelem predikce absorbované energie. Vliv rychlého zatěžování bude do modelu implementován kombinací konstitutivních vztahů. Validovaný model by měl být schopen předpovědět nejen množství absorbované energie, ale také průběh její absorpce. V důsledku bude možné pomocí výpočtového modelu najít konfigurace struktur s vysokým absorpčním potenciálem bez nutnosti jejich výroby. Tato metodika najde své uplatnění na poli automobilního a leteckého průmyslu.

5 VĚDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÍ HYPOTÉZY

Vědecká otázka 1

„Jaké konstitutivní vztahy je třeba použít pro přesný matematický popis chování mikro-prutové struktury vyrobené technologií SLM při dynamickém zatěžování?“

Pracovní hypotéza 1

„Chování mikro-prutových struktur při dynamickém zatěžování je poměrně komplexní a velmi se liší od chování základového materiálu. Při vyšších rychlostech se začínají projevovat efekty velkých deformací, mikro-setrvačnosti, dynamického zpevnění apod. Nejvíce chování struktury ovlivňuje citlivost materiálu na rychlost poměrné deformace. Tu je možné popsat pomocí Cowper-Symondsova konstitutivního vztahu. Tento vztah je poměrně jednoduchý, ale zohledňuje působení pouze jednoho efektu. Pro zohlednění ostatních vlivů je možné použít kombinaci podobných vztahů, nebo je nahradit složitějším, jako je například Johnson-Cookův konstitutivní vztah uvažující navíc velké deformace a vliv teplotních změn.“

Vědecká otázka 2

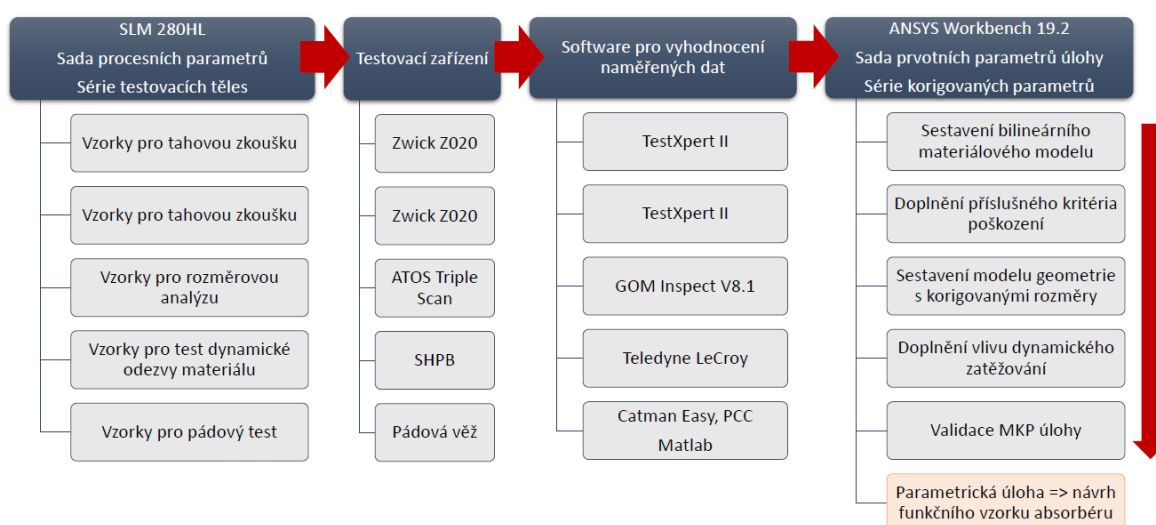
„Jak ovlivňují geometrické imperfekce mechanickou odezvu dynamicky zatěžovaných mikro-prutových struktur vyrobených z nerezové oceli 316L?“

Pracovní hypotéza 2

„Při důkladné inspekci mikro-prutových struktur po výrobě je možné pozorovat imperfekce několika typů. Jedná se především vlnitost prutů, změnu tvaru jejich průřezu a průměru nebo vnitřní porozitu. Pro každý materiál, strukturu 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. 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. To způsobí nárůst průřezu ve vertikálním směru, který zpravidla bývá také směrem zatěžování struktury. Změna vlastností při takovém typu zatěžování nabývá vysokého významu.“

6 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY ZKOUMÁNÍ

V následující kapitole jsou popsány zařízení a metody, které budou použity pro sestavení výpočtového MKP modelu dynamicky zatěžované mikro-prutové struktury se zahrnutím rázových efektů (např. rychlost poměrné deformace). Funkčnost modelu bude validována experimentem. Ověřená simulace bude následně použita při parametrické studii za účelem nalezení výhodných konfigurací mikro-prutové struktury pro absorpci rázové energie. Poznatky týkající se prvotního definování a nastavení dynamických úloh vychází z rešeršní studie provedené v kapitole Přehled současného stavu poznání. Metodika popsaná na schématu níže vychází do jisté míry z know-how Ústavu konstruování (viz Obr. 6-1).

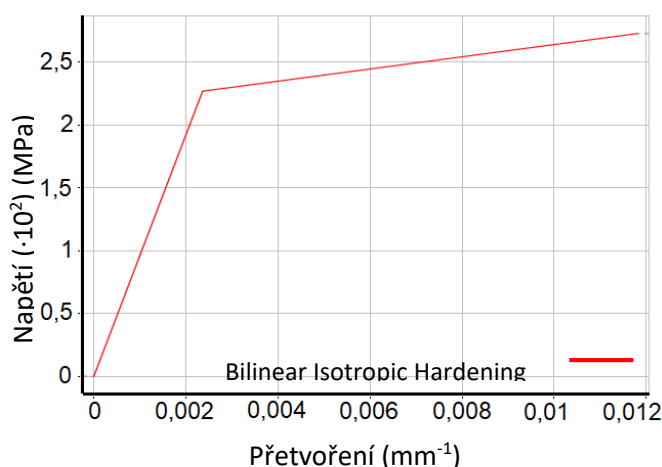


Obr. 6-1 Schematický postup použitých metod projektu

6.1 Dynamická MKP

Dynamická simulace pádového děje bude vytvořena v modulu softwaru ANSYS Workbench s názvem *Explicit Dynamics*. V tomto modulu bude vytvořeno několik sérií úloh s různou konfigurací nastavení a použité geometrie. Hlavním cílem těchto úloh bude kalibrace numerického modelu pro porušení mikro-prutové struktury s dosažením podobných výsledků deformace a absorpce energie jako v případě experimentu. Během kalibrace numerického modelu bude definován a upravován model materiálu, geometrie, okrajové podmínky atd.

K popisu modelu materiálu definujícího lineární oblast (*Isotropic Elasticity*) bude využit stejný přístup, který použil **Mohammed** ve své práci. K modelu bude přidána část popisující chování materiálu po překročení lineární oblasti. Na základě předcházejících výzkumů **Labease** a **Vrány** bude vybrán model *Bilinear Isotropic Hardening* (viz Obr. 6-2). V návaznosti na rešeršní studii **Grittena** bude model doplněn o kritérium poškození (*Plastic Strain Failure*). Kritérium bude pravděpodobně uvažovat porušení polygonální sítě při překročení kritického přetvoření elementů. Následně bude přidána Cowper-Symondsova konstitutivní rovnice zvažující efekt rychlosti poměrné deformace struktury, kterou popsali **Ahmad** a **Gümruk**. Všechny hodnoty potřebné pro sestavení bilineárního modelu materiálu nerezové oceli 316L budou stanoveny na základě mechanických testů.

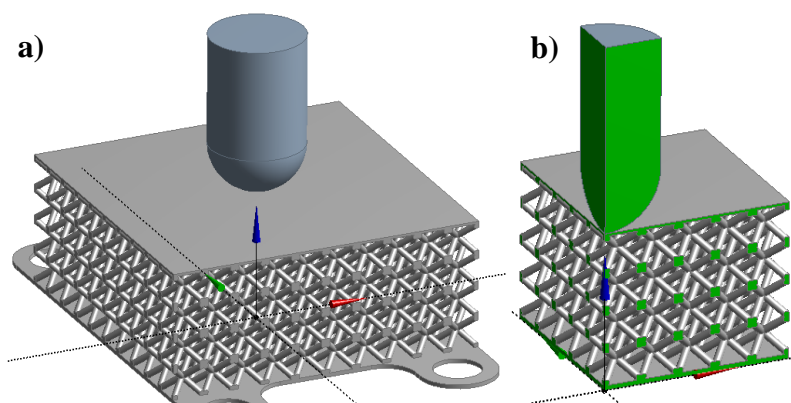


Obr. 6-2 Graf bilineárního modelu materiálu AlSi₁₀Mg

Další nastavení simulace budou souviset geometrií úlohy a vztahu vzorku absorbéru vůči deformačnímu členu. Podobně jako v práci **Minese** a **Labease** bude i zde indenter vytvořen v těsné blízkosti horního okrajového plátu vzorku (viz Obr. 6-3 a)). Dojde tím ke zkrácení výpočetních časů a eliminaci nepřesností vzniklých při průchodu pádové hlavice volným prostorem. Vzhledem k výpočetní náročnosti úlohy bude zaveden model osově symetrické úlohy (viz Obr. 6-3 b)). Plochám řezů obou dílů budou při zavedení symetrie automaticky odebrány některé stupně volností tak, že jejich pohyb v osách symetrie bude omezen.

Následně budou mezi pláty a jádrem vzorku definovány kontakty dokonalého sváru (*Bonded*). Ve stejné záložce budou nastaveny interakce mezi tělesy prostřednictvím třecích koeficientů. Pro statický i dynamický koeficient tření budou zvažovány tabulkové hodnoty pro kontakt hliník-ocel (statický 0,61 a dynamický 0,47).

Zvláštní pozornost bude věnována polygonální síti, protože kvalita a velikost elementů polygonální sítě mají významný vliv na validitu výsledků simulace. Oběma plátům bude přidělen typ skořepinových elementů – *Shell* (4 uzlů). Pro vytvoření elementární sítě strukturovaného jádra bude využito metody vytvářející čtyřstěny – *Tetrahedron* (4 uzly). Při vytváření modelu geometrie budou zahrnuty imperfekce spojené s odchylkami od kruhového průřezu prutu. Velikost elementů bude stanovena na základě parametrické citlivostní analýzy.



Obr. 6-3 a) model geometrie strukturovaného vzorku a indentoru, b) osová symetrie

Následně budou v kartě *Explicit Dynamics* definovány okrajové podmínky úlohy. Indentoru byla přidělena pádová rychlost. Její velikost bude stanovena na základě experimentů z průměrné dopadové rychlosti pádové hlavičky. Dále bude v záložce *Analysis Settings* stanovena doba trvání simulace (doba, po kterou probíhá deformace vzorku). Vzhledem k časové náročnosti výpočtu bude žádoucí, aby se doba simulovaného procesu omezila na minimum. Simulace bude zpracována v řešiči AUTODYN.

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 bude navržen funkční vzorek absorbéru.

6.2 Výroba testovacích vzorků

Vstupní parametry pro sestavení dynamické 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 Selective Laser Melting (od společnosti SLM Solutions). Procesní parametry pro výrobu vzorků z nerezové oceli SS316L budou stanoveny na základě dat poskytnutých společností SLM Solutions, případně studie Gümruka a kolektivu [21]. Při výrobě budou rozlišovány parametry dvojího typu – pro objemové a strukturované (tenkostěnné) vzorky.

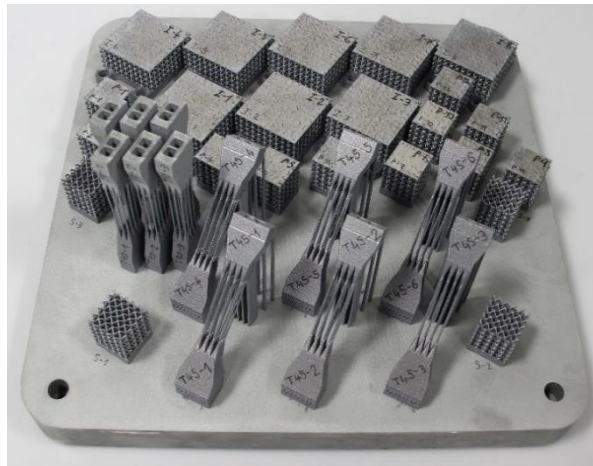
6.2.1 Testovaná struktura

Předmětem testování se stane mikro-prutová struktura typu BCC (Based Cubic Centered), která je jednou ze základních struktur používaných při výrobě technologií SLM [13, 16, 34, 52] (případně její modifikace popsané v kapitole Přehled současného stavu poznání). Základní geometrie se skládá z 8 prutů protínajících se v jejím středu (viz Obr. 2-2), 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 $35,26^\circ$, což umožňuje výrobu prutů struktury BCC bez využití podpůrného materiálu (v omezeném rozsahu délky).

6.2.2 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..

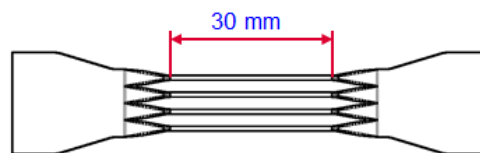
V průběhu jedné výrobní série budou současně vyrobeny vzorky pro pádový test, tahovou, tlakovou i dynamickou zkoušku na Hopkinsonově zařízení (viz Obr. 6-4). Všechna tělesa budou vyrobena se stejným jmenovitým průměrem prutu a stejnými procesními parametry. To zaručí rovnocenné podmínky při mechanickém 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 pádovým testem.



Obr. 6-4 Série testovacích vzorků s popisovými čísly

6.2.3 Vzorky

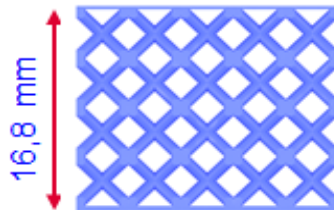
Vzorky pro tahovou zkoušku (prutové) – budou tvořeny z 12 rovnoběžných prutů o délce 30 mm v uspořádání 3 x 4 pruty (viz Obr. 6-5) [16]. Při výrobě tenkých prutů mohou v tělesech vznikat vlivem procesních parametrů lokální defekty s velkou porozitou. Tento jev může způsobit oslabení prutu při jeho zatěžování. Tahový vzorek s větším množstvím prutů tento problém eliminuje, a navíc lépe reflektuje situaci při zatěžování struktury, kdy se na přenosu působících sil podílí větší množství prutů.



Obr. 6-5 Kombinované prutové těleso pro tahovou zkoušku [16]

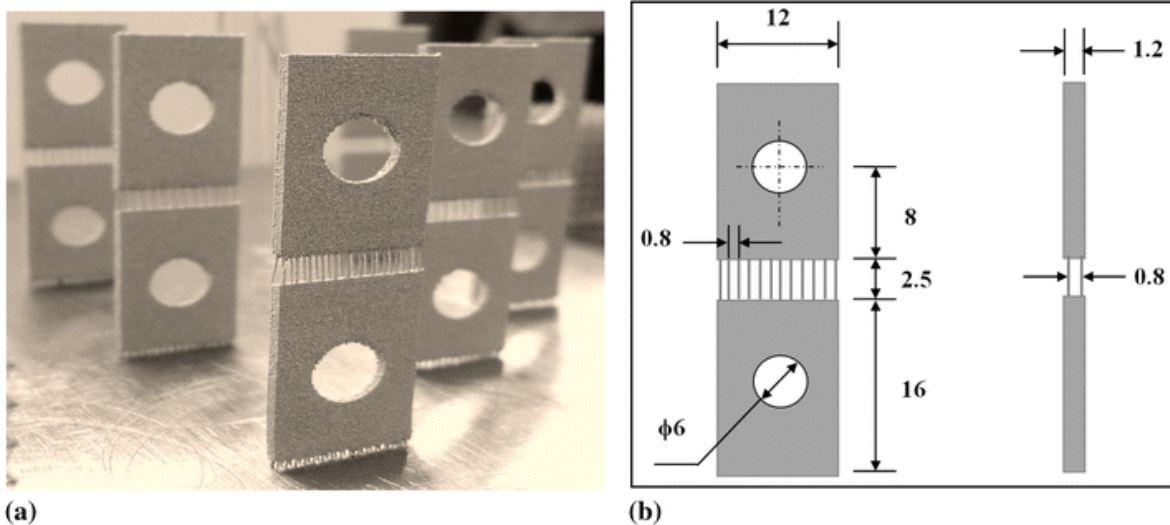
Vzorky pro pádový test – budou vyrobeny jako panel se strukturovaným jádrem krytým okrajovými pláty plného materiálu (tzv. sandwich layout) (viz Obr. 6-6) [7, 28, 53]. Při tlakovém zatížení dojde k rozložení napětí po celé ploše vzorku. Rozměry vzorků budou 20 x 20 x 20,8 mm s délkou strany základní buňky 4 mm. Nominální průměry okrajových plátů budou – horní 0,5 mm a spodní 0,5 mm.

Vzorky pro tlakovou zkoušku – budou vyrobeny [9, 13, 54] stejné jako vzorky pro pádový test (viz Obr. 6-6). Poměr výšky k šířce těles bude přibližně roven 1 (20 x 20 x 20,8 mm). Díky tomu bude možné během tlakové zkoušky pozorovat případný výskyt skluzových rovin na diagonále vzorku [55].



Obr. 6-6 Ilustrační model vzorku pro pádový test

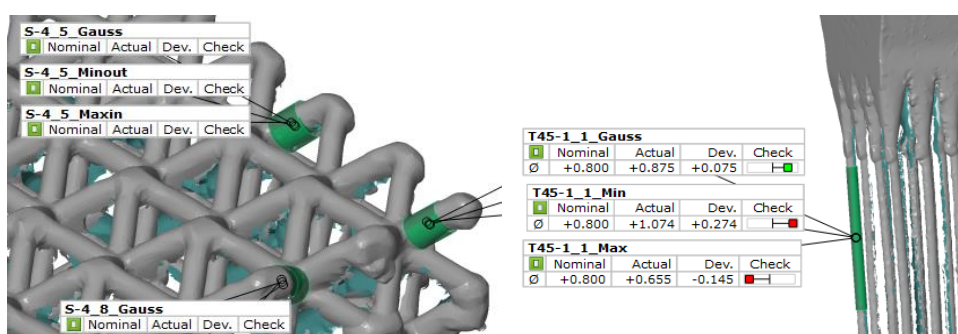
Vzorky pro dynamický SHPB test – budou vyrobeny pro testování na modifikovaném Hopkinsonově zařízení, tak aby odpovídaly těm, které ve své práci použil **Gümruk a kolektiv** (2018) [21] (viz Obr. 6-7). Pro test je předpokládáno využití zařízení společnosti SVS FEM v Brně.



Obr. 6-7 a) fotografie vzorků pro test na modifikovaném Hopkinsonově zařízení, b) jejich CAD předloha s rozměry [21]

6.3 Rozměrová analýza

Pro získání reálných rozměrů součástí budou po výrobě některá z těles digitalizována skenerem ATOS Triple Scan [56, 57]. Výsledná data v podobě 3D skenů skutečných rozměrů vzorků budou vyhodnocena softwarem GOM Inspect (viz Obr. 6-8) [10, 58–60], profesionálním softwarem pro analyzování 3D skenů [58, 59]. Vzorky pro pádový test budou skenovány pro účely korekce modelu geometrie v dynamické MKP. Tahová tělíska budou skenována pro účely vyhodnocení mechanických vlastností s následným sestavením materiálového modelu.



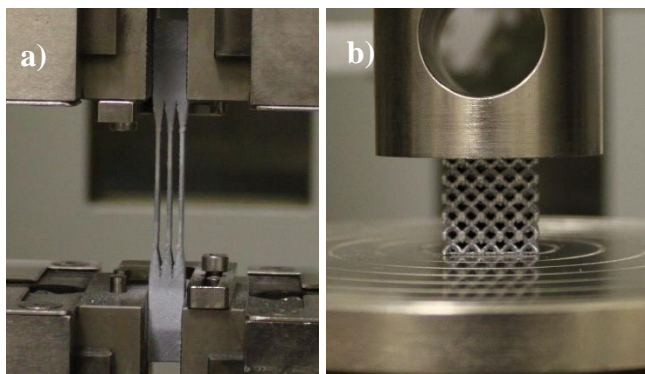
Obr. 6-8 Ilustrační příklad výběru oblasti prutu k inspekci

6.4 Mechanické testování

Pro predikci chování mikro-prutové struktury při jejím dynamickém zatěžování za současné deformace je nutné znát její mechanické vlastnosti. 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 výpočetního softwaru ANSYS.

6.4.1 Kvazistatické testování

Po optické digitalizaci budou provedeny mechanické testy. Na základě jednoosé tahové a tlakové zkoušky na zařízení Zwick Z020 (maximální síla 20 kN) budou získány materiálové konstanty, zejména modul pružnosti, tečný modul, mez kluzu a prodloužení prutů do poškození. Tahová i tlaková zkouška budou provedeny (viz Obr. 6-9 a a b)) se zatěžováním rychlostí $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (neuvažován vliv rychlosti poměrné deformace).



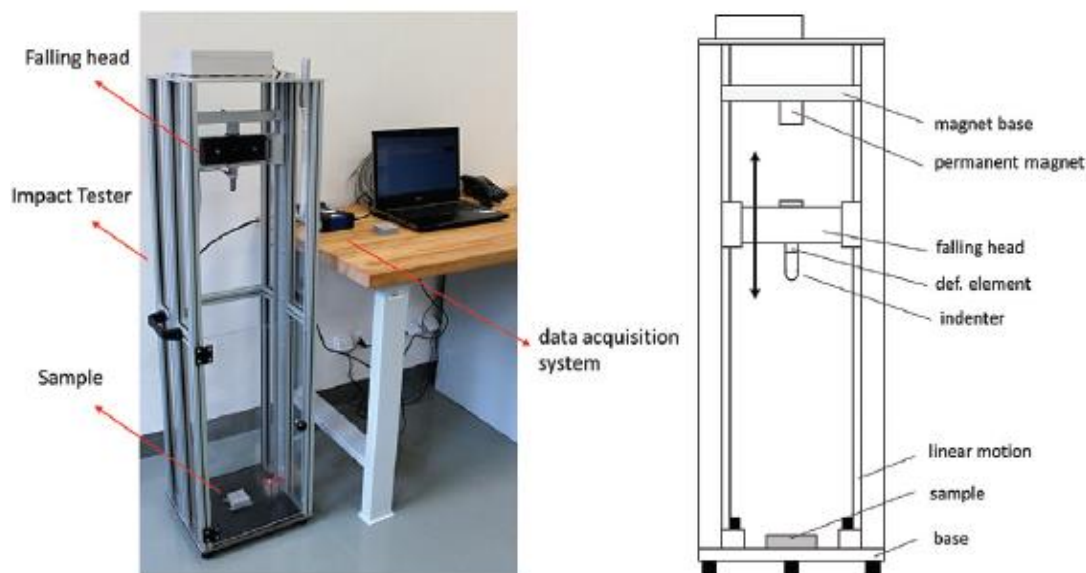
Obr. 6-9 Uchycení vzorků ve stroji Zwick – a) tahová zkouška, b) tlaková zkouška

6.4.2 Dynamické testování

Test pro stanovení materiálových konstant dynamického zatěžování bude proveden na Hopkinsonově zařízení. Hlavní částí zařízení jsou vysokopevnostní měrné tyče, mezi nimiž je vložen vzorek [21, 38] (viz Obr. 2-15). 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 zkušebním vzorku se změří tlaková vlna a signály snímačů jsou vyhodnoceny. 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 [25, 35] (viz Obr. 6-10). Zařízení pracuje na principu volného pádu hlavice s nastavitelnou zátěží (maximální hmotností 12,25 kg a výškou pádu 1 m). Na hlavici je umístěn indentor, který má ploché zakončení o průměru 32 mm. Během testu deformuje indentor 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 [25, 61]. Vzorky budou testovány při několika různých zátěžích. Naměřená data pádového testu budou vyhodnocena v softwaru MATLAB. Ten kombinuje data získaná z tenzometru umístěného za indentorem na hlavici s daty z vysokorychlostní kamery, která snímá pohyb hlavice.

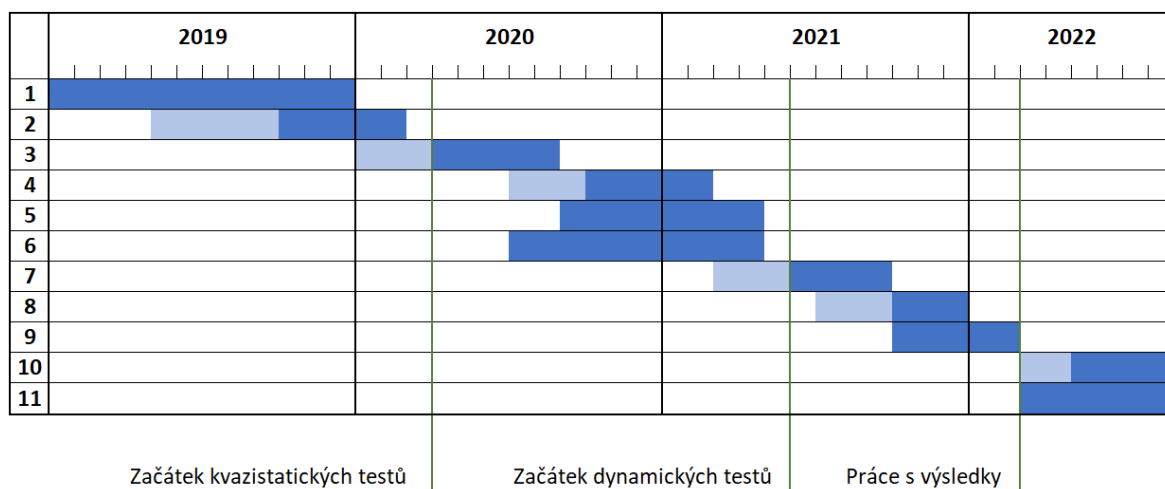


Obr. 6-10 Pádový tester se schématickým nákresem [32]

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.

7 ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ

Časový plán je zaznamenán v Ganttově diagramu (viz Obr. 7-1):



Obr. 7-1 Ganttův diagram s časovým rozpisem projektu

1. Tvorba rešeršní studie (do června v rámci předmětu 9MOP)
2. A) Detailní definování testovacích těles
B) Definování kvazistatických testů
3. A) Výroba vzorků (mikro-prutové tělesa pro tahové zkoušky a struktury pro tlakové zkoušky)
B) Provedení kvazistatických testů
4. A) Vyhodnocení testů – získání materiálových konstant
B) Implementace výsledků do dynamických MKP
5. Provedení prvotních MKP simulací
6. Detailní definování testovacích těles a dynamických testů
7. A) Výroba vzorků
B) Provedení dynamických testů
8. A) Korekce MKP úlohy – implementace konstitutivních vztahů
B) Porovnání s experimentem
9. Parametrická úloha pro účely nalezení výhodné konfigurace struktury s absorpčním potenciálem
10. Porovnání vybrané konfigurace s konvenčními strukturami
11. Shrnutí dosavadních poznatků s následnou diskuzí

8 ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY

Konvenční absorbéry používané v dopravním průmyslu pracují na principu přeměny kinetické energie na práci vykonanou při plastických deformacích absorpčního tělesa. Jejich deformace nestabilní a často při ní dochází ke skokovým nárůstům zatěžujících sil. Nárůst sil má za následek negativní zvýšení zatížení působící při nárazu na posádku vozidla. Toto zatížení zvětšuje pravděpodobnost zranění a je pro posádku ohrožující.

Nejnovější aplikace kombinují tyto konvenční absorbéry s porézním strukturovaným materiálem, jako jsou například hliníkové pěny. Implementací těchto prvků do absorberů je docíleno zvýšení kapacity absorbovatelné energie. Navíc mají porézní struktury příznivý vliv na stabilitu deformace absorberů při jejich zatěžování. Struktury se při působení sil deformují rovnoměrně za bez skokového nárůstu napětí až do místa zhuštění materiálu. Tento typ deformace představuje nižší riziko pro posádku.

Rozvoj aditivních technologií v posledních letech umožnil využití alternativních strukturovaných materiálů pro výplň absorberů. Jsou jimi mikro-prutové struktury (případně struktury organických tvarů) vyrobené tavením kovových prášků. Tyto struktury disponují podobně jako doposud používané porézní materiály nízkou hmotností a vysokými mechanickými vlastnostmi. Navíc tyto výrobní technologie umožňují v porovnání s výrobou kovových pěn zpracovávat celou řadu materiálů (např. SS316L nebo Ti₆Al₄V). Tvar dílů je možné řídit libovolným způsobem a strukturovaný materiál lze integrovat do objemových dílů s plynulým přechodem (frakce struktury a objemu jsou pevně spojeny). Tím je možné docílit větší variability použití absorpčních prvků.

K tomu, aby bylo možné využívat tyto struktury pro aplikace související s absorpcí energie, je nutné blíže prozkoumat jejich chování při dynamickém zatěžování. Dosavadní studie uvádí, že schopnost mikro-prutových struktur absorbovat mechanickou energii se značně mění s použitým materiálem, geometrií struktur nebo podmínkami zatěžování (např. zatěžující rychlostí). Vztahy mezi jednotlivými faktory je možné posuzovat pomocí dynamické MKP simulace. Pro její sestavení je nutné vytvořit výpočtový model, který bude zahrnovat matematický popis těchto faktorů. Matematický popis včetně vstupních dat získaných na základě mechanických testů může sloužit k nalezení konfigurace s největším potenciálem pro absorpci rázové energie.

9 SPOLUPRÁCE S JINÝMI INSTITUCEMI

V průběhu řešení je předpokládána spolupráce s následujícími institucemi:

- Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT v Brně – řešitel předpokládá spolupráci ve formě odborných konzultací z oblasti kvazistatických i dynamických testů a nelineárních MKP simulací. Dále se předpokládá využití zařízení laboratoře mechanických zkoušek na Ústavu (zařízení Zwick Z020). Příprava experimentů a průběh zkoušek bude konzultován s Ing. Petrem Vosynkem, Ph.D.. Sestavení dynamických simulací bude konzultováno s Ing. Františkem Šebkem, Ph.D. a prof. Ing. Jindřichem Petruškou CSc..
- SVS FEM s.r.o. – česká firma, která se od roku 1991 specializuje na výpočty metodou konečných prvků. Od roku 1992 firma působí jako ANSYS Elite Channel Partner pro Českou republiku a Slovensko. V současné době má tým více než dvaceti analytiků, kteří jsou specialisti na problematiku numerických simulací. Za dobu své existence řešila více než 400 různých projektů jak pro tuzemské, tak pro zahraniční zákazníky. Patří mezi špičková pracoviště v tuzemsku i zahraničí v oblasti simulací velmi rychlých dynamických jevů a spolupracuje na několika mezinárodních projektech v oblasti vojenství. Řešitel předpokládá spolupráci v oblasti dynamického testování a konzultací týkajících se přípravy numerických úloh. V průběhu studia je také plánovaná několikaměsíční řešitelova stáž ve firmě.

10 PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY SPOJENÉ S ŘEŠENÍM A JEJICH ZDROJE

V průběhu řešení jsou předpokládány náklady spojené s výrobou a testováním vzorků z nerezové oceli 316L. Řešitel předpokládá výrobu sérií vzorků pro tahovou a tlakovou zkoušku, rozměrovou analýzu a dynamické testování. Všechny vzorky by měly být vyrobeny na zařízení SLM 280^{HL} od společnosti SLM Solutions. Toto zařízení se nachází na Odboru reverzního inženýrství, a tudíž jediné předpokládány náklady jsou spojeny s nákupem materiálu. Nákup práškového materiálu pro výrobu vzorků by mohl financován z výzkumného projektu pro Evropskou vesmírnou agenturu, který bude realizován ve spolupráci se společností GE.

Rozměrová analýza vzorků bude provedena na zařízení ATOS Triple Scan od Společnosti GOM. Toto zařízení se rovněž nachází na Odboru reverzního inženýrství, a proto v tomto kroku nejsou uvažovány náklady.

Kvazistatické testování (tahové a tlakové zkoušky) bude provedeno ve spolupráci s Ústavem mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky na Fakultě strojního inženýrství na stroji Zwick Z020 od společnosti Roell. Zde se počítá s minimálními náklady.

Dynamické testování bude provedeno na zařízeních známých jako Split Hopkinson Pressure Bar a pádová věž. K tomuto účelu budou využita zařízení společnosti SVS FEM v Brně. Zde je předpokládána spolupráce založená na výměně know-how (případně spoluúčast při publikaci studie). Finanční náklady nejsou předpokládány.

11 CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU

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. Výsledek výzkumu by měl být doplněn o funkční vzorek absorberu.

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 3,344)
- Journal of the Mechanics and Physics of Solids
(Q1 Condensed Matter Physics, IF 3,566)
- International Journal of Mechanical Sciences
(Q1 Civil and Structural Engineering, IF 3,344)
- Journal of Materials Engineering and Performance
(Q2 Material Science (miscellaneous), IF 1,049)
- Materials
(Q2 Material Science (miscellaneous), IF 2,467)

12 BIBLIOGRAFIE

- [1] 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
- [2] KARAGIOZOVA, D. a Norman JONES. Dynamic buckling of elastic-plastic square tubes under axial impact - II: Structural response. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2004. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/S0734-743X(03)00062-9
- [3] OLABI, A. G., Edmund MORRIS a M. S.J. HASHMI. Metallic tube type energy absorbers: A synopsis. *Thin-Walled Structures* [online]. 2007. ISSN 02638231. Dostupné z: doi:10.1016/j.tws.2007.05.003
- [4] KOPANIDIS, A., A. THEODORAKAKOS, E. GAVAISES a D. BOURIS. 3D numerical simulation of flow and conjugate heat transfer through a pore scale model of high porosity open cell metal foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2010, **53**(11–12), 2539–2550. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.12.067
- [5] *COREX HONEYCOMB*. 2018.
- [6] SHIMIZU, T., K. MATSUZAKI, H. NAGAI a N. KANETAKE. Production of high porosity metal foams using EPS beads as space holders. *Materials Science and Engineering A* [online]. 2012, **558**, 343–348. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2012.08.010
- [7] 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
- [8] BANHART, J. *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams* [online]. 2001. ISBN 0079-6425. Dostupné z: doi:10.1016/S0079-6425(00)00002-5
- [9] 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
- [10] 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
- [11] AHMAD, Zaini. *Impact and Energy Absorption of Empty and Foam-filled Conical Tubes*. 2009.

- [12] 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
- [13] MOHMED, 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
- [14] *ERG materials & aerospace* [online]. 2019. Dostupné z: <http://ergaerospace.com/applications/duocel-foam-energy-absorbers/>
- [15] 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
- [16] VRÁNA, R. *Návrh porézních struktur pro aditivní výrobu technologií selective laser melting*. B.m., 2014. Vysoké učení technické v Brně.
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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
- [21] 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
- [22] 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

- [23] 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
- [24] 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
- [25] 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
- [26] 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
- [27] 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
- [28] 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
- [29] GRYTEN, 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
- [30] MOHMED, 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.
- [31] 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
- [32] 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
- [33] 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

- [34] 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.
- [35] 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
- [36] 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
- [37] 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
- [38] 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
- [39] 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
- [40] 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
- [41] 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
- [42] 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
- [43] 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
- [44] 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

- [45] 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
- [46] 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
- [47] 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
- [48] 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**. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2016.11.016
- [49] 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
- [50] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN a David RAYMONT. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2012. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2012.06.002
- [51] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN, Philippe YOUNG, Juntong HUANG a Wei ZHU. Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering. *Materials Science and Engineering A* [online]. 2015, **628**. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2015.01.063
- [52] 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
- [53] 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
- [54] WANG, Keyan. *Calibration of the Johnson-Cook Failure Parameters As the Chip Separation Criterion in the Modelling of the Orthogonal Metal Cutting Process*. B.m., 2016. McMaster University.
- [55] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. Praha: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.

- [56] 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
- [57] 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
- [58] ČERMÁK, Jan. Metody 3D skenování objektů. *B.m.* 2015.
- [59] URBÁNEK, Aleš. *Kontrola součástí pomocí metod reverzního inženýrství: Bakalářská práce*. B.m., 2008. Vysoké učení technické v Brně.
- [60] 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.
- [61] ŠLAIS, Miroslav. *Studium vlivu rychlostních a teplotních parametrů na tvařitelnost Ti slitin*. B.m., 2012. Vysoké učení technické v Brně.
- [62] KARAGIOZOVA, D. a Norman JONES. Dynamic buckling of elastic–plastic square tubes under axial impact—II: structural response. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2004, **30**(2), 167–192. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/S0734-743X(03)00062-9
- [63] *ERG materials & aerospace*. 2019.

13 VĚDECKÝ ŽIVOTOPIS

Osobní informace

Jméno, titul: Ondřej Červínek, Ing.
Adresa: Fakulta strojního inženýrství
Technická 2896/2, Brno, 61669, Česká republika
E-mail: ondrej.cervinek@vut.cz
Telefon: +420 541 143 256, +420 728 597 542

Vzdělání a kvalifikace

Od 7/2018 Doktorský studijní program – Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, Technická 12, Česká republika, Konstrukční a procesní inženýrství

6/2016 – 6/2018 Magisterský studijní program – Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, Technická 12, Česká republika, Konstrukční inženýrství, prospěl velmi dobře

9/2013 – 6/2016 Bakalářský studijní program – Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 12, Česká republika – Základy strojního inženýrství

Pracovní zkušenosti

Od 9/2018 Technicko-ekonomický pracovník RIAT (Odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií), NETME Centre, Brno, práce na plný úvazek

11/2016 – 1/2018 Technicko-ekonomický pracovník RIAT (Odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií), NETME Centre, Brno, práce při studiu

Vědecké aktivity a získaná ocenění

7/2018 Druhé místo ve studentské soutěži SVS FEM o nejlepší ANSYS projekt (Cena Prof. Jaroslava Buchara)

6/2018 Vítěz konference diplomových prací

9/2018 Kurz základů vědecké práce (AV ČR)

Publikace:

VRÁNA, Radek, Ondřej ČERVINEK, Pavel MAŇAS, Daniel KOUTNÝ a David PALOUŠEK. Dynamic Loading of Lattice Structure Made by Selective Laser Melting-Numerical Model with Substitution of Geometrical Imperfections. *Materials*. 2018, 11(11). DOI: 10.3390/ma11112129. ISSN 1996-1944.

Ostatní relevantní informace

Software	Autocad, Inventor – Autodesk CAD software GOM Inspect – software pro vyhodnocení 3D měřených dat, rozměrové přesnosti a kontrolu kvality ANSYS Classic/Workbench (Explicit dynamics) – FEM simulační nástroj Magics – nástroj pro přípravu dat kovového 3D tisku
3D tisk	Zkušenost s technologií Selective Laser Melting Zkušenost s Fused Deposition Modeling
Jazyky	Český, anglický B2, německý A2