



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

RÁZOVÉ NAMÁHÁNÍ MIKRO-PRUTOVÝCH STRUKTUR VYROBENÝCH TECHNOLOGIÍ SELECTIVE LASER MELTING Z HOŘČÍKOVÉ SLITINY WE43

IMPACT LOADING OF LATTICE STRUCTURES PRODUCED BY SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY
FROM MAGNESIUM ALLOY WE43

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Foltán

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Jaroš

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Tomáš Foltán**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Jaroš**
Akademický rok: 2022/23

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

Rázové namáhání mikro–prutových struktur vyrobených technologií Selective Laser Melting z hořčíkové slitiny WE43

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mikro–prutové struktury je možné použít jako náhradu plného materiálu pro výrobu optimalizovaných dílů. Pro návrh takových dílů je nutné znát chování mikro–prutových struktur při různých zátěžných stavech. Jedním z nich je rázové zatěžování, ke kterému dochází v případě absorpce energie, což je jedna z oblastí možného využití mikro–prutových struktur.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je experimentálně získat mechanické vlastnosti mikro–prutových struktur namáhaných rázem z hořčíkové slitiny WE43.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešerše rázového zatěžování mikro–prutových struktur,
- návrh a provedení experimentů,
- analýza získaných výsledků.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace.

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

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

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

Seznam doporučené literatury:

MACONACHIE, Tobias, Martin LEARY, Bill LOZANOVSKI, Xuezhe ZHANG, Ma QIAN, Omar FARUQUE a Milan BRANDT. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials and Design*. 2019, 183. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.108137

LI, Chuanlei, Hongshuai LEI, Yabo LIU, Xiaoyu ZHANG, Jian XIONG, Hao ZHOU a Daining FANG. Crushing behavior of multi-layer metal lattice panel fabricated by selective laser melting. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018, 145, 389-399. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.07.029

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Mikro-prutové struktury ze slitiny WE43 se díky své pevnosti a nízké hmotnosti jeví jako možné řešení v oblasti biomedicíny i letectví. Doposud provedený výzkum posuzoval hlavně chování těchto struktur při kvazistatickém zatěžování. Dynamické namáhání těchto struktur doposud nebylo hluboce zkoumáno. Tato práce se proto zabývá rázovým zatěžováním mikro-prutových struktur vyrobených metodou SLM. Na nízkorychlostním pádovém testeru byla otestována sada vzorků s různými základními buňkami a tloušťkou prutů. U vzorků se při nárazech posuzovala absorbovaná energie, průběh napětí a mechanismy deformace. Byl pozorován jasný vliv základní buňky struktury na množství pohlcené energie, kdy struktury o podobné relativní hustotě vykazovali značně rozdílné hodnoty. Největší měrná absorbovaná energie byla pozorována u struktur s buňkou FCCZ. Ukázalo se, že v porovnání s jinými materiály (např. ocel) je hořčík významně méně efektivní, což bylo nejspíše způsobeno jeho tendencí selhávat křehkým lomem. Provedené testy dávají představu o chování těchto struktur při nárazech a popisují tak schopnost struktur absorbovat energii, což může být užitečné např. při návrhu kostních implantátů v biomedicinském sektoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

WE43, mikro-prutové struktury, SLM, rázové zatěžování, absorpce energie

ABSTRACT

Strut-based lattice structures manufactured with magnesium alloy WE43, due to their high strength-to-weight ratio, seem like an ideal solution for biomedical and aerospace industries. Previous research has focused mainly on the behaviour of these structures under quasi-static stress conditions. Dynamic stressing of these structures has not been deeply researched. Therefore, this work deals with impact testing of strut-based lattice structures manufactured by SLM. Low-velocity impact tests were performed on a set of cell topologies with different strut diameters. Absorbed energy, stress-strain curve, and deformation mechanism of each sample were studied. Clear effect of cell topology on the amount of absorbed energy was observed, where structures of similar relative densities displayed considerably different values. Highest specific absorbed energy was achieved with the FCCZ cell. In comparison with other materials (e.g., steel) magnesium proved to be far less efficient. This was most probably caused by its brittle fracture failure mode. Conducted tests give insight into mechanical behaviour of magnesium alloy structures under dynamic compression and their ability to absorb energy. Collected data may prove useful for biomedical applications e.g., in designing bone implants.

KEYWORDS

WE43, lattice structures, SLM, impact testing, energy absorption

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FOLTÁN, Tomáš. *Rázové namáhání mikro-prutových struktur vyrobených technologií Selective Laser Melting z hořčíkové slitiny WE43*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149427>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Jan Jaroš.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Janu Jarošovi za cenné rady, trpělivost a pomoc při vypracování práce a experimentech v laboratoři. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ondřeji Červinkovi Ph.D. za znalosti a cenné rady při měření a práci s testovacím vybavením. Také děkuji Ing. Jakubovi Hurníkovi Ph.D. za poskytnutí programu pro zpracování dat z měření. Mé díky patří i všem blízkým, kteří mi byli v průběhu psaní oporou.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Jana Jaroše. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Mikro-prutové struktury	14
2.2	Výroba mikro-prutových struktur	16
2.3	Mikro-prutové struktury ze slitiny WE43 vyrobené metodou SLM	17
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	20
3.1	Analýza problému	20
3.2	Cíl práce	21
4	MATERIÁL A METODY	22
4.1	Návrh experimentu	22
4.2	Výroba vzorků	23
4.3	Zpracování vyrobených vzorků	24
4.4	Rázová zkouška	25
4.5	Vyhodnocení dat z rázové zkoušky	26
4.6	Měření rozměrové přesnosti prutů	27
5	VÝSLEDKY	28
5.1	Rázová zkouška	28
5.2	Rozměrová přesnost struktur	33
6	DISKUZE	35
6.1	Rázová zkouška	35
6.2	Rozměrová přesnost struktur	37
7	ZÁVĚR	39
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	42
9.1	Seznam zkratk	42
9.2	Seznam symbolů a veličin	42

10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	43
11	SEZNAM TABULEK	44

1 ÚVOD

V mnoha odvětvích průmyslu jako je např. letectví jsou stále kladeny větší a větší nároky na snížení hmotnosti a zvýšení efektivity využití materiálu. Tyto požadavky často nelze splnit pomocí standardních výrobních postupů. Jedním z možných řešení je využití aditivních výrobních technologií, které umožňují výrobu geometrií nedosažitelných klasickými metodami.

Nové metody lze využít k výrobě porézních materiálů s řízenou vnitřní strukturou. Díky možnosti přesně definovat vnitřní strukturu součásti se dá k odlehčení využít topologická optimalizace pomocí mikro-prutových struktur. Při ní je klasický objemový materiál nahrazen sítí základních buněk tvořených tenkými pruty. Takto lze zachovat požadovanou pevnost, zatímco dochází k značné redukci hmotnosti v porovnání s klasickým objemovým materiálem. Změnou geometrie základní buňky těchto struktur lze do značné míry přizpůsobovat vlastnosti materiálu (mechanické, termodynamické atd.) dle zamýšleného využití struktury. Lze tak ze stejného materiálu vytvořit vysoce pevnou strukturu pro nosné aplikace, nebo strukturu s vysokou absorpcí energie pro pohlcování nárazů.

Jednou z technologií výroby těchto struktur je Laser Powder Bed Fusion (LPBF). Pod LPBF spadá metoda Selective Laser Melting (SLM), kdy pomocí laseru vyrábíme součásti po vrstvách z práškového materiálu. Dnes se takto běžně vyrábí struktury ze slitin materiálu jako ocel, hliník a titan. Relativně nová je možnost zpracování hořčíkových slitin pomocí SLM. Ukazuje se, že slitina WE43 má potenciál pro výrobu mikro-prutových struktur s vysokou pevností a nízkou hmotností, což je velmi atraktivní pro letecký a biomedicínský sektor, kde jsou přesně tyto charakteristiky žádané.

Jelikož se teprve nedávno podařilo vyrobit pomocí SLM mikro-prutové struktury z WE43 s dostatečnou vnitřní hustotou materiálu, nejsou mechanické vlastnosti těchto struktur doposud probádány. Především práce zkoumaly hlavně chování struktur při kvazistatických mechanických zkouškách. Vlastnosti těchto struktur při dynamickém namáhání dosud nebyly popsány. Hlubší poznání jejich vlastností by do budoucna umožnilo návrh lepších a efektivnějších součástí.

Tato práce se proto zaměřuje na dynamicky namáhané mikro-prutové struktury vyrobené pomocí SLM ze slitiny WE43. Zkoumá jejich chování při nízkorychlostních rázových zkouškách a schopnosti těchto struktur pohlcovat kinetickou energii nárazu.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Mikro-prutové struktury

Porézní materiály se využívají jako náhrada klasického plného materiálu kvůli odlehčení navrhovaných součástí při zachování strukturní pevnosti. Tyto materiály mohou ale vynikat i dobrou pružností a schopností absorbovat energii. Všestrannost jejich využití z nich dělá velmi zajímavé řešení pro spousty konstrukčních problémů v inženýrství.

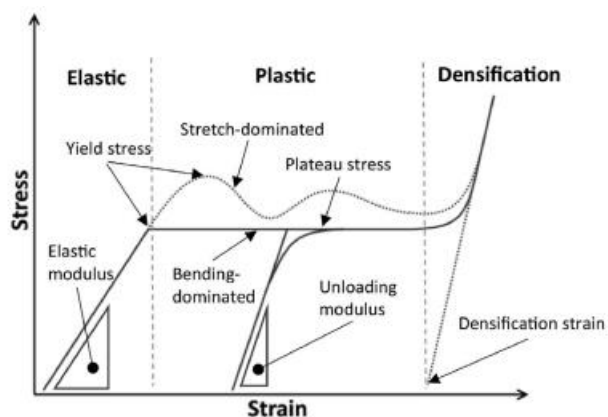
Nové aditivní metody umožňují výrobu porézních mikrostruktur s přesně definovanou geometrií. To znamená, že jde struktury přizpůsobit na míru dané aplikaci např. pomocí topologické optimalizace a dosáhnout tak co nejefektivnějšího využití materiálu. Řízené struktury tedy přináší značné výhody v porovnání s dříve dostupnými porézními materiály jako jsou např. kovové pěny, které mají stochastické uspořádání vnitřní strukturu, což může vést k nekonzistentním mechanickým vlastnostem [1].

Materiály s řízenou vnitřní strukturou se skládají ze sítě periodicky se opakujících základních stavebních buněk. Může jít o materiály s 2D uspořádáním jako jsou voštinové materiály, nebo o materiály s 3D uspořádáním [2]. U prostorově periodických struktur bývá geometrie základní buňky často založená na rozložení krystalické mřížky pevných látek. Běžně se tak setkáváme s uspořádáním do klasických struktur jako je BCC a FCC mřížka. Toto rozložení základní buňky může být spojeno pruty nebo plošnými skořepinovými prvky. Dalším možným stavebním prvkem jsou periodické minimální povrchy jako je např. Schoenův gyroid [1].

Struktury, které využívají jako základní stavební prvek pruty, nazýváme mikro-prutové struktury. Výhodou je jednoduchost jejich návrhu a také možnost je relativně přesně a jednoduše modelovat pomocí metody konečných prvků. Dalším konstrukčním pozitivem je fakt, že strukturou může proudit tekutina, narozdíl od struktur tvořených plošnými prvky. Toho lze využít třeba pro chlazení, nebo uložení paliva do takto vyztužené nosné struktury v automobilním nebo leteckém průmyslu [1]. V biomedicině je tato vlastnost také žádaná např. u kloubních implantátů, jelikož může dojít k průtoku tělních tekutin a lepšímu prorůstání kosti [3].

Struktury bývají zpravidla uspořádány do základních krychlových mřížek BCC a FCC, ale často jsou tyto struktury modifikovány. Běžné je přidání prutů ve vertikálním směru (BCCZ, FCCZ) [1]. Takto přidané vzpěry zvyšují pevnost a tuhost v tomto směru. Využívají se však i jiné struktury jako např. fluoritová nebo diamantová [4].

Při návrhu součástí, které využívají mikro-prutové struktury, je stěžejní zvolení správné geometrie základní stavební buňky. Uspořádání prutů má totiž značný vliv na mechanické vlastnosti výsledné struktury. Podle charakteristického chování při zatížení, dělíme prutové struktury na ty, kde převažuje zatížení jednotlivých prutů axiálními silami (stretch-dominated) a na ty, kde dominuje zatížení prutů ohybovým momentem (bending-dominated) (viz Obr. 2-1). [1]



Obr. 2-1 Dva základní průběhy napětí mikro-prutových struktur [1]

Pro popis statické určitosti mikro-prutové soustavy základní buňky používáme Maxwelllovo kritérium M , které je definováno v rovnici (1), kde s je počet prutů a n je počet styčníků [1].

$$M = s - 3n + 6 \quad (-) \quad (1)$$

Pro struktury s Maxwellovým kritériem $M \geq 0$ platí, že pruty jsou zatěžovány pouze na tah a tlak. Toto vede k vyšší pevnosti, ale jakmile je překročena tak dochází ke ztrátě vzpěrné stability první vrstvy prutů ve struktuře. To má za následek prudký pokles nosnosti následovaný opětovným nárůstem způsobeným zatížením následující vrstvy (viz Obr. 2-1). Tyto konstrukce jsou proto vhodné spíše pro nosné aplikace [5].

U struktur s $M < 0$ dochází k ohýbání prutů, což má za následek nižší mez pevnosti. Struktura však neosciluje, nýbrž průběh napětí na struktuře zůstává téměř konstantní (viz Obr. 2-1). Tento stálý a značně předvídatelný průběh napětí při deformaci dělá z těchto struktur vhodné kandidáty pro využití na absorbování energie [5].

2.2 Výroba mikro-prutových struktur

Mikro-prutové struktury jsou kvůli své tvarové komplexnosti pouze složitě vyrobitelné pomocí klasických metod. Aditivní technologie poskytují možnost dosáhnout i těchto náročných geometrií s tenkými pruty. Laser Powder Bed Fusion (LPBF) je technika výroby, která se pro tyto případy často používá, jelikož produkuje struktury s dostatečnou geometrickou přesností [1]. Pod ní spadá i metoda Selective Laser Melting (SLM).

Metoda SLM vznikla v Německu v devadesátých letech dvacátého století. Funguje na principu natavování práškového materiálu. Tenká vrstva prášku se rovnoměrně rozprostře po základní desce. Laserovým paprskem se nataví dané části vrstvy tak, aby se zrna prášku ve vrstvě spojila dohromady a zároveň přilnula k předešlé vrstvě. Proces se následně zopakuje a takto se pokračuje po jednotlivých vrstvách, dokud není vyráběná součást dokončena. Celý proces probíhá v ochranné atmosféře, aby se zabránilo oxidaci, která má nepříznivý vliv na porozitu výsledného materiálu. [6]

Hlavními parametry při výrobě jsou výkon laseru, skenovací rychlost paprsku a vzdálenost sousedních drah. Dalším důležitým prvkem je skenovací strategie, která určuje dráhu paprsku při natavování práškové vrstvy. Výsledný produkt ovlivňuje také velikost zrn prášku a tloušťka jeho nanášené vrstvy. Vhodnou kombinací výrobních parametrů, prášku a trajektorie laseru lze vytvořit součásti s velmi nízkou vnitřní porozitou, které mohou mít dokonce lepší vlastnosti než tradiční metody používané pro výrobu komplexních geometrií z daného materiálu. [6]

Touto metodou lze zpracovávat nejrůznější materiály. Nejčastěji se používají ocelové a hliníkové slitiny jako jsou např. SS316L, AlSi10Mg, ale i slitiny materiálu jakým je titan (Ti6Al4V) [1]. Takto vyráběné díly se vyskytují v různých odvětvích průmyslu, ať už jde o automobilní, letecký nebo biomedicinský sektor [1]. Jako velmi perspektivní se jeví také slitiny hořčíku. Obzvláště pro biomedicínské a letecké inženýry je atraktivní nízká hustota a dobrá biokompatibilita hořčíku. Nevýhodou pro SLM zpracování hořčíku je ale jeho nízká korozivzdornost a nízká teplota vzplanutí v práškové formě [6]. Tyto nežádoucí vlivy ale byly potlačeny vývojem nových slitin s přidáním vzácnými prvky jako jsou Y, Gd, Ce, Nd.

Takovou slitinou je i WE43, která se používá ve vícero odvětvích, kvůli své vysoké pevnosti a korozivzdornosti. V letectví a automobilním průmyslu se používá např. pro výrobu součástí raket, vrtulníků, závodních kol, převodovek apod. [4]. Materiál je též zajímavý i pro medicínu hlavně díky skvělé biokompatibilitě s lidským tělem. Materiál není pro tělo závadný, dokáže se bez větších problémů vstřebat a tělo je schopné ho snadno vyloučit. Při vstřebávání dokonce podporuje regeneraci a růst kostí, a proto se pro svůj osteogenezní efekt používá např. jako materiál pro výrobu chirurgických šroubů [3]. Všechny tyto vlastnosti slitiny WE43 a možnost zpracovávat ji pomocí SLM z ní dělají atraktivního kandidáta pro použití v mikro-prutových strukturách.

2.3 Mikro-prutové struktury ze slitiny WE43 vyrobené metodou SLM

Dosavadní výzkum je motivován hlavně jejich potenciálním využitím v medicíně jako dočasných podpůrných struktur nebo samotných kostních implantátů. Z tohoto důvodu se často studie zabývají chováním tohoto materiálu v prostředí lidského těla a jaký má postupné vstřebávání vliv na mechanické vlastnosti struktur. Tyto informace jsou užitečné pro použití v kostních implantátech, kde se dá optimalizací tuhosti struktur přiblížit vlastnostem nahrazované kosti a předejít tak výkyvům napětí, které vznikají při zatěžování dané oblasti mezi klasickými implantáty a kostí, právě kvůli rozdílným tuhostem [3].

Právě biodegradaci struktur a mechanickými vlastnostmi v jejím průběhu se zabývali Y. Li et al. v [7]. Byli schopni pomocí SLM vyrobit struktury s diamantovou základní buňkou o průměru prutu 400 μm s vysokou geometrickou přesností. Struktury testovali tlakovým zatížením a simulovali jejich degradaci v prostředí podobném podmínkám v lidském těle v průběhu 4 týdnů. Napětí na strukturách mělo na počátku průběh typický pro prutové soustavy s pruty zatíženými axiálními silami. V průběhu experimentu došlo k degradaci struktur ke snížení pevnosti. Oscilace průběhu napětí pro tento typ struktur typické, se ale s přibývajícím časem stráveným v simulovaném prostředí značně mírnily. Ukázalo se, že mechanické vlastnosti struktury byly v celém průběhu experimentu podobné mechanickým vlastnostem kyčelní kosti a míra odbourávání a koroze struktury byla vhodná pro použití v kostních implantátech. Na toto navázali v [8], kde byly zkoumány únavové vlastnosti těchto vzorků. Při testech docházelo k únavovým lomům v oblastech vzájemného styku prutů, kvůli koncentraci napětí v těchto místech.

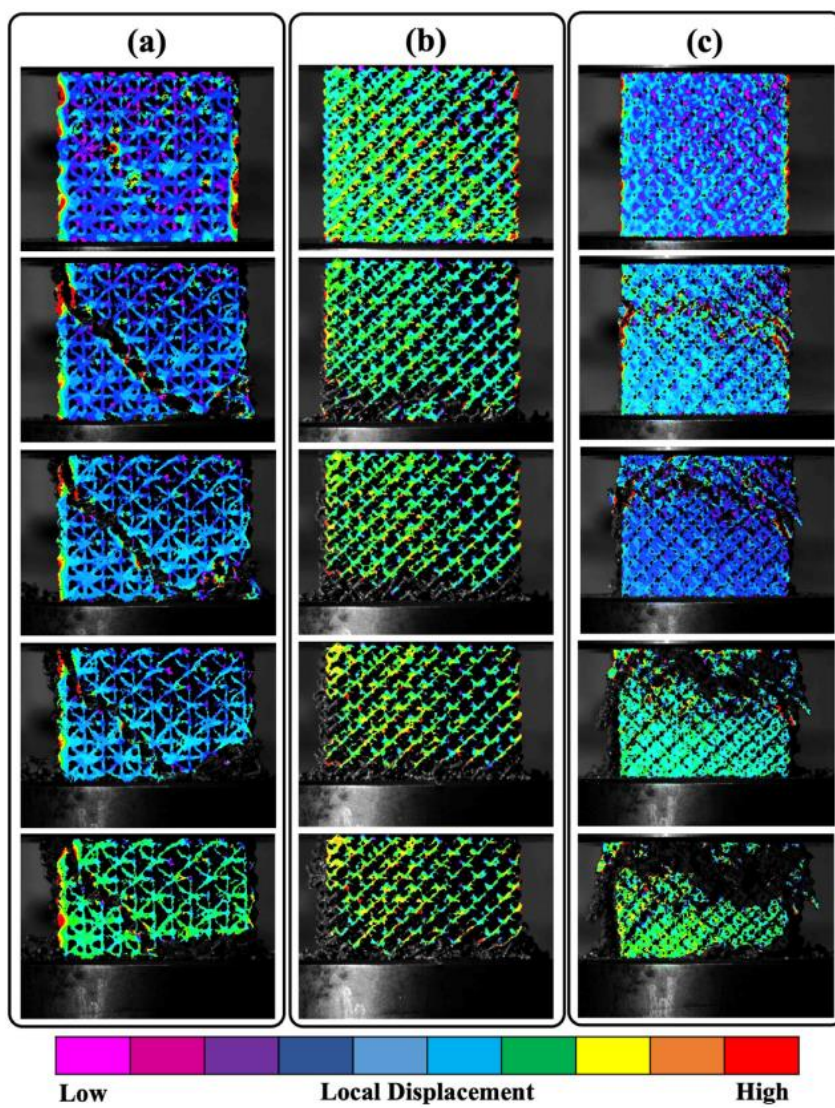
Vliv výrobních parametrů na struktury a biodegradace *in vitro* a *in vivo* na struktury zkoumali J. Liu et al. v [9]. Testovali diamantovou základní buňku s průměry prutů 300, 400 a 500 μm . U této buňky pozorovali podobně jako v [7] oscilace napětí charakteristické pro struktury s axiálně zatíženými pruty. Bylo znatelné, jak se struktura deformuje po vrstvách. Nebyl pozorovaný žádný celkový lom struktury po smykových rovinách. Také prokázali závislost mechanických vlastností na základní buňce struktury, když porovnali struktury s BCC základní buňkou se strukturami založenými na gyroidech o stejné relativní hustotě. Mechanismy deformace těchto struktur však nebyly popsány.

Pro tuto práci byl zajímavý výzkum provedený M. Li, et al. v [3]. Studie se zabývala vlivem průměrů prutů a povrchové úpravy na mechanické a korozní vlastnosti mikro-prutových struktur. Vzorky měly rozměry 10 \times 10 \times 10 mm a základní buňku BCC o velikosti 2,5 \times 2,5 \times 2,5 mm s průměry prutů 250, 500 a 750 μm . Struktury byly testovány tlakovým zatížením o rychlosti stlačení 0,6 mm min^{-1} až do 60% poměrné deformace. Průběh napětí dosáhl maxima a pak osciloval, což je typické pro pruty zatížené axiálně.

Důležité bylo pozorování dvou mechanismů deformace u struktur. Struktury s pruty o průměru 500 μm a 750 μm se deformovaly postupným selháváním vrstev, kdy v deformované vrstvě docházelo v prutech k lomovým frakturám rovnoběžným se směrem zatěžování. Struktura s nejmenším průměrem prutu vykazovala postupnou deformaci po vrstvách pouze na začátku a poté došlo k propagaci lomu napříč celou strukturou po smykové rovině pod úhlem 45 ° vzhledem ke směru zatížení. Jiný mechanismus deformace měl za následek nižší měrnou pevnost struktury, než byla naměřena u vzorků s většími průměry prutů. Popouštění struktur nezvýšilo pevnost struktur, ale mělo za následek plastickou deformaci prutů při selhávání jednotlivých vrstev namísto lomu, který byl pozorován u neupravených vzorků. Korozivzdornost struktur se povedlo zlepšit povrchovou úpravou na bázi fosfátového elektrolytu aplikovanou plazmovou elektrolytickou oxidací. [3]

Čistě mechanické vlastnosti mikrostruktur a jejich závislost na geometrii základní buňky pak nejvíce do hloubky zkoumali H. Hyer, L. Zhou, Q. Liu et al. [4]. Autoři navazovali na předešlou práci T. Yu et al. [10], kde bylo pomocí SLM ze slitiny AlSi10Mg vyrobeno 6 základních mřížek, díky modifikacím průměru prutů a počtu základních buněk ve struktuře, celkem 24 mikro-prutových struktur. Autoři vzali stejné základní buňky a ze slitiny WE43 pomocí SLM s využitím contour strategie vyrobili ekvivalentní struktury, pouze s rozdílnými tloušťkami prutů. Struktury následně podrobili kvazistatické tlakové zkoušce do 35 % poměrného stlačení, aby získali jejich mechanické vlastnosti a mohli popsat mechanismy deformace.

Nebyl pozorován značný rozdíl v relativní pevnosti struktur napříč buňkami. Pevnost byla závislá hlavně na relativní hustotě. Rozdílné uspořádání prutů v buňkách se však promítlo do mechanismů deformace. Jedním z hlavních mechanismů byl téměř okamžitý lom struktury po smykové rovině pod úhlem 45 ° vzhledem ke směru zatěžování (viz Obr. 2-2 a). Průběhy napětí takto deformovaných vzorků měly typické oscilace mezi jednotlivými maximy. U buňky založené na osmistěnu docházelo ke kontinuální deformaci po vrstvách ve spodní části struktury (viz Obr. 2-2 b). Napětí mělo po dosažení maxima téměř konstantní průběh, jenž je charakteristický pro struktury, v nichž převládá ohyb prutů. Čtyřstěnná buňka vykazovala u struktury počáteční vznik 45° lomu podél smykové roviny, ale přešla do kontinuální deformace v oblasti jejího vzniku (viz Obr. 2-2 c). Průběh napětí měla buňka stejný jako vzorky, kde došlo pouze ke vzniku 45° lomu napříč celou strukturou. [4]



Obr. 2-2 Pozorované deformace: (a) lom pod úhlem 45 °, (b) deformace po vrstvách, (c) deformace po vrstvách po počátečním lomu [4]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Mikro-prutové struktury jsou díky svým jedinečným vlastnostem vhodným řešením pro snížení hmotnosti klasických objemových dílů v mnoha odvětvích průmyslu. Možnost modifikovat jejich mechanické chování změnou geometrie základní buňky nebo průměru prutů poskytuje značnou flexibilitu při návrhu struktury pro zamýšlené využití. Takovéto struktury lze přizpůsobit pro nosné aplikace, kdy je žádoucí vysoká pevnost, nebo pro pohlcování energie, kdy je žádoucí mít předvídatelný a konstantní průběh deformace.

Hořčík je materiál, který začíná být pouze v nedávné době pro výrobu mikro-prutových struktur používán. Obtížné zpracování pomocí aditivních metod jako je SLM bránilo jeho většímu využití, dokud nepřišly nové slitiny s vyšší korozivzdorností. Hořčíková slitina WE43 se ukázala jako vhodná pro výrobu mikro-prutových struktur poté, co bylo dosaženo vhodnou volbou parametrů SLM relativní hustoty materiálu $> 99 \%$ [4]. Díky své vysoké relativní pevnosti a vynikající biokompatibilitě WE43, jsou mikro-prutové struktury právě z této slitiny atraktivní pro letecké a biomedicínské inženýry.

Velká část výzkumu se věnuje převážně využití WE43 v biomedicínském sektoru, a tak se často soustředí na vliv biodegradace struktur v prostředí lidského těla na jejich mechanické vlastnosti. Při těchto testech se zpravidla provádí kvazistatické tlakové zkoušky [3, 4, 7, 9], nebo se zkoumá cyklické namáhání struktur [8]. Existují ale i studie zabývající se pouze samotnými mechanickými vlastnostmi struktur, jako je [4], kde autoři porovnávali různé geometrie základní buňky a jejich vliv na pevnost struktury.

Statické mechanické zkoušky mikrostruktur vyrobených pomocí SLM z WE43 byly již částečně prozkoumány [3, 4]. Kde ale chybí jakákoliv data, jsou rázové zkoušky těchto mikrostruktur. Tyto testy by mohly poskytnout nové poznatky pro to, jak struktury absorbují energii. Při těchto zkouškách by se daly pozorovat a popsat mechanismy deformace, ke které během pohlcování energie rázů ve strukturách dochází. Analýzou těchto poznatků by se dala posoudit vhodnost hořčíkových (WE43) mikro-prutových struktur pro jejich aplikaci jako energetické absorbéry nebo kostní implantáty v biomedicině, kdy při pohybu také dochází hlavně k rázovému zatěžování.

3.2 Cíl práce

Cílem této práce je otestovat chování mikro-prutových struktur vyrobených pomocí SLM při dynamickém zatěžování rázy a podle pozorovaných charakteristik následně zhodnotit vliv geometrie základní buňky na chování při namáhání a posoudit využití těchto struktur pro aplikaci jako absorbéry energie.

Dílčí cíle práce jsou:


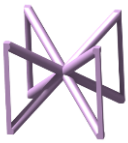

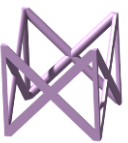

- návrh základní sady vzorků pro experiment a volba parametrů, jejichž vliv na chování struktury bude zkoumán
- vyrobit, zdokumentovat a připravit vzorky na testování
- provést nízkorychlostní nárazovou zkoušku vyrobených vzorků pomocí pádového testeru
- na základě naměřených dat a záznamu testu porovnat jednotlivé vzorky z hlediska schopnosti pohlcovat energii a popsat jejich deformační chování

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Návrh experimentu

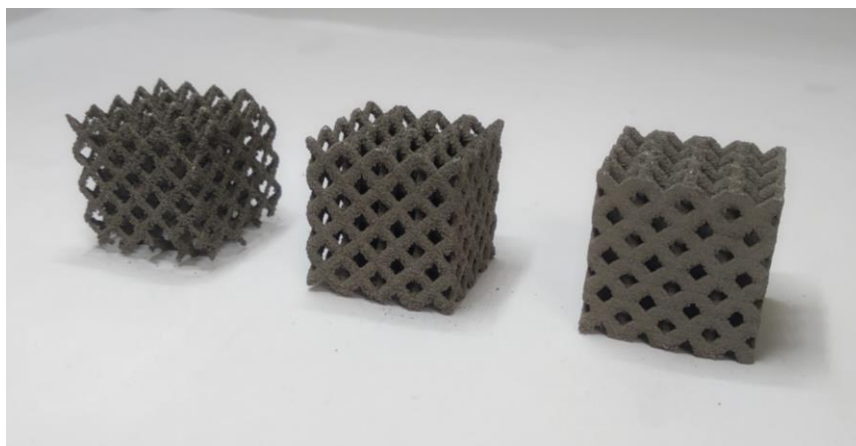
Zkoumané mikro-prutové struktury byly navrženy s rozměry $20 \times 20 \times 20$ mm s rozměry $5 \times 5 \times 5$ mm. Jako geometrie základní buňky byly zvoleny základní kubické mřížky BCC a FCC, jejich modifikace BCCZ a FCCZ vzniklé přidáním vertikálních vzpěr a také FBCCZ, která vznikne spojením těchto dvou základních kubických mřížek a vertikálních vzpěr. Buňky základní kubické mřížky byly zvoleny, protože se jedná o nejběžněji používané struktury v literatuře. Podobná sada se testovala v [11], kde byla jako nejefektivnější pro absorpci energie vyhodnocena buňka FCCZ.

Tab. 4-1 Přehled použitých buněk a hodnota jejich M

	BCC	BCCZ	FCC	FCCZ	FBCCZ
Základní buňka					
Maxwellovo kritérium	-13	-9	-14	-10	-5

V Tab. 4-1 jsou také u jednotlivých vzorků uvedené hodnoty Maxwellova kritéria. Dle kritéria se dá předpokládat chování struktury při zatížení. Záporné hodnoty M naznačují, že by pruty měly být zatěžované ohybovým momentem, což by mělo způsobit téměř konstantní průběh napětí, který je pro absorberý energie žádoucí. Přidáním vertikálních vzpěr k základní buňce ale dochází ke změně, kdy struktury vykazují charakteristiky podobné soustavám s axiálně zatíženými pruty [1]. Navíc i u hořčíkové mikrostruktur bez vzpěr s $M < 0$ autoři [3, 4] pozorovali průběh napětí charakteristický spíše pro struktury s pruty zatěžovanými pouze na tah a tlak. Tento jev přisuzovali tendenci prutů selhávat v lomu místo očekávané plastické deformace.

Každá z těchto pěti základních buněk byla vyrobena ve třech variantách lišících se průměrem prutů (viz Obr. 4-1). Jednalo se o průměry 0,5 mm; 1,0 mm a 1,5 mm. Celkem tedy bylo vyrobeno 15 vzorků určených pro rázové testování.



Obr. 4-1 Sada vzorků s buňkou FCC

Pro analýzu rozměrových odchylek průřezu prutů jednotlivých struktur, byly vyrobeny shodné základní buňky každého z 15 vzorků pro rázové zkoušky. Samotná základní buňka byla zvolena kvůli snazšímu získání úplného 3D skenu, kterého by se kvůli stínění u vzorků pro rázové zkoušky nedalo dosáhnout. Touto analýzou lze sledovat jevy spojené s výrobou tenkých prutů pomocí SLM, jako je např. nerovnoměrné natavování práškového materiálu v různých směrech [1]

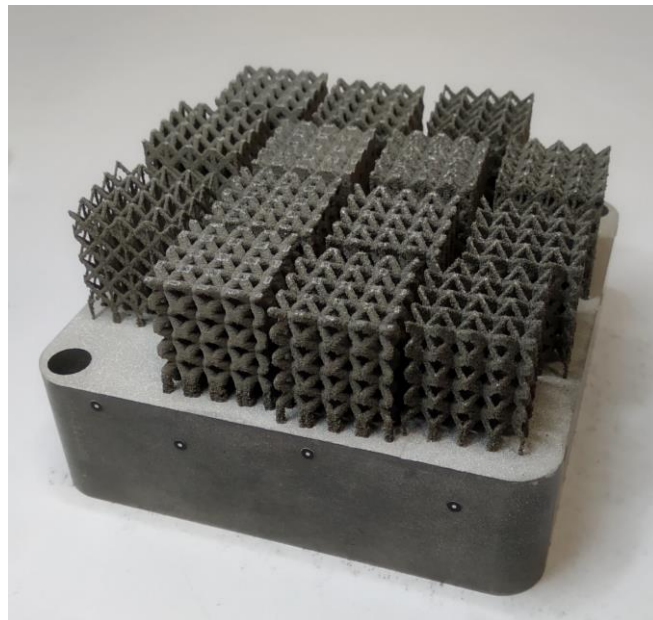
4.2 Výroba vzorků

Vzorky byly vyrobeny metodou SLM na stroji SLM 280^{HL} (SLM Solutions Group AG, Lübeck, Německo). Stroj využívá ytterbiový laser s průměrem paprsku 82 μm . Použitý prášek slitiny WE43 měl částice o velikosti v rozmezí 28-60 μm s průměrnou velikostí 39,8 μm . Aby se předešlo oxidaci hořčkové slitiny, při výrobním procesu byla použita ochranná argonová atmosféra, díky které byla koncentrace kyslíku udržovaná pod hranicí 0,1 %.

Vzorky byly vyráběny pomocí contour skenovací strategie, protože i u tenkých prutů se s ní dá dosáhnout nízké vnitřní porozity v porovnání s ostatními strategiemi [12]. Procesní parametry byly zvoleny na základě předchozích experimentů provedených na odboru Reverzního inženýrství a aditivních technologií. Pomocí použitých parametrů byly vyrobeny pruty s relativní hustotou vyšší než 99 %. Použitý výkon laseru byl 79,29 W, skenovací rychlost 317,16 mm s^{-1} ; tloušťka vrstvy prášku 0,05 mm; překrytí drah 50 % a teplota výrobní platformy 120 °C.

4.3 Zpracování vyrobených vzorků

Struktury byly po dokončení výrobních operací ofouknuty stlačeným vzduchem, aby se oddělily částičky prášku, které nebyly zcela natavené. Následně byly struktury odděleny od výrobní platformy. Vzorky byly po odřezání zbrusněny na rovinu pomocí brusného papíru. Vzorky nebyly dále již nijak tepelně nebo povrchově upravovány.



Obr. 4-2 Vzorky před oddělením z výrobní platformy

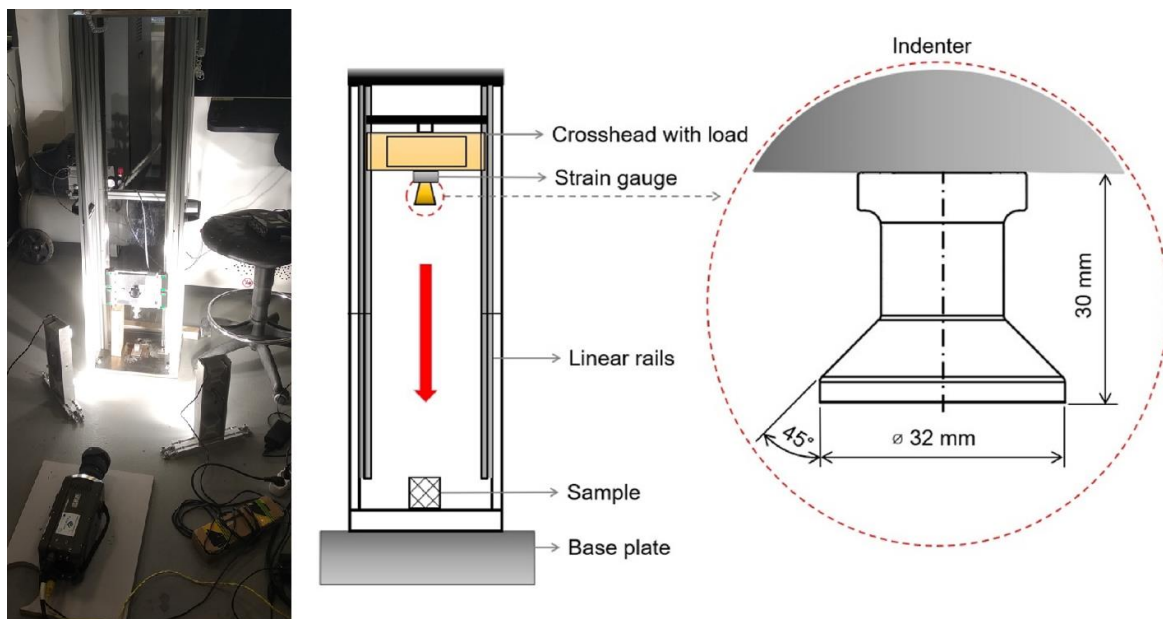
Takto připravené vzorky byly změřeny posuvným měřidlem a zváženy, aby se dala určit hustota vzorků ρ (kg m^{-3}). Porovnáním ρ s hustotou použité slitiny WE43 $\rho_{WE43} = 1800 \text{ kg m}^{-3}$ [13] se následně dle rovnice (2) určí relativní hustota struktury ρ_{RE} (-). Ta poskytuje informaci o hmotnostním poměru mikro-prutové struktury v porovnání s objemovým materiálem.

$$\rho_{RE} = \frac{\rho}{\rho_{WE43}} \quad (-) \quad (2)$$

Rozměry vzorků byly porovnány s CAD modely struktur. Takto lze vyhodnotit přesnost výrobního procesu a zvolené konfigurace výrobních parametrů pro budoucí struktury a případnou dodatečnou optimalizaci rozměrové přesnosti. Vzorky byly dále nasnímány mikroskopem Olympus SZX7 (Olympus, Tokyo, Japonsko), kvůli vyhodnocení kvality povrchu prutů.

4.4 Rázová zkouška

K dynamickým napěťovým zkouškám struktur byl použit pádový tester vyvinutý na VUT v Brně (viz Obr. 4-3). Zařízení funguje na principu spouštění lineárně vedené hlavy s indentorem a závažím na testovanou strukturu z předem zvolené výšky. Hlava je urychlována pouze tíhovou silou, a tak změnou závaží nebo výšky, z které je hlava vypouštěna, dochází k regulaci energii nárazu, které bude zkoumaný vzorek vystaven. Maximální hmotnost hlavy je 13,45 kg a nejvyšší výška, z níž může být spuštěna, je 1 m.



Obr. 4-3 Tester použitý pro rázovou zkoušku [14]

Na testeru je tenzometr XY31-3/120 (HBM GmbH, Darmstadt, Německo), pomocí kterého je zaznamenávána síla působící na indenter při deformaci vzorku. Data z tenzometru zaznamenává s frekvencí 96 kHz systém Quantum X MX410B (HBM GmbH, Darmstadt, Německo) Pád měřící hlavy, označené kontrastním bodem, a jí způsobenou deformaci vzorku snímá vysokorychlostní kamera Phantom V710 (Vision Research, Wayne, New Jersey, USA). Záznam s frekvencí 56808 Hz z kamery je zpracován softwarem Phantom Camera Control (Vision Research, Wayne, New Jersey, USA). Záznam z kamery je analyzován a dle změny pozice kontrastního bodu je určena rychlost s níž hlava dopadá na vzorek. Záznam je synchronizován s daty z tenzometru a dojde k analýze rázové zkoušky. Celý proces vyhodnocení vzorků probíhá v programu MATLAB R2022a (MathWorks, Natick, Massachusetts, USA) pomocí algoritmu vyvinutého na Ústavu konstruování.

Při testování vyrobených struktur byla hmotnost měřící hlavy nastavena na 9,45 kg. Spouštěna byla z výšky 1 m. Touto konfigurací bylo v momentě dopadu dosaženo rychlosti přibližně $2,4 \text{ m s}^{-1}$, což odpovídá energii nárazu 27,2 J. Zkoušky proběhly v laboratořích Ústavu konstruování.

4.5 Vyhodnocení dat z rázové zkoušky

Pomocí dat z kamery a tenzometru na měřící hlavě je známá poloha indentoru, jeho rychlost a také síla která na něj působí v průběhu impaktu. Napětí na struktuře je určeno jako reakční síla na indentoru vztažená na plochu vzorku kolmou na směr dopadu (20×20 mm). Poměrné stlačení struktury se vypočítá jako poměr výšky deformované struktury s její počáteční výškou. Ze získaných veličin se určí závislost napětí na poměrném stlačení.

Množství absorbované energie na jednotku objemu W_V (J m^{-3}) je definováno rovnicí (3) jako plocha pod křivkou závislosti napětí na poměrné deformaci [14]. Aby bylo možné struktury mezi sebou porovnávat, bude třeba vyhodnocovat energii pohlcenou při stejné poměrné deformaci. Jako tuto hodnotu je volena nejmenší naměřená deformace $\varepsilon_{MAX} = 0,9$, jenž byla zaznamenána na vzorku s buňkou FCCZ s průměrem prutu $d = 1,5$ mm.

$$W_V = \int_0^{\varepsilon_{MAX}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (\text{J m}^{-3}) \quad (3)$$

Pro porovnání struktur je ale důležité brát v potaz také jejich hmotnost. Absolutní množství energie W_V je tedy vztaženo na relativní hustotu vzorků ρ , čímž se dostane hodnota měrné absorbované energie ψ (J kg^{-1}) podle rovnice (4) [14].

$$\psi = \frac{W_V}{\rho} \quad (\text{J kg}^{-1}) \quad (4)$$

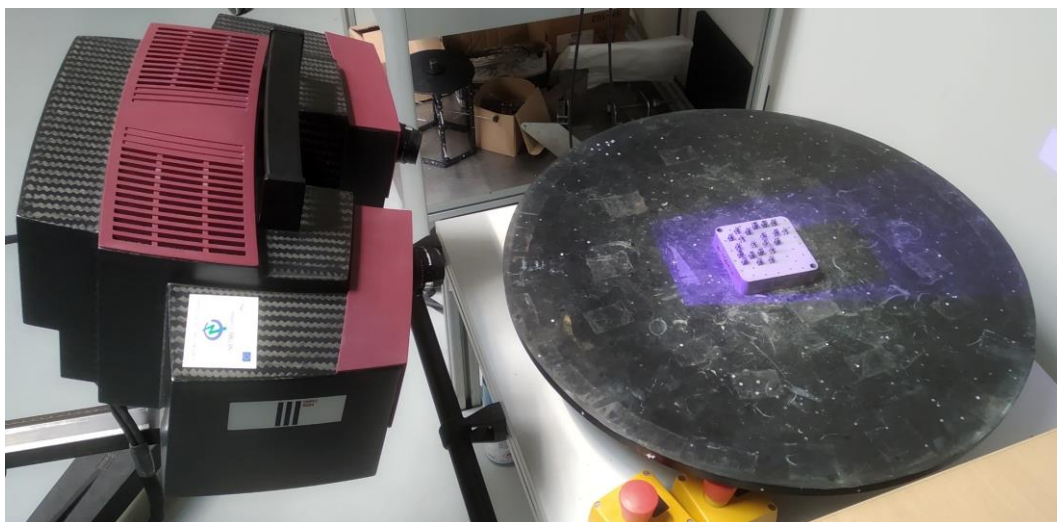
4.6 Měření rozměrové přesnosti prutů

Vzorky pouze základních buněk určené pro skenování a vyhodnocování průřezu prutů, byly po výrobě zpracovány obdobně jako struktury, avšak nebyly odděleny od základní desky (viz Obr. 4-4). Toto řešení bylo zvoleno kvůli tomu, že deska při skenování výrazně nepřekáží a buňky byly tak malé a křehké, že by s vysokou pravděpodobností nebylo možné oddělit je bez značného porušení vzorků.



Obr. 4-4 Vzorky buněk připravené pro skenování

Tyto základní buňky byly následně naskenovány pomocí zařízení ATOS Triple Scan III (Carl Zeiss GOM Metrology GmbH, Braunschweig, Německo). Ze vzniklého 3D skenu byly pomocí programu GOM Inspect 2018 (Carl Zeiss GOM Metrology GmbH, Braunschweig, Německo) vyhodnoceny rozměrové odchylky prutů jednotlivých buněk od CAD modelu.



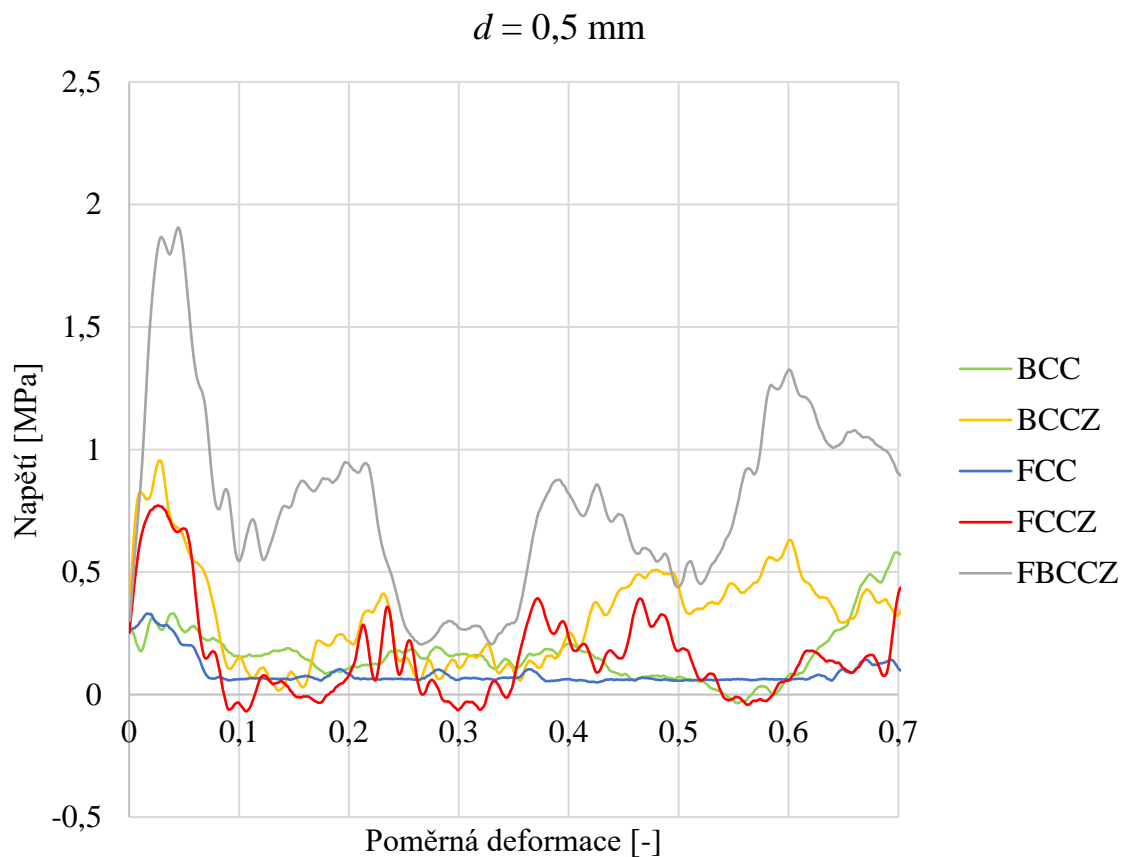
Obr. 4-5 Skenování základních buněk

5 VÝSLEDKY

5.1 Rázová zkouška

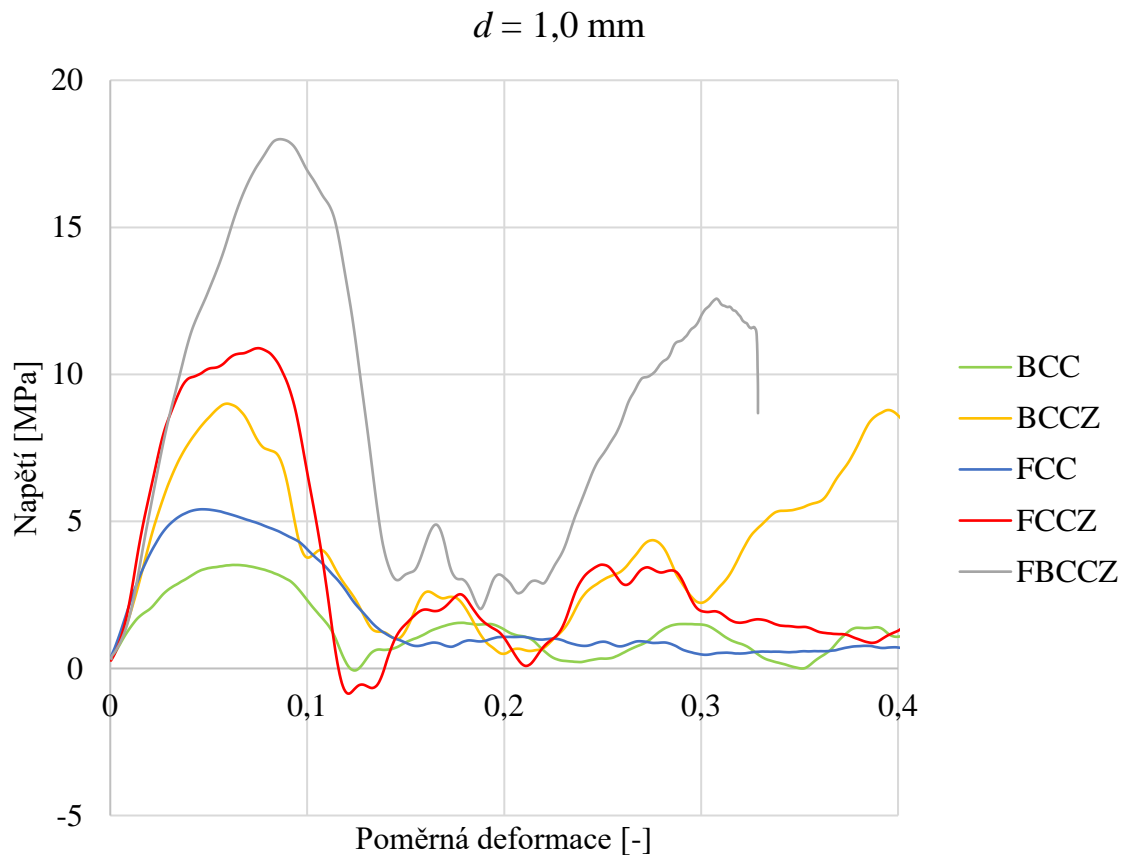
Při vyhodnocování byly porovnány závislosti napětí na deformaci jednotlivých vzorků. Podle průběhu napětí a plochy pod jeho křivkou lze dobře pozorovat efektivitu porovnávaných struktur při absorpci energie.

Při testování struktur s průměrem prutu $d = 0,5$ mm byla největší naměřená mez pevnosti o velikosti 1,91 MPa pozorovaná na struktuře FBCCZ. Nejmenší zaznamenaná hodnota byla naměřena na strukturách BCC i FCC, kdy u obou byla mez pevnosti 0,33 MPa. Na průběhu napětí je u všech struktur patrné výrazné první maximum následované poklesem napětí s oscilacemi kolem nižších hodnot (viz Obr. 5-1).



Obr. 5-1 Závislost napětí na poměrné deformaci vzorků s $d = 0,5$ mm

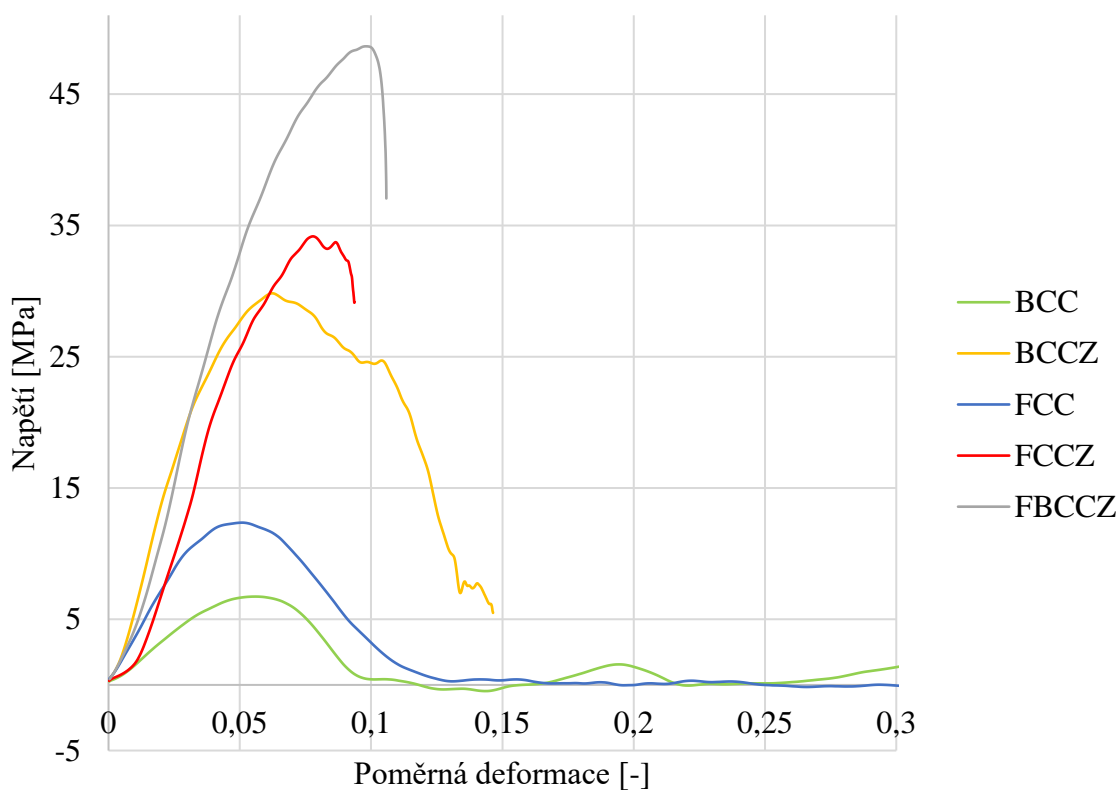
Při testování struktur s průměrem prutu $d = 1,0$ mm byla největší naměřená mez pevnosti o velikosti 18,0 MPa pozorovaná na struktuře FBCCZ. Nejmenší zaznamenaná hodnota meze pevnosti 3,52 MPa byla na struktuře BCC. V porovnání se vzorky $d = 0,5$ mm byl dosažen nárůst maximální meze pevnosti o 842 % a minimální o 967 %. Na Obr. 5-2 jsou patrné oscilace za prvním maximem, ačkoliv u buňky FCC jsou pouze velmi mírné. Toto chování odpovídá strukturám, kde převažuje zatěžování prutů axiálními silami. Průběhy napětí jsou zřetelně hladší než na Obr. 5-1.



Obr. 5-2 Závislost napětí na poměrné deformaci vzorků s $d = 1,0$ mm

Při testování struktur s průměrem prutu $d = 1,5$ mm byla největší naměřená mez pevnosti o velikosti 48,64 MPa pozorovaná na struktuře FBCCZ. Nejmenší zaznamenaná hodnota meze pevnosti 6,73 MPa byla na struktuře BCC. Již nedošlo k tak velké změně mezi pevností jako při přechodu z $d = 0,5$ mm na $d = 1,0$ mm. V porovnání s $d = 1,0$ mm se maximální hodnota zvýšila o 170 % a minimální hodnota o 91 %. Dosaženo bylo pouze nízké deformace na většině struktur, takže nelze vyhodnotit celý průběh (viz Obr. 5-3). Tento stav je kompromisem pro měření porovnatelných hodnot pro všechny průměry struktur, jelikož byla energie nárazu pro všechny vzorky stejná. Všechny struktury ale mají patrné prvotní maximum následované prudkým poklesem, takže se dá usoudit, že by při větších deformacích byla patrná typická oscilace. BCC má oscilaci pouze nepatrnou a u FCC je průběh napětí po maximum téměř nulový.

$d = 1,5$ mm



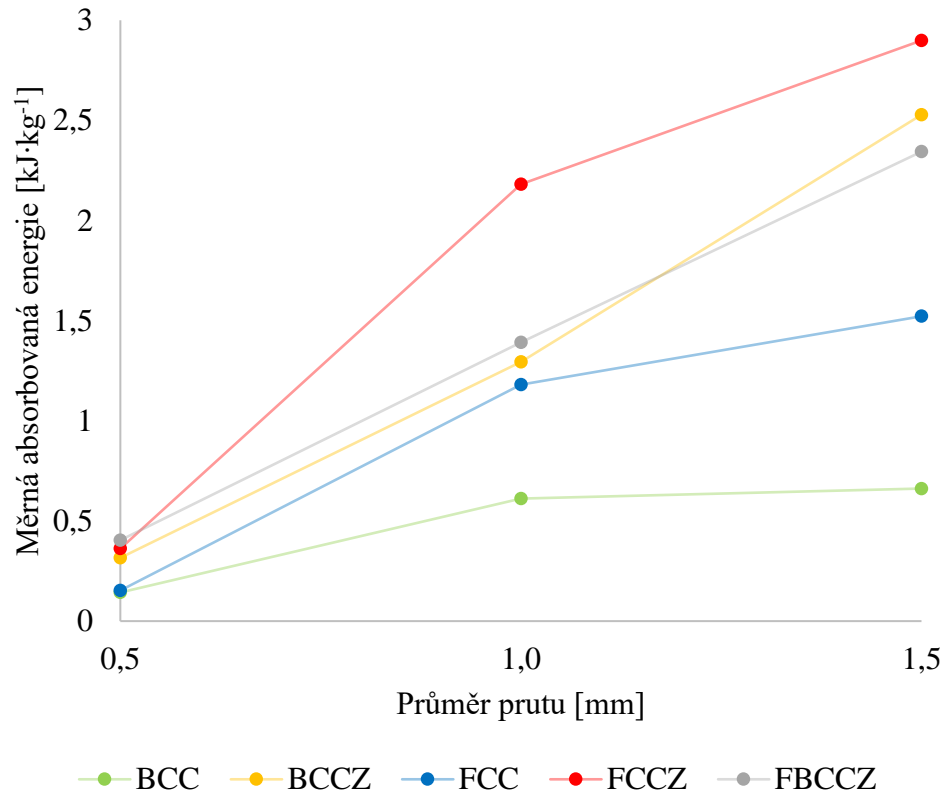
Obr. 5-3 Závislost napětí na poměrné deformaci vzorků s $d = 1,5$ mm

Z průběhů napětí se určilo množství pohlcené energie vztažené na objem W_V a měrná absorbovaná energie ψ (viz Tab. 5-1). Porovnání specifické absorbované energie jednotlivých vzorků je pro lepší názornost zaznamenáno do grafu (viz Obr. 5-4). Nejefektivnější se ukázala být buňka FCCZ s nejvyšší dosaženou hodnotou $\psi = 2,899 \text{ kJ kg}^{-1}$.

Tab. 5-1 Charakteristické veličiny absorpce energie

Buňka	<i>d</i> (mm)	W_V (kJ m ⁻³)	ψ (kJ kg ⁻¹)
BCC	0,5	22,9	0,143
BCC	1,0	246,9	0,611
BCC	1,5	398,7	0,662
BCCZ	0,5	55,0	0,316
BCCZ	1,0	571,2	1,294
BCCZ	1,5	1911,4	2,528
FCC	0,5	18,6	0,153
FCC	1,0	394,1	1,181
FCC	1,5	782,0	1,522
FCCZ	0,5	43,7	0,362
FCCZ	1,0	741,9	2,182
FCCZ	1,5	1804,8	2,899
FBCCZ	0,5	117,1	0,404
FBCCZ	1,0	978,7	1,391
FBCCZ	1,5	2454,2	2,344

Na Obr. 5-4 je vidět že u prutů s $d = 0,5$ byly struktury z hlediska ψ velmi vyrovnané. Hodnota ψ se postupně u všech zvyšovala až na BCC, kde byla měrná absorbovaná energie u prutů s $d = 1,0$ mm a $d = 1,5$ mm téměř totožná. U FCC a FCCZ se růst postupně zvolňuje, ale u BCCZ a FBCCZ stoupá hodnota ψ v závislosti na d lineárně. Také je vidět, že vzpěry kolmé na zatěžovanou plochu, významně zvyšují efektivitu.



Obr. 5-4 Měrná absorbovaná energie jednotlivých vzorků

5.2 Rozměrová přesnost struktur

Rozměry a hmotnost vzorků použitých při rázových zkouškách jsou v Tab. 5-2. Odchyly od CAD modelů ($20 \times 20 \times 20$ mm) jsou způsobeny přilnutím zrn práškového materiálu v okolí laserem tavené části v průběhu výrobního procesu. Z rozměrových hodnot a hmotnosti byla dopočítána hustota vzorků ρ . Dle rovnice (2) pak byla určena relativní hustota ρ_{RE} vzhledem k objemovému materiálu ρ_{WE43} .

Tab. 5-2 Rozměry, hmotnost a hustota vzorků

Buňka	d (mm)	Výška vzorku (mm)	Podstava vzorku (mm × mm)	Hmotnost vzorku (g)	ρ (kg m ⁻³)	ρ_{RE} (%)
BCC	0,5	20,07	20,02 × 20,02	1,286	159,9	8,9
BCC	1,0	20,08	20,03 × 20,03	3,254	403,9	22,4
BCC	1,5	20,02	20,01 × 20,01	4,827	602,2	33,5
BCCZ	0,5	20,04	20,04 × 20,04	1,401	174,4	9,7
BCCZ	1,0	20,07	20,04 × 20,04	3,554	441,4	24,5
BCCZ	1,5	20,04	20,03 × 20,03	6,072	756,0	42,0
FCC	0,5	20,04	20,02 × 20,02	0,980	121,5	6,8
FCC	1,0	20,04	20,03 × 20,03	2,685	333,6	18,5
FCC	1,5	20,04	20,02 × 20,02	4,132	513,9	28,6
FCCZ	0,5	20,01	20,04 × 20,03	0,971	120,9	6,7
FCCZ	1,0	20,03	20,02 × 20,02	2,729	339,9	18,9
FCCZ	1,5	20,07	20,03 × 20,03	5,013	513,9	34,6
FBCCZ	0,5	20,07	20,04 × 20,04	2,334	289,6	16,1
FBCCZ	1,0	20,03	20,03 × 20,03	5,654	703,6	39,1
FBCCZ	1,5	20,04	20,02 × 20,02	8,410	1047,1	58,2

Rozměrové odchylky prutů byly určeny z 3D skenu. U metody SLM klesá rozměrová přesnost s úhlem náklonu prutu k výrobní platformě [1]. Nejmenší sklon vzhledem k podstavě 35,26 ° je u prutů buňky BCC, a proto byly právě tyto pruty měřeny (viz Tab. 5-3). Průměr prutu d_{Vzorek} (mm) je určen jako průměr válce reprezentujícího průměrnou odchylku. Průměr $d_{Vepsany}$ (mm) je definován jako průměr válce vepsaného pásnu odchylek. Vepsaný průměr se dá uvažovat jako skutečná nosná část průřezu. Dostane se tak maximální odchylka rozměrů prutů přítomných na strukturách.

Tab. 5-3 Rozměrové odchylky prutů se sklonem 35,26 °

d_i (mm)	d_{Vzorek} (mm)	$d_{Vepsany}$ (mm)
0,5	1,15	0,66
1,0	1,61	1,27
1,5	2,05	1,62

6 DISKUZE

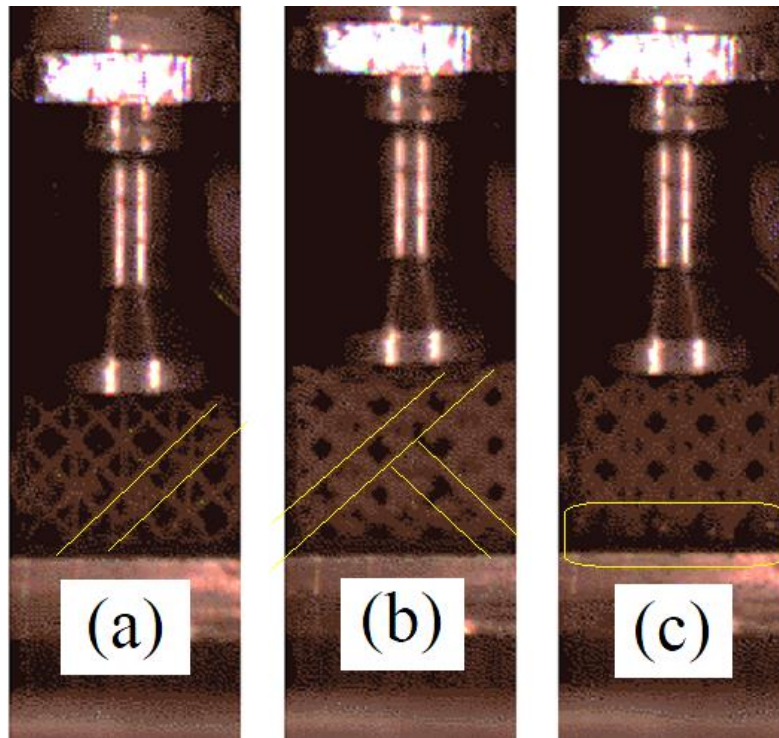
6.1 Rázová zkouška

Cílem práce bylo posoudit schopnost mikro-prutových struktur ze slitiny WE43 pohlcovat energii. Základní buňka FCC se ukázala být ze zkoumaných buněk nejefektivnější vzhledem ke své hmotnosti. Maximální měrná absorbovaná energie u ní dosáhla hodnotou $\psi = 2,899 \text{ kJ kg}^{-1}$. Nejhorší schopnost absorbovat energii projevila buňka BCC. Toto ilustruje vliv geometrie základní buňky na absorpci energie, jelikož nejefektivnější struktura má velmi podobnou hustotu jako nejhorší (viz Tab. 5-2). Ukázalo se, že přidání vertikálních vzpěr zvyšuje efektivitu, jelikož efektivita FCCZ, BCCZ a FBCCZ je znatelně vyšší než u zbylých dvou buněk. Tyto poznatky jsou v souladu s dostupnou literaturou [11, 14].

V porovnání s mikro-prutovými strukturami o podobných velikostech prutu v [14] mají hořčíkové struktury nízkou pohlcenou energii na objem W_V , kdy je tato hodnota u struktur z nerezové oceli 316L s pruty o velikosti 0,6 mm téměř desetinásobná. Také měrná absorbovaná energie ψ byla pro struktury z nerezové oceli 316L v [15] několikrát vyšší než hodnoty naměřené pro struktury z hořčíkové slitiny. Obdobnou měrnou absorbovanou energii ψ jako na nejefektivnější z hořčíkových struktur pozorovali např. autoři v [16] na strukturách vyrobených z pryskyřice PlasGRAYTM se základní krychlovou buňkou složenou z plošných prvků.

Z pozorovaných závislostí napětí je patrné, že i přes to, že dle Maxwellova kritéria by měly být pruty struktur namáhané na ohyb, tak vykazují chování mikro-prutových soustav namáhaných na tlak. Lze pozorovat charakteristické maximum s prudkým poklesem a následnou oscilací napětí způsobené vyšší tuhostí struktur s axiálním zatížením prutů (viz Obr. 5-1, Obr. 5-2, Obr. 5-3). U struktur s vertikálními vzpěrami se toto chování kvůli poznatkům z literatury [1] očekávalo, ale u nevyztužených struktur k němu došlo také, i když oscilace nebyly až tak výrazné. Je pravděpodobné, že k tomuto chování dochází i u nevyztužených struktur kvůli křehkosti hořčíkové slitiny. Pruty místo plastické deformace selhávají křehkým lomem.

Byly pozorovány dva mechanismy deformace struktury. U většiny struktur došlo k částečné deformaci první vrstvy vzorku následované lomem napříč strukturou po 45° smykové rovině (viz Obr. 6-1 a), což odpovídá poznatkům v literatuře [4]. Buňky FCC a FCCZ s pruty $d = 0,5 \text{ mm}$ a $d = 1,0 \text{ mm}$ a buňky BCC a BCCZ s $d = 1,5 \text{ mm}$ selhávaly tímto mechanismem. Také buňka FBCCZ s $d = 1,0 \text{ mm}$ byla takto deformována. Obdoba tohoto mechanismu byla pozorována na FCC i FCCZ s $d = 1,5 \text{ mm}$ a také na FBCCZ s $d = 0,5 \text{ mm}$. Zde byl průběh stejný pouze s tím rozdílem, že počáteční deformace proběhla na poslední vrstvě. Po ní zase následoval lom celé struktury po 45° smykové rovině. U FCC s $d = 1,5 \text{ mm}$ došlo ke dvěma současným lomům, které se protnuly (viz Obr. 6-1 b).



Obr. 6-1 Pozorované mechanismy deformace: (a-b) 45° lom struktury, (c) deformace po vrstvách

Dalším mechanismem bylo postupné selhávání vrstev započaté na poslední vrstvě. Jednotlivé pruty zde selhávaly lomem v rovině kolmé na směr zatěžování, nejčastěji v místech napojení na následující vrstvu (viz Obr. 6-1). Takto byla deformována BCC s $d = 0,5$ mm a buňka BCCZ s $d = 0,5$ mm a $d = 1,0$ mm. Při tomto mechanismu byl v [4] pozorován průběh napětí s charakteristikami podobnými soustavám s pruty namáhanými na ohyb. Zde byly ale pořád přítomny oscilace typické pro axiální namáhání prutu (viz Obr. 5-1, Obr. 5-2). U buňky BCC s $d = 1,0$ mm byl pozorovaný obdobný mechanismus, kdy se ale začala deformovat seshora od první vrstvy. Podobné deformace byly zaznamenány v [3].

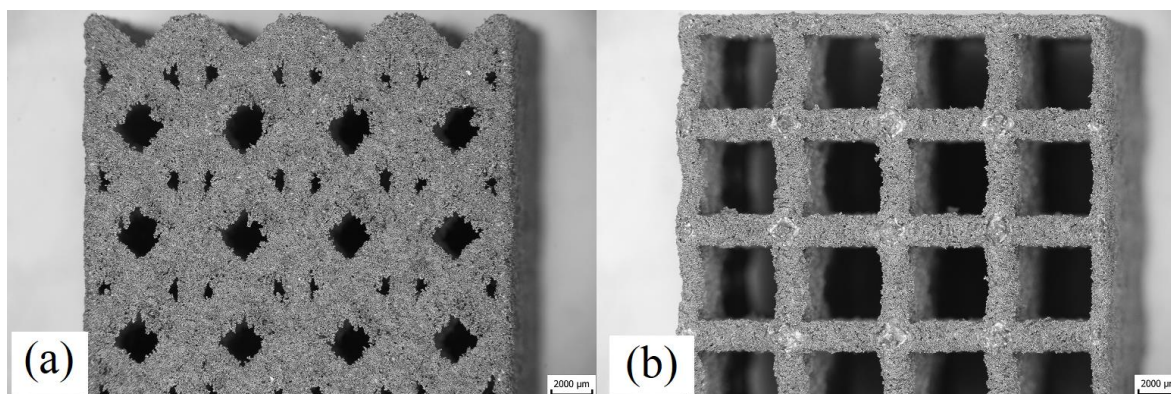
Napětí také u některých vzorků dosahovalo záporných hodnot viz, obzvláště při prudkém poklesu po prvním maximu. K jevu došlo výrazně u struktury FCC při průměrech prutu $d = 0,5$ mm a $d = 1,0$ mm (viz Obr. 5-1, Obr. 5-2). V obou případech došlo po drobné deformaci horní vrstvy struktury, následované lomem napříč strukturou po 45° smykové rovině. Je možné, že při takovém rozlomení struktury klesne reakční síla na indentoru tak prudce, že je na určitou chvíli odlehčený a zaznamenává tak negativní hodnoty.

Pro budoucí experimenty by bylo vhodné vytvořit více exemplářů každé konfigurace, aby se vytvořil statistický vzorek naměřených hodnot, protože takto nelze s určitostí říct, jestli naměřené hodnoty nebyly ovlivněny nějakým defektem daného vzorku. Povrchové úpravy v [3] měly vliv na závislost napětí na deformaci. Jejich dopad na absorpci energie by mohl být předmětem budoucího výzkumu. Vzhledem k důležitosti tématu v oblasti biomedicíny by se experimenty daly pojmout také z hlediska biomechaniky a simulovat rázy vznikající při lidské chůzi pro použití např. v implantátech kyčelní kosti.

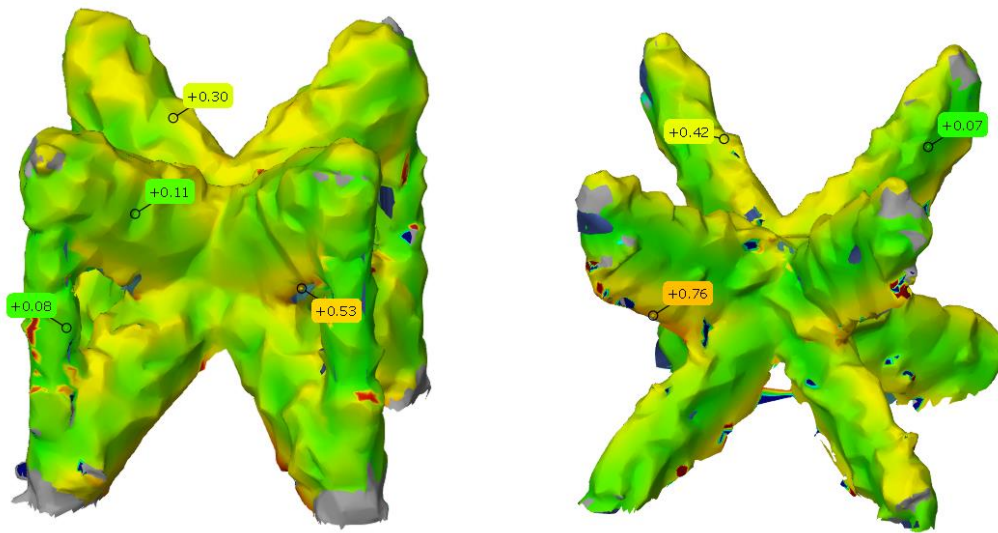
6.2 Rozměrová přesnost struktur

Vzorky byly ve všech rozměrech větší než CAD modely (viz Tab. 5-2). Odchylka výšky struktur je do jisté míry způsobena zbrusováním vzorků na rovinu po odřezání z výrobní platformy. Odchytky podstavy jsou však způsobeny pouze výrobním procesem. Na boky struktur jsou přilnuté granule prášku z okolí laserem natavované části. Při tuhnutí natavené části dochází k jejich připevnění, ale zůstávají neroztavené. Částice pak nejsou součástí plného materiálu prutů, takže se ani nepodílí na nesení zatížení struktury. Pouze zvyšují hmotnost a rozměrovou nepřesnost vzorku.

Obdobně jsou částice přilnuté i na prutech uvnitř struktury. U prutů pod úhlem navíc dochází k nerovnoměrnému natavení na horní a spodní straně skloněného prutu. Na spodní straně bývá víc nataveného materiálu, protože při natavování vrstvy dochází i k natavení granulí z vrstvy předchozí (tzv. staircase effect) [1]. Tento jev lze pozorovat na snímcích z mikroskopu, kdy z boku struktury lze vidět materiál přichycený na spodní straně prutu (viz Obr. 6-2 a), ale když je stejná struktura pozorována z horní části, tak v tomto směru jsou pruty relativně konzistentní s požadovanou geometrií (viz Obr. 6-2 b). Rozdíl mezi pruty kolmými k výrobní platformě a pruty pod úhlem byl jasně čitelný i na odchylkách struktury od CAD modelu pozorovaných na datech ze skeneru (viz Obr. 6-3).

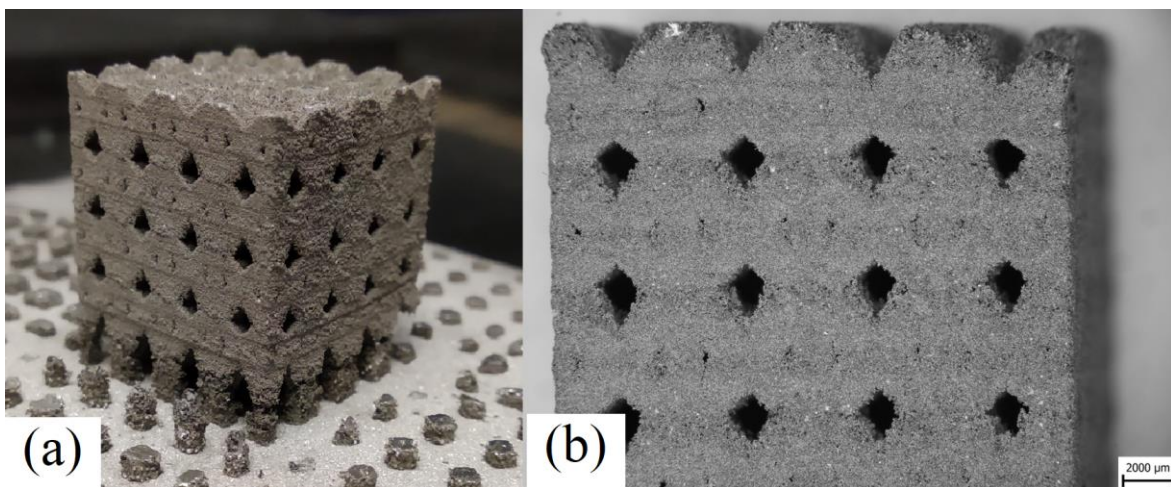


Obr. 6-2 Nerovnoměrně natavený prášek na struktuře: (a) pohled z boku, (b) pohled z horní části



Obr. 6-3 Rozměrové odchylky na skenovaných buňkách

Neočekávaným defektem struktur, byl nedokonalý spoj mezi vzorkem a podporami kterými je při výrobě připevněn k výrobní platformě (viz Obr. 6-4 a). Nedokonalé přilnutí způsobilo vybočení nepřipojených prutů do prostoru směrem ven ze struktury (viz Obr. 6-4 b). Příčinou deformace byla nejspíše teplotní roztažnost materiálu. Při výrobě pravděpodobně nebyly dostatečně dobré podmínky pro plynulé natavení způsobené nedostatečným odvětráváním výparů při delším výrobním cyklu.



Obr. 6-4 Vada struktury: (a) špatné napojení na výrobní platformu, (b) vybočení nenapojených prutů

7 ZÁVĚR

V práci bylo provedeno testování rázového namáhání mikro-prutových struktur vyrobených metodou SLM z hořčíkové slitiny WE43. Byla vytvořena sada vzorků s pěti základními buňkami, každá ve třech variantách tloušťky prutů, aby se dal pozorovat vliv geometrie základní buňky a relativní hustoty na mechanické vlastnosti struktur. Tyto struktury byly následně otestovány na nízkorychlostním nárazovém testeru, kde byla posuzovaná absorpce kinetické energie u jednotlivých vzorků.

Prokázala se jasná závislost absorbované energie na tvaru základní buňky. Nejefektivnější z pozorovaných buněk v poměru k hmotnosti byla FCCZ, což souhlasí s výsledky u stejných struktur vyrobených z jiných materiálů. Primárně docházelo k selhání vzorků lomem celé struktury podél 45° smykové roviny.

Celková křehkost hořčíkové slitiny měla nejspíše za následek to, že v porovnání s jinými materiály používanými pro výrobu mikro-prutových struktur se hořčík ukázal jako ne úplně vhodný pro absorpci energie nárazu. Dostupnější a lépe zpracovatelné materiály jako je např. ocel jsou v tomhle ohledu daleko efektivnější

Z důvodu malé velikosti testované sady vzorků je nutné brát v potaz možnost určitých odchylek naměřených hodnot absorbované energie. Na výsledky mohli mít skrytý vliv např. vnitřní defekty struktury vzniklé při výrobě. Obzvláště pak u struktur s nejmenším průměrem prutů se mohla výrobní kvalita negativně podepsat na vlastnostech, protože pruty byly na hranici nejmenších výrobitelných rozměrů na dostupném vybavení. Kvůli velkému rozptylu tuhostí a pevností struktur porovnávaných při stejném zatížení, bylo vyhodnocení absorbované energie limitované nízkou maximální dosaženou deformací na nejužších strukturách.

Pro příští výzkum by se mohlo vytvořit větší množství jednotlivých vzorků, aby byly výsledky statisticky podložené. Také by se mohla provést kontrola vnitřní porozity vyrobených vzorků, aby se vyloučil její vliv na chování při rázovém zatěžování.

Do budoucna by se mohl výzkum rozšířit o zkoumání vlivu povrchové úpravy nebo tepelného zpracování na tyto vlastnosti. Také by se mohlo využít topologicky optimalizované sítě vnitřní struktury pro dané rázové zatěžování, protože i přes své ne zcela ideální vlastnosti by se mohly mikro-prutové struktury WE43 využívat pro biomedicinské implantáty.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MACONACHIE, Tobias, Martin LEARY, Bill LOZANOVSKI, Xuezhe ZHANG, Ma QIAN, Omar FARUQUE a Milan BRANDT. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design* [online]. 2019, **183**, 108137 [cit. 2022-10-30]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.108137
2. ZHU, Feng, Guoxing LU, Dong RUAN a Zhihua WANG. Plastic Deformation, Failure and Energy Absorption of Sandwich Structures with Metallic Cellular Cores. *International Journal of Protective Structures* [online]. Roč. 1 (2010), č. 4, 507-541 [cit. 2023-05-15]. ISSN 2041-4196. Dostupné z: doi:10.1260/2041-4196.1.4.507
3. LI, Muzi, Felix BENN, Thomas DERRA, et al. Microstructure, mechanical properties, corrosion resistance and cytocompatibility of WE43 Mg alloy scaffolds fabricated by laser powder bed fusion for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C* [online]. 2021, **119**, 111623 [cit. 2023-02-14]. ISSN 09284931. Dostupné z: doi:10.1016/j.msec.2020.111623
4. HYER, Holden, Le ZHOU, Qingyang LIU, et al. High strength WE43 microlattice structures additively manufactured by laser powder bed fusion. *Materialia* [online]. 2021, **16**, 101067 [cit. 2023-02-14]. ISSN 25891529. Dostupné z: doi:10.1016/j.mtla.2021.101067
5. DESHPANDE, V.S., M.F. ASHBY a N.A. FLECK. Foam topology: bending versus stretching dominated architectures. *Acta Materialia* [online]. Roč. 49 (2001), č. 6, 1035-1040 [cit. 2023-02-14]. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/S1359-6454(00)00379-7
6. AHMADI, M., S.A.A. Bozorgnia TABARY, D. RAHMATABADI, M.S. EBRAHIMI, K. ABRINIA a R. HASHEMI. Review of selective laser melting of magnesium alloys: advantages, microstructure and mechanical characterizations, defects, challenges, and applications. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2022, **19**, 1537-1562 [cit. 2023-02-16]. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2022.05.102
7. LI, Y., J. ZHOU, P. PAVANRAM, et al. Additively manufactured biodegradable porous magnesium. *Acta Biomaterialia* [online]. 2018, **67**, 378-392 [cit. 2023-02-15]. ISSN 17427061. Dostupné z: doi:10.1016/j.actbio.2017.12.008
8. LI, Y., H. JAHR, X-Y. ZHANG, et al. Biodegradation-affected fatigue behavior of additively manufactured porous magnesium. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, **28**, 299-311 [cit. 2023-02-15]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.05.013

9. LIU, Jinge, Bingchuan LIU, Shuyuan MIN, et al. Biodegradable magnesium alloy WE43 porous scaffolds fabricated by laser powder bed fusion for orthopedic applications: Process optimization, in vitro and in vivo investigation. *Bioactive Materials* [online]. 2022, **16**, 301-319 [cit. 2023-05-21]. ISSN 2452199X. Dostupné z: doi:10.1016/j.bioactmat.2022.02.020
10. YU, Tianyu, Holden HYER, Yongho SOHN, Yuanli BAI a Dazhong WU. Structure-property relationship in high strength and lightweight AlSi10Mg microlattices fabricated by selective laser melting. *Materials & Design* [online]. 2019, **182**, 108062 [cit. 2023-02-16]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.108062
11. REHME, Olaf. *Cellular Design for Laser Freeform Fabrication*. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2010. ISBN 978-3-86955-273-6.
12. VRÁNA, Radek, Jan JAROŠ, Daniel KOUTNÝ, Jakub NOSEK, Tomáš ZIKMUND, Jozef KAISER a David PALOUŠEK. Contour laser strategy and its benefits for lattice structure manufacturing by selective laser melting technology. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2022, **74**, 640-657 [cit. 2023-05-23]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2021.12.006
13. WE43 Technical Datasheet. In: *Smiths Metal Centres* [online]. Biggleswade: Smiths Metal Centres, 2022 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.smithmetal.com/pdf/magnesium/we43.pdf>
14. ČERVINEK, Ondřej, Heinz PETTERMANN, Melanie TODT, Daniel KOUTNÝ a Ondřej VAVERKA. Non-linear dynamic finite element analysis of micro-strut lattice structures made by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2022, **18**, 3684-3699 [cit. 2023-02-22]. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2022.04.051
15. 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 [cit. 2023-05-24]. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2017.02.007
16. ANDREW, J Jefferson, Johannes SCHNEIDER, Jabir UBAID, R VELMURUGAN, N K GUPTA a S KUMAR. Energy absorption characteristics of additively manufactured plate-lattices under low- velocity impact loading. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2021, **149**, 103768 [cit. 2023-05-25]. ISSN 0734743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2020.103768

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Seznam zkratek

LPBF	Laser Powder Bed Fusion
SLM	Selective Laser Melting
BCC	Body-centered cubic
FCC	Face-centered cubic
CAD	Computer Aided Design

9.2 Seznam symbolů a veličin

M	Maxwellovo kritérium
s	počet prutů
n	počet styčnicků
ρ	hustota vzorku
ρ_{WE43}	hustota slitiny WE43
ρ_{RE}	relativní hustota struktury
W_V	energie absorbovaná na jednotku objemu
ε_{MAX}	nejvyšší poměrná deformace dosažená na nejtužším vzorku
σ	napětí na vzorku
ε	poměrná deformace vzorku
ψ	měrná absorpce energie
d_{Vzorek}	průměr válce reprezentujícího průměrnou odchylku prutu
$d_{Vepsany}$	průměr válce vepsaného pásma odchylek prutu

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	Dva základní průběhy napětí mikro-prutových struktur [1]	15
Obr. 2-2	Pozorované deformace: (a) lom pod úhlem 45 °, (b) deformace po vrstvách, (c) deformace po vrstvách po počátečním lomu [4].....	19
Obr. 4-1	Sada vzorků s buňkou FCC	23
Obr. 4-2	Vzorky před oddělením z výrobní platformy	24
Obr. 4-3	Tester použitý pro rázovou zkoušku [14]	25
Obr. 4-4	Vzorky buněk připravené pro skenování	27
Obr. 4-5	Skenování základních buněk.....	27
Obr. 5-1	Závislost napětí na poměrné deformaci vzorků s $d = 0,5$ mm	28
Obr. 5-2	Závislost napětí na poměrné deformaci vzorků s $d = 1,0$ mm	29
Obr. 5-3	Závislost napětí na poměrné deformaci vzorků s $d = 1,5$ mm	30
Obr. 5-4	Měrná absorbovaná energie jednotlivých vzorků	32
Obr. 6-1	Pozorované mechanismy deformace: (a-b) 45° lom struktury, (c) deformace po vrstvách	36
Obr. 6-2	Nerovnoměrně natavený prášek na struktuře: a) pohled z boku, b) pohled z horní části	37
Obr. 6-3	Rozměrové odchylky na skenovaných buňkách	38
Obr. 6-4	Vada struktury: (a) špatné napojení na výrobní platformu, (b) vybočení nenapojených prutů	38

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1	Přehled použitých buněk a hodnota jejich M	22
Tab. 5-1	Charakteristické veličiny absorpce energie	31
Tab. 5-2	Rozměry, hmotnost a hustota vzorků	33
Tab. 5-3	Rozměrové odchylky prutů se sklonem $35,26^\circ$	34