



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

MIKRO-PRUTOVÉ STRUKTURY S PROMĚNNÝM PRŮMĚREM PRUTU

MICRO-LATTICE STRUCTURES WITH VARIABLE STRUT DIAMETER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Karel Brulík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Červinek, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Karel Brulík**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Červínek, Ph.D.**
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:

Mikro–prutové struktury s proměnným průměrem prutu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mikro–prutové struktury vyráběné aditivními technologiemi mohou dosahovat vysokých hodnot mechanických vlastností při zachování nízkého objemového podílu materiálu. Tato vlastnost může být výhodná v aplikacích uvažujících absorpci mechanické energie. Konvenční struktury s konstantním průměrem prutu je možné navrhovat pro předem známé množství absorbované energie. V reálných aplikacích však lze množství energie předvídat jen přibližně. Pro takové případy mohou sloužit struktury s proměnným průměrem prutu, které je možné přizpůsobit pro širší škálu působících energií.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je porovnat absorpci energie alespoň dvou konfigurací mikro–prutových struktur s konstantním a proměnným průměrem prutu vyrobených z nerezové oceli technologií selective laser melting.

Díličí cíle bakalářské práce:

- rešeršní studie mikro–prutových struktur s proměnným průměrem prutu,
- návrh zkušebních těles s ohledem na možnosti testovacích metod,
- výroba testovacích těles a provedení tlakové zkoušky struktur,
- porovnání a vyhodnocení jednotlivých variant mikro–prutové struktury z hlediska absorpce energie.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, digitální data.

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

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

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

Seznam doporučené literatury:

SEHARING, Asliah, Abdul Hadi AZMAN a Shahrum ABDULLAH. A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts. *Advances in Mechanical Engineering* [online]. 2020, 12(6). ISSN 1687-8140.

SHI, Xin, Wenhe LIAO, Tingting LIU, Changdong ZHANG, Dawei LI, Weiming JIANG, Cong WANG a Fangxi REN. Design optimization of multimorphology surface-based lattice structures with density gradients. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2021, 117(7-8), 2013-2028. ISSN 0268-3768.

PLOCHER, János a Ajit PANESAR. Mechanical Performance of Additively Manufactured Fiber-Reinforced Functionally Graded Lattices. *JOM* [online]. 2020, 72(3), 1292-1298. ISSN 1047-4838.

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

Díky svým specifickým vlastnostem mají mikro-prutové struktury velký potenciál pro využití v aplikacích uvažujících absorpci energie. Ukazuje se, že běžné mikro-prutové struktury s konstantním objemovým podílem je možné navrhovat pro předem známé množství absorbované energie. V reálných aplikacích však často předem známé není. Proto se jako perspektivnější jeví využití struktur s proměnným objemovým podílem, které lze navrhovat pro širší škálu působících energií. Cílem této práce bylo porovnání mikro-prutových struktur s proměnným průměrem prutu, vyrobených z nerezové oceli 316L technologií selective laser melting, z hlediska schopnosti absorpce energie. Za tímto účelem byly vyrobeny dva typy struktur – F2BCC a F2BCC_45, oba v konfiguracích s konstantním, plynule proměnným a skokově proměnným průměrem prutu. Struktury byly následně dynamicky zatěžovány pomocí pádového testu, jehož výsledky byly popsány průběhem deformace a sil v čase. Větší množství absorbované energie bylo naměřené u struktur typu F2BCC_45, a to až o 73 % v závislosti na konfiguraci struktury. Výsledky odhalily, že proměnný průměr prutu nemá velký vliv na množství absorbované energie, ale výrazně snižuje vzniklé rázy, dle typu a konfigurace struktury až o 54 %. Tato práce přináší komplexní pohled na deformační a napěťové charakteristiky obou typů struktur, a především porovnání vlivu proměnného průměru prutu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mikro-prutové struktury, absorpce energie, pádový test, Selective Laser Melting, 316L, proměnný průměr prutu

ABSTRACT

Due to their specific properties, micro-lattice structures have a great potential for use in energy absorption applications. It turns out that conventional micro-lattice structures with constant volume fraction can be designed for a known amount of absorbed energy. In real applications, however, we often do not know it in advance. Therefore, the use of functionally graded micro-lattice structures, which can be designed for a wider range of applied energies, appears to be more promising. The aim of this work is to compare micro-lattice structures with variable strut diameter made from 316L stainless steel by Selective Laser Melting technology in terms of energy absorption capability. For this purpose, two types of structures, F2BCC and F2BCC_45, were fabricated, both in configuration with constant, continuously variable and stepwise variable strut diameter. The structures were subsequently dynamically loaded using a drop-weight test, the results of which were described by the time history of deformation and forces. The greater amount of absorbed energy was measured for structures of type F2BCC_45, up to 73 % depending on the configuration of the structures. The results revealed that the variable strut diameter does not have a large effect on the amount of absorbed energy, but it significantly reduces the shock generated, up to 54 % depending on the type and configuration of the structure. This thesis provides a comprehensive view of the deformation and stress characteristics of both types of structures, and in particular a comparison of the effect of variable strut diameter.

KEYWORDS

Micro-lattice structures, energy absorption, drop-weight test, Selective Laser Melting, 316L, variable strut diameter

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BRULÍK, Karel. *Mikro-prutové struktury s proměnným průměrem prutu*. Brno, 2023, 67 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Červínek, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Ondřeji Červinkovi, Ph.D. za cenné rady a podněty, a také za čas věnovaný konzultacím. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za jejich podporu a trpělivost po celou dobu studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Mikro-prutové struktury	14
2.1.1	Základní parametry mikro-prutových struktur	15
2.1.2	Mikro-prutové struktury se změnou objemového podílu	17
2.2	Absorpce energie	20
2.2.1	Určení množství absorbované energie	21
2.2.2	Analytické modely absorpce energie	22
2.2.3	Faktory ovlivňující schopnost absorpce energie	23
2.3	Výroba mikro-prutových struktur technologií SLM	24
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	26
3.1	Analýza problému	26
3.2	Cíl práce	27
4	MATERIÁL A METODY	28
4.1	Selective Laser Melting	28
4.2	Použitý materiál	29
4.3	Návrh mikro-prutových struktur	29
4.4	Výroba testovacích těles	33
4.5	Tlaková zkouška	34
5	VÝSLEDKY	35
5.1	Analýza vyrobených struktur	35
5.2	Vyhodnocení tlakové zkoušky	38
5.3	Vyhodnocení absorpce energie	43
6	DISKUZE	47
7	ZÁVĚR	51
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	58

10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	61
11	SEZNAM TABULEK	63
12	SEZNAM PŘÍLOH	64

1 ÚVOD

V současnosti se svět nachází v době rychlého technologického pokroku. Ten s sebou přináší nové trendy a neustále se zvyšující požadavky na vývoj nových technologií. V oblasti osobní dopravy je kladen stále vyšší důraz na bezpečnost pasažérů. Pro uživatele nejviditelnější je neustálý vývoj prvků aktivní ochrany, především v podobě elektronických asistentů. Neméně důležitý vývoj však probíhá také v oblasti pasivní bezpečnosti. Jedním z hlavních prvků pasivní ochrany jsou absorbéry energie, jejichž úkolem je tlumení rázů a disipace energie při nárazu vozidla. V současné době jsou za tímto účelem využívány absorbéry tvořené tenkostěnnými vlnitými trubkami či kombinací jeklových profilů a kovových pěn, které jsou součástí deformačních zón dopravních prostředků. Ty lze relativně přesně navrhovat pro určité množství energie, jenž je třeba při nárazu absorbovat. Jejich nevýhodou je ovšem velice omezená možnost řízení a optimalizace deformačního procesu pro maximalizování množství absorbované energie. Absorbéry je nutné navrhovat tak, aby absorbovaly potřebné množství energie. Zároveň však při nárazu musí být dodrženo maximální přípustné přetížení tak, aby nebyla ohrožena bezpečnost posádky. Je proto snaha o vývoj systémů, které bude možné navrhovat pro větší spektrum působících energií. Ukázalo se, že za tímto účelem je třeba využití komplexních geometrií, jež byly v minulosti konvenčními metodami téměř nevyrobitelné. Průlom v této oblasti představoval příchod aditivních technologií výroby, díky nimž je možné vyrábět součásti se složitou geometrií. S jejich příchodem začal i rozvoj nových metamateriálů – mikro-prutových struktur.

Mikro-prutové struktury vynikají nízkou hmotností při zachování výborných mechanických vlastností, a také vysokou schopností absorpce energie. To z nich činí materiály perspektivní pro využití jako absorbéry energie. Jejich nespornou výhodou je možnost jejich integrace také jako nosných prvků, čímž se může značně zjednodušit celková konstrukce deformačních zón. Konvenční mikro-prutové struktury s konstantním objemovým podílem lze ovšem navrhovat také pouze pro jednu deformační charakteristiku, v závislosti na jejich vnitřní geometrii a objemovém podílu. Jedním z možných řešení se ukazují být mikro-prutové struktury s proměnným objemovým podílem.

Změnou objemového podílu určitých částí struktur lze dosáhnout většího spektra deformačních charakteristik a struktury tak přizpůsobovat širšímu pásmu působících energií. Deformace mikro-prutových struktur s proměnným objemovým podílem je postupná, počínaje oblastmi s nižším objemovým podílem, čímž dochází k eliminaci vysokých počátečních rázů, a tedy i přetížení působícího na posádku. Tyto struktury tak kombinují vlastnosti, jež je činí vhodnými pro konstrukci velice efektivních absorberů energie zaručujících vysokou bezpečnost. Hlavním cílem je porovnání deformačních charakteristik různých geometrických uspořádání struktur a mechanismů změny objemového podílu.

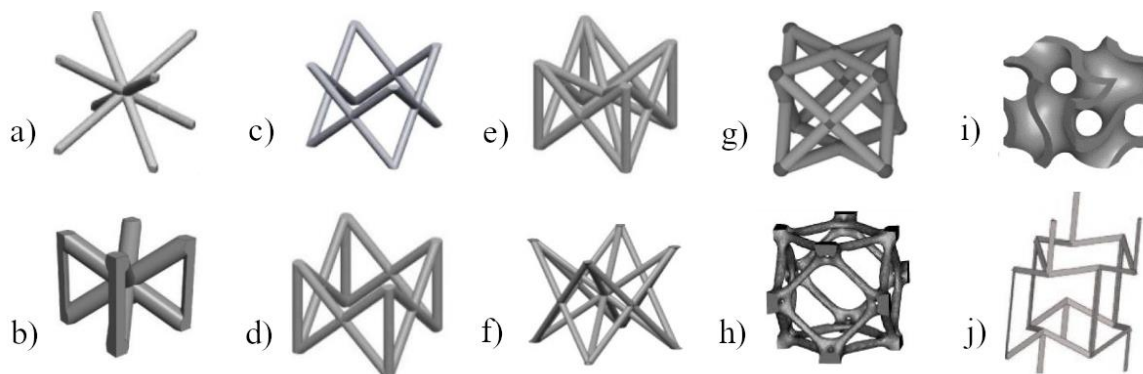
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Existuje velké množství typů mikro-prutových struktur, přičemž každý dosahuje jiných parametrů a je vhodný pro jiné využití. V této kapitole je pozornost věnována především strukturám vhodným pro využití v aplikacích uvažujících absorpci energie a parametrům, které absorpci energie ovlivňují.

2.1 Mikro-prutové struktury

Mikro-prutové struktury představují novou třídu pokročilých lehkých metamateriálů, jejichž koncept je podobný konceptu kovových pěn [1]. Jejich základní stavební jednotkou jsou pruty vzájemně propojené ve styčnicích. Tyto pruty tvoří elementární buňky, jejichž periodickým opakováním vznikne mikro-prutová struktura.

Vnitřní geometrii elementární buňky lze uzpůsobovat pro dosažení požadovaných mechanických vlastností, deformačního chování a disipace energie. K návrhu struktur je často využíváno poznatků materiálového inženýrství, kdy uspořádání prutů vychází z krystalických mřížek přenesených na mnohem větší měřítko, a to tak, že v místech, kde se v krystalické mřížce nachází atomy, jsou styčníky jednotlivých prutů. Tuto geometrii lze dále upravovat, například přidáním výztužných prutů či kombinací více typů krystalických mřížek (viz Obr. 2-1 a) – h)) [2]. Právě například zmíněné přidání prutů ve vertikálním směru může, při zatěžování v tomto směru, výrazně zvýšit pevnost struktury [3]. Využívají se také matematické metody, například metoda trojitě periodických minimálních povrchů (TPMS) [4]. Struktury vytvořené touto metodou nemusí být nutně prutové, ale mohou připomínat strukturu kovových pěn (viz Obr. 2-1 i)). Speciální skupinou metamateriálů jsou struktury auxetické (viz Obr. 2-1 j)), které díky specifickému uspořádání prutů dosahují záporného Poissonova čísla, které se projevuje smršťováním ve směrech kolmých na směr tlakového namáhání struktur, a naopak rozšiřováním při namáhání tahovým [5].



Obr. 2-1 Přehled základních typů mikro-prutových struktur, a) BCC, b) BCCZ, c) FCC, d) FCCZ, e) FBCCZ, f) F2BCC, g) AFCC, h) EC, i) Gyroid, j) Auxetická struktura [2]

Díky své vnitřní geometrii dosahují mikro-prutové struktury velmi vysokých poměrů pevnosti ku hmotnosti. Kromě toho vykazují také vysokou míru schopnosti absorpce energie a tlumení vibrací. Tyto vlastnosti z nich dělají velice perspektivní materiály pro využití v mnoha průmyslových aplikacích, zejména v automobilovém, leteckém, vesmírném průmyslu, kde je kladen vysoký důraz na úsporu hmotnosti. Dále také v medicínských a biomedicínských aplikacích, například jako kardiovaskulární implantáty s tvarovou pamětí [6]. Díky rozsáhlé povrchové ploše mohou být využívány také ve výměnících tepla [7].

Odolnost vůči působícím silám je funkcí jejich geometrického uspořádání a základového materiálu, a je měřitelná jako množství deformační energie akumulované v průběhu zatěžování [8].

Vývoj mikro-prutových struktur v minulosti komplikovala absence výrobní metody, umožňující jejich rychlou a efektivní výrobu. Kvůli své komplexní vnitřní geometrii jsou mikro-prutové struktury konvenčními obráběcími metodami téměř nevyrobitelné. Jejich rozvoj proto nastal s příchodem aditivních technologií výroby, díky kterým je jejich výroba snadno proveditelná.

Pro snazší popis mikro-prutových struktur byly zavedeny parametry, udávající základní informace o jejich objemovém podílu a geometrickém uspořádání elementárních buněk.

2.1.1 Základní parametry mikro-prutových struktur

Základní charakteristikou mikro-prutových struktur je tzv. **Maxwellovo kritérium stability**, pro rovinné aplikace:

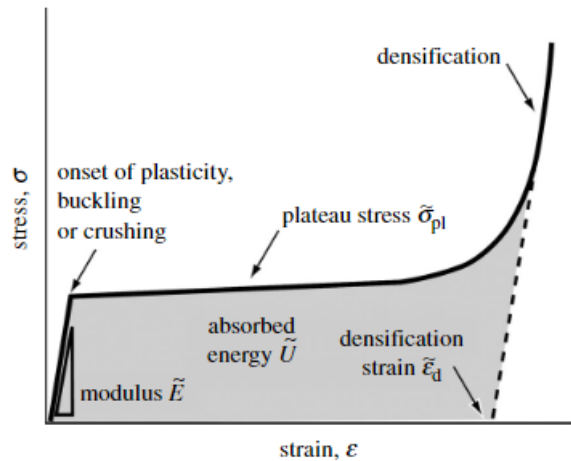
$$M = b - 2j + 3 \quad (1)$$

pro prostorové aplikace:

$$M = b - 3j + 6 \quad (2)$$

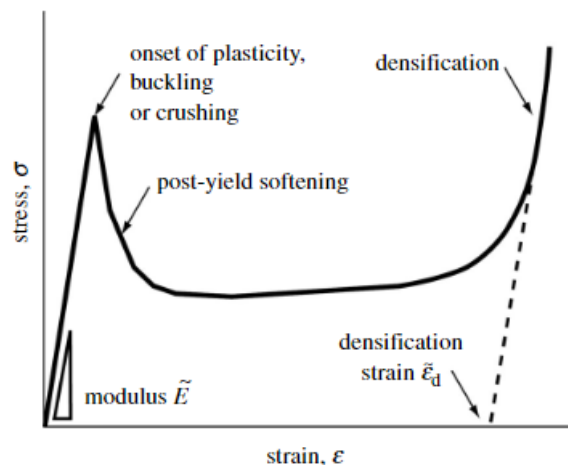
které vyjadřuje poměr prutů a uzlů struktury, kde b je počet prutů a j počet uzlů. Dle jeho hodnoty se struktury dělí do 2 kategorií [1].

Pokud $M < 0$, jedná se o strukturu, jejíž pruty jsou dominantně zatěžovány ohybem, tzv. **bending-dominated**. Tyto struktury jsou složeny z menšího množství prutů, které tak nedokážou zamezit vzniku ohybových momentů a jsou tedy namáhány primárně ohybem. Tyto struktury ve většině případů vykazují lineárně pružné chování až do dosažení mezního stavu prutů, a poté dochází k deformaci při téměř konstantním napětí (*plateau stress oblast*), dokud nedojde ke kontaktu prutů a prudkému nárůstu napětí při dalším zhušťování materiálu (*oblast densifikace*).



Obr. 2-2 Deformačně-napěťová charakteristika struktur typu bending-dominated [1]

Pokud $M \geq 0$, jedná se o strukturu, jejíž pruty jsou dominantně zatěžovány tahem, tzv. *stretching-dominated*. Tyto struktury jsou oproti strukturám typu bending-dominated složeny z většího množství prutů, které tak dokážou zamezit vzniku ohybových momentů. Pruty jsou proto namáhány primárně tahem či tlakem. Na rozdíl od bending-dominated struktur u nich po dosažení meze pružnosti dochází k prudkému poklesu napětí (*post-yield softening*) a následně je jejich chování obdobné.



Obr. 2-3 Deformačně-napěťová charakteristika struktur typu stretching-dominated [1]

Obecně vykazují struktury typu stretching-dominated při stejné relativní hustotě vyšší tuhost a pevnost než bending-dominated struktury.

Dalším charakteristickým znakem je **relativní hustota**, udávající poměr hustoty, respektive hmotnosti, objemu, mikro-prutové struktury ku hustotě plného materiálu o stejném objemu jako zabírá struktura.

$$\rho_{rel} = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{m^*}{m_s} = \frac{V^*}{V_s} \quad (-) \quad (3)$$

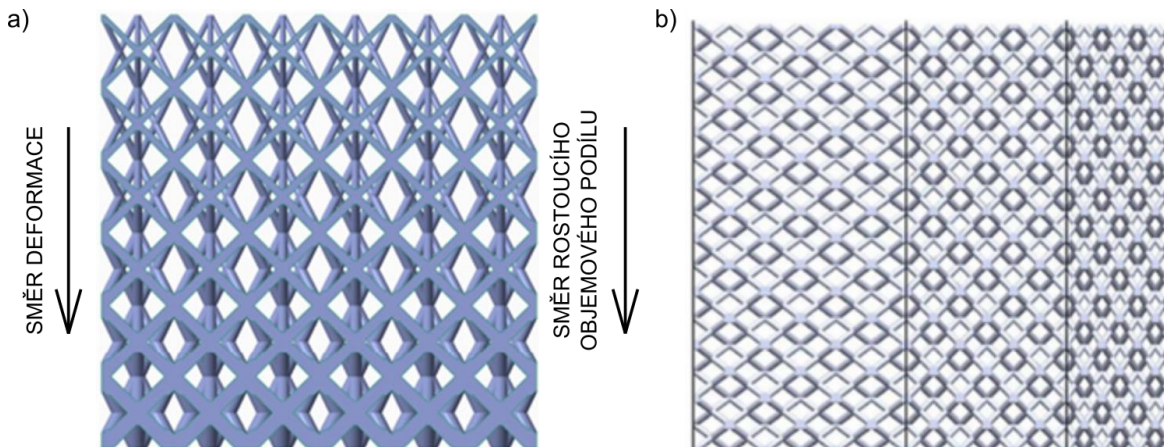
kde ρ^* , m^* , V^* je hustota, respektive hmotnost, objem prutů mikro-prutové struktury a ρ_s , m_s , V_s je hustota, respektive hmotnost plného materiálu o objemu, který zabírá struktura a objem, který struktura zabírá. [9]

Relativní hustota je tedy dána především rozměry elementárních buněk a průměry prutů. Zde platí, že s menšími rozměry elementární buňky, respektive s většími průměry prutů, relativní hustota struktur roste.

2.1.2 Mikro-prutové struktury se změnou objemového podílu

Pro dosažení lepších mechanických vlastností a větší míry přizpůsobitelnosti se využívají mikro-prutové struktury, jejichž relativní hustota se v jejich objemu mění (v anglické literatuře označované jako *Functionally Graded Micro-Lattice Structures*). [10]

Této změny se dosahuje využitím **proměnného průměru prutu** (viz Obr. 2-4 a)), kdy se průměr prutu mění v objemu struktury, a tím dochází ke změně relativní hustoty v jednotlivých částech struktury. Změna průměru může být realizována mnoha způsoby, ať už plynule či skokově, a probíhá většinou v uvažovaném směru deformace z hodnoty minimální na hodnotu maximální, ale můžeme se setkat i s aplikacemi, kdy největší průměr mají pruty umístěné ve střední části, či naopak. Skoková změna pak může být realizována po jednotlivých vrstvách elementárních buněk či po více vrstvách, ať už rovnoměrně nebo nerovnoměrně [11].



Obr. 2-4 a) Struktura s plynulou změnou průměru prutů [10]; b) Struktura se skokovou změnou výšky elementární buňky [11]

Další možností je **změna délky prutu** [12], kdy se mění délky prutů při zachování konstantního průměru. Tato změna je nejjednodušším mechanismem pro úpravu mechanických vlastností struktur. Změnou délky prutů ve vertikálním směru způsobuje proměnlivou tuhost struktury.

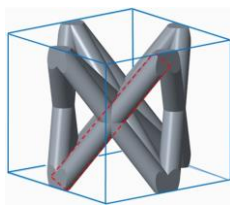
Využívá se také **změny rozměrů elementární buňky** (viz Obr. 2-4 b)). Zde se mění jen její výška, aby na sebe jednotlivé buňky plynule navazovaly. Se zmenšujícími se rozměry elementární buňky roste relativní hustota. [2]

V neposlední řadě lze **kombinovat různé typy elementárních buněk**. V takovém případě výsledná struktura kombinuje rozdílné mechanické vlastnosti v závislosti na použitých typech elementárních buněk [2].

Dle dosavadních výzkumů vede použití struktur s proměnným objemovým podílem ke zlepšení jejich mechanických vlastností, především pevnosti, oproti konvenčním strukturám [10]. Mechanické vlastnosti lze tímto způsobem přesněji přizpůsobovat pro požadované aplikace a soustředit specifické vlastnosti do konkrétních míst součásti pro dosažení efektivnějšího využití materiálu a úspory hmotnosti. V aplikacích uvažujících absorpci energie by se toho mohlo využít také k přesnějšímu řízení deformací a rozložení působících energií dle požadavků.

Al-Saedi a kol. [10] zkoumali rozdíl v množství absorbované energie a deformačních charakteristikách mezi mikro-prutovou strukturou s konstantním průměrem prutu a s plynule proměnným průměrem prutu, při dodržení stejných relativních hustot. Pro experiment byly použity struktury typu F2BCC, které byly nezvykle orientovány, kdy jejich elementární buňky byly pootočené o 45° okolo své vertikální osy (viz Obr. 2-5). Struktury byly vyrobeny z materiálu Al-12Si. Jejich výsledky lze shrnout takto:

- Nárůst množství absorbované energie u struktur s proměnným objemovým podílem o 23 %, oproti strukturám s konstantním objemovým podílem.
- Výskyt deformací způsobených smykovým napětím u struktur s konstantním objemovým podílem, což vedlo k výraznému poklesu jejich tuhosti.
- V případě struktur s proměnným objemovým podílem se vrstvy deformovaly postupně od vrstev s nejmenším objemovým podílem, což vedlo k výraznému snížení prvotního rázu oproti strukturám s konstantním objemovým podílem.



Obr. 2-5 Elementární buňka typu F2BCC pootočená o 45° [10]

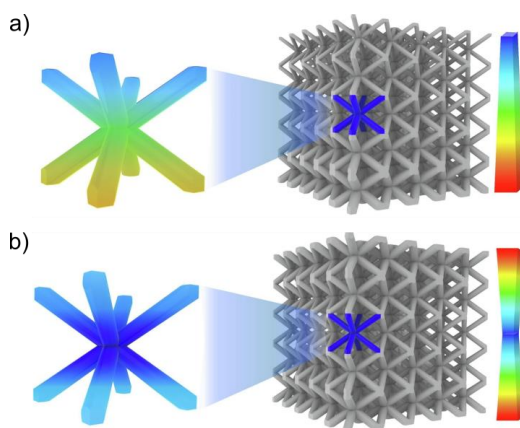
Stejnou konfiguraci testovali také Maskery a kol. [13] , kteří pro experiment zvolili elementární buňky typu BCC a materiál Al-Si10-Mg. Výsledky jejich testování jsou následující:

- Nárůst množství absorbované energie u struktur s proměnným objemovým podílem o 10 %, oproti strukturám s konstantním objemovým podílem.

- Výskyt deformací způsobených smykovým napětím u struktur s konstantním i proměnným objemovým podílem.
- V případě struktur s proměnným objemovým podílem se vrstvy deformovaly postupně od vrstev s nejmenším objemovým podílem, což vedlo k výraznému snížení prvotního rázu oproti strukturám s konstantním objemovým podílem.

Rodrigo a kol. [14] porovnávali struktury s konstantním průměrem prutu, s plynulou změnou průměru prutu v jednom směru a s plynulou změnou průměru prutu ve dvou směrech (viz Obr. 2-6). Opět zde byla využita elementární buňka typu BCC a stejná relativní hustota pro všechny konfigurace. Využit byl materiál 316L. Struktury podrobili zkoušce při kvazistatickém a dynamickém zatěžování. Z jejich výsledků plyne následující:

- V případě kvazistatického zatěžování byl nárůst množství absorbované energie u struktur s proměnným objemovým podílem ve dvou směrech o 5 %, oproti strukturám struktur s proměnným objemovým podílem v jednom směru, a nárůst o 15 % oproti strukturám s konstantním průměrem prutu.
- V případě dynamického zatěžování byl nárůst množství absorbované energie u struktur s proměnným objemovým podílem ve dvou směrech o 10 % oproti strukturám struktur s proměnným objemovým podílem v jednom směru, a nárůst o 12 % oproti strukturám s konstantním průměrem prutu.
- Při dynamickém zatěžování se vyskytovaly deformace způsobené smykovým napětím u struktur s konstantním objemovým podílem.
- V případě struktur s proměnným objemovým podílem se vrstvy deformovaly postupně od vrstev s nejmenším objemovým podílem, což vedlo k výraznému snížení prvotního rázu oproti strukturám s konstantním objemovým podílem.



Obr. 2-6 Proměnný průměr prutu; a) v jednom směru; b) ve dvou směrech [14]

Podobné charakteristiky vykazují také struktury vytvořené metodou topologické optimalizace. Tyto struktury zkoumali Yu a kol. [15], kteří porovnávali deformační chování a schopnosti absorpce energie struktur typu Schwarz P a gyroid. Zde jsou výsledky následující:

- V případě struktur Schwarz P byl nárůst množství absorbované energie u struktur s proměnným objemovým podílem o 33,5 % oproti strukturám s konstantním průměrem prutu.
- V případě struktur gyroid byl nárůst množství absorbované energie u struktur s proměnným objemovým podílem o 1 % oproti strukturám s konstantním průměrem prutu.
- U struktur Schwarz P i gyroid s konstantním objemovým podílem se vyskytovaly deformace způsobené smykovým napětím, což způsobilo pokles tuhosti.
- V případě struktur Schwarz P s proměnným objemovým podílem se vrstvy deformovaly postupně od vrstev s nejmenším objemovým podílem, což vedlo k výraznému snížení prvotního rázu oproti strukturám s konstantním objemovým podílem.
- V případě struktur gyroid byl nárůst napětí struktur s konstantním i proměnným objemovým podílem téměř lineární, což vedlo k eliminaci rázů.

Proměnný objemový podíl formou proměnné výšky jednotlivých vrstev struktur zvolili Xiao a Song [11] (viz Obr. 2-4 b)). Pro experiment byly použity struktury typu rhombic dodecahedron a materiál Al-6Ti-4V. Jejich výsledky jsou takové:

- Struktury s proměnným objemovým podílem vykazovaly nárůst absorbované energie o 28 % oproti strukturám s konstantním objemovým podílem.
- Struktury se skokově i plynule proměnným objemovým podílem vykazovaly přibližně stejné množství absorbované energie.
- Průběh napětí struktury se skokově i plynule proměnným objemovým podílem byl téměř totožný – lineární nárůst, dosažení špičkového napětí o relativně nízké hodnotě, pokles a plateau stress oblast s mírně rostoucím průběhem napětí až do dosažení oblasti densifikace.

Hlavními benefity proměnného objemového podílu struktur se tedy ukazuje být zvýšená schopnost absorpce energie a snížení prvotních rázů vlivem vrstev s nižším objemovým podílem.

2.2 Absorpce energie

Mikro-prutové struktury jsou díky velice nízké hmotnosti ideálními kandidáty pro využití v aplikacích uvažujících absorpci energie [16]. Vhodným zvolením jejich vnitřního geometrického uspořádání lze efektivně přizpůsobovat jejich deformační charakteristiky. Tímto způsobem lze maximalizovat množství absorbované energie a zároveň pohlit rázy vzniklé nárazem, a tedy co nejvíce eliminovat přetížení působící na posádku.

V následujících podkapitolách budou specifikovány parametry ovlivňující deformační charakteristiky a schopnost absorpce energie mikro-prutových struktur.

2.2.1 Určení množství absorbované energie

Množství absorbované energie lze určit jako obsah plochy pod křivkou grafu závislosti napětí na poměrné deformaci struktury. Tato veličina se označuje jako **měrná absorbovaná energie** a je vztažena na jednotku objemu. Její hodnota se stanovuje do konkrétní hodnoty poměrné deformace ε_0 . [17]

$$W = \int_0^{\varepsilon_0} \sigma d\varepsilon \quad (\text{J m}^{-3}) \quad (4)$$

Kde σ je nominální napětí a ε poměrná deformace.

Hodnotu měrné absorbované energie lze vztáhnout na jednotku hmotnosti. Tato veličina se označuje jako **specific energy absorption**.

$$SEA = \frac{W}{\rho_{rel} \cdot \rho_s} \quad (\text{J kg}^{-1}) \quad (5)$$

Kde W je měrná absorbovaná energie, ρ_{rel} je relativní hustota struktury a ρ_s je hustota materiálu. [17]

Důležitým parametrem je **efektivita absorpce energie**, podle níž se určují optimální podmínky pro absorpci energie. Tento parametr určuje, při jakém napětí vykazují struktury maximální schopnost absorpce energie. Po jeho překročení je přírůstek absorbované energie nižší než ekvivalentní nárůst napětí. [18]

$$\eta(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma(\varepsilon)} \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (-) \quad (6)$$

Jako limitní deformace, pro určování užitečné absorbované energie bývá uvažován počátek oblasti densifikace ε_d . K určení tohoto bodu z grafu závislosti napětí-deformace se využívá čtyř metod, které popsali Li a kol. [18]. Z těchto metod se zde omezíme pouze na poslední z nich. Dle její definice je počátek oblasti densifikace shodný s hodnotou deformace při maximální efektivitě absorpce energie, a platí

$$\left. \frac{d\eta(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_d} = 0 \quad (7)$$

2.2.2 Analytické modely absorpce energie

Pro návrh mikro-prutových struktur je důležité alespoň přibližně odhadnout množství absorbované energie předem. Gibson a Ashby [1] pro tento účel odvodili analytické vztahy, sloužící k určení deformačního chování a mechanických vlastností buněčných materiálů. Jelikož byly vztahy odvozeny primárně pro pěnové materiály s nepravidelným uspořádáním, není zde v případě mikro-prutových struktur zohledněn vliv vnitřního uspořádání prutů, který množství absorbované energie značně ovlivňuje.

Pro určení Youngova modulu pružnosti struktury, pevnosti struktury a počátku oblasti densifikace v závislosti na relativní hustotě lze použít následující vzorce:

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 \quad (8)$$

$$\frac{\sigma_{pl}}{R_{p0,2}} = C_5 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

$$\varepsilon_d = 1 - \alpha \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \quad (10)$$

kde ρ^* je hustota struktury, ρ_s hustota materiálu, E^* Youngův modul pružnosti struktury, E_s Youngův modul pružnosti materiálu, σ_{pl} napětí v plateau stress oblasti, $R_{p0,2}$ mez kluzu materiálu, C_1 je koeficient nabývající hodnot 0,1 – 4,0, C_5 koeficient nabývající hodnot 0,25 – 0,35 a α koeficient nabývající hodnot 1,4 – 2,0.

Youngův modul pružnosti struktury získáme jako poměr hodnot napětí a poměrné deformace na konci lineárně-elastické oblasti

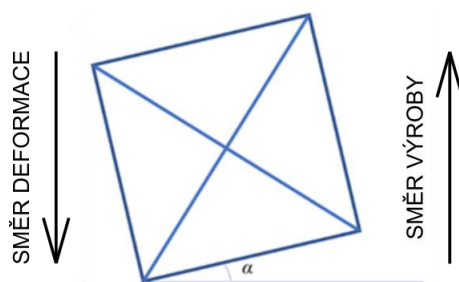
$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{MPa}) \quad (11)$$

2.2.3 Faktory ovlivňující schopnost absorpce energie

Jedním ze základních prvků, ovlivňujících schopnost struktur absorbovat energii, je jejich vnitřní geometrické uspořádání, a z toho plynoucí Maxwellovo kritérium stability (rovnice (1) a (2)). Obecně se jako vhodnější pro absorpci energie uvádí struktury typu stretching-dominated, které vykazují vyšší tuhost, která ovšem nemusí být pro tyto aplikace vždy výhodná. Pro dosažení stretching-dominated chování struktur je zapotřebí, aby byla elementární buňka složena z většího množství prutů, než je tomu u struktur typu bending-dominated. S větším množstvím prutů roste také objemový podíl struktur. Vyšší objemový podíl znamená nejen vyšší hmotnost, ale také posunutí počátku oblasti densifikace na nižší hodnotu poměrné deformace, a tím zkrácení oblasti efektivně využitelné pro disipaci energie [19]. To by se do jisté míry mohlo kompenzovat použitím elementární buňky větších rozměrů, což by však vedlo k menšímu množství vrstev struktury, a tedy i snížení možnosti přizpůsobení deformační charakteristiky. Proto je mnohdy výhodnější využití struktur s bending-dominated chováním. Zhang a kol. [4] uvádí, že dlouhá plateau stress oblast deformačního mechanismu (viz Obr. 2-2), které tyto struktury obecně vykazují, zlepšuje jejich schopnost absorpce energie. V plateau stress oblasti dle nich ale také může docházet k periodickému změkčujícímu chování materiálu a kolísání napětí v důsledku křehkého lomového mechanismu, což vede ke zhoršení schopnosti absorpce energie. Tomu se dá částečně předejít použitím houževnatých materiálů.

Velký vliv na množství absorbované energie má především průměr prutu. Obecně platí, že čím větší průměr prutu, tím vyšší množství absorbované energie. Z toho vyplývá, že množství absorbované energie je závislé na relativní hustotě materiálu [20]. U mikro-prutových struktur je ale také snahou, dosáhnout co nejnižší hmotnosti, proto je důležité posoudit veškeré proměnné a najít ideální kombinaci velikosti buňky a průměru prutu pro dosažení požadovaných vlastností.

Na schopnost struktury absorbovat energii má vliv také řada dalších faktorů, například orientace či naklonění buněk. Wang a kol. [21] zkoumali struktury s elementární buňkou typu FCC v různých konfiguracích, kdy byly jednotlivé buňky ve struktuře orientovány pod různým úhlem vůči platformě (viz Obr. 2-7). Dle jejich výsledků vykazovaly největší množství absorbované energie struktury s buňkami nakloněnými o úhel $\alpha = 45^\circ$, naopak nejmenší při naklonění o úhel $\alpha = 20^\circ$. To mohlo být způsobeno rozdílnými deformačními mechanismy jednotlivých konfigurací. U struktur s buňkami nakloněnými o menší úhel docházelo při zatěžování k deformacím prutů pod úhlem 45° , a to podél jedné nebo obou úhlopříček struktur. Zatímco u struktur s buňkami nakloněnými pod úhlem 45° k těmto deformacím došlo nejprve jen v horní polovině struktury a v polovině spodní až v pozdější fázi.



Obr. 2-7 Schéma struktury nakloněné o úhel α [21]

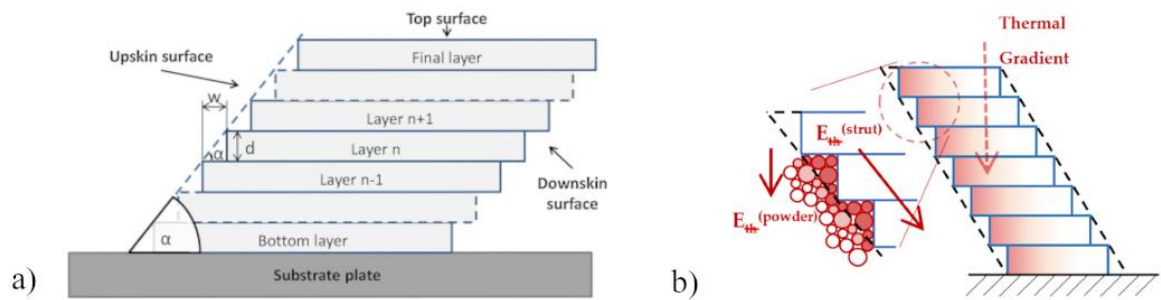
Seharing a kol. [2] ve svém přehledu uvádí jako mikro-prutové struktury vhodné pro absorpci energie struktury založené na buňkách typu kubické plošně středěné na všechny plochy (AFCC), kombinaci dvou buněk kubických plošně středěných s buňkou kubickou prostorově středěnou (F2BCC) a Rhombic Dodecahedron.

2.3 Výroba mikro-prutových struktur technologií SLM

Princip technologie SLM spočívá v postupném natavování prášku a stavbě dílů po vrstvách. Díky tomu lze vyrábět díly s komplexní geometrií, jako jsou například mikro-prutové struktury. Na druhou stranu s sebou tento princip nese několik nežádoucích jevů. Jejich výskyt se umocňuje v případech, kdy pruty svírají s platformou úhel menší než 90° a s klesajícím úhlem se pravděpodobnost jejich výskytu zvyšuje.

Při stavbě těchto nakloněných prutů dochází k přesazení jednotlivých vrstev vůči sobě. Povrch prutů tak již není hladký, ale svým tvarem připomíná schodiště, proto se tento jev nazývá **staircase efekt**. Rozsah nepřesností závisí především na výšce jednotlivých vrstev d a na úhlu sklonu prutu α (viz Obr. 2-8 a)). [22, 23]

U nakloněných prutů může docházet také ke komplikacím s odvodem tepla. Teplotní gradient míří ve vertikálním směru k platformě (viz Obr. 2-8 b)). Protože prášek má znatelně nižší teplotní vodivost než pevný materiál, je v případě nakloněných prutů odvod tepla pomalejší. Vlivem zbytkového tepla pak dochází na spodním povrchu (*downskin surface*), v místech přesazení vrstvy, k natavení zrn prášku k povrchu prutu [24]. Důsledkem toho jsou pruty, jejichž průřez není kruhový, ani konstantní po délce prutu. Proto, jak uvádí Großmann a kol. [25], je natavování zrn pro mikro-prutové struktury, z hlediska ovlivnění mechanických vlastností, významnější jev než staircase efekt. Qiu a kol. [26] uvádí, že kromě úhlu naklonění prutu je rozsah tohoto jevu závislý především na procesních parametrech laseru, kdy s rostoucím výkonem laseru se zvětšuje i skutečný průměr prutu, a to s téměř lineární závislostí.



Obr. 2-8 a) Staircase efekt [23], b) Teplotní gradient [24]

Z pohledu vnitřní geometrie se tímto problémem zabývali Downing a kol. [27], kteří porovnávali struktury typu BCC a FCC se strukturami typu BCCZ a FCCZ, které obsahují navíc vertikální pruty. Dle jejich výsledků představují vertikální pruty přidáný materiál, který je třeba ochlazovat, ale zároveň poskytují další možnosti odvodu tepla, a to ve směru teplotního gradientu. Výsledkem je, že teplota uzlů struktur s vertikálními pruty klesá rychleji. Struktury bez vertikálních prutů tak dosahují vyšších teplot a tento rozdíl se zvyšuje s každou následující vrstvou.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Chování mikro-prutových struktur se při deformaci řídí jejich deformační charakteristikou, která je dána jejich tuhostí a rezistencí vůči působícím silám. Tyto vlastnosti jsou definovány jejich materiálem, vnitřním uspořádáním a relativní hustotou [1, 8].

V případě struktur s konstantním objemovým podílem je jejich tuhost a rezistence v celém objemu stejná [2]. Tyto struktury lze tedy navrhovat pouze pro předem známé působící síly a rázy, a lze je tedy efektivně využít jen při předem známém množství energie, kterou je třeba absorbovat. Tato situace, kdy jsou počáteční podmínky předem známé ale nastává pouze v laboratorních podmínkách.

V reálných aplikacích jsou ale působící síly a rázy ve většině případů předem jen stěží odhadnutelné. Z pohledu efektivity je také žádoucí, aby byly struktury využitelné pro širší spektrum působících energií. Zde se tedy jako jedna z vhodnějších možností jeví využití struktur s proměnným objemovým podílem. Jednotlivé složky těchto typů struktur se vyznačují různou tuhostí, v závislosti na jejich objemovém podílu [2]. Deformační charakteristika těchto typů struktur tak již není konstantní, ale různá pro jednotlivé složky. To přináší významné benefity z pohledu jejich přizpůsobitelnosti pro široké rozsahy působících rázů a energií, a tedy pro jejich využití v reálných aplikacích.

Z článků [10, 11, 13, 14] vyplývá, že struktury s proměnným objemovým podílem by obecně měly vykazovat nárůst množství absorbované energie. To však nemusí být pravidlem, jak dokazují výsledky z článku [15]. Hlavním benefitem těchto struktur se ukazuje být pozvolnější nárůst napětí, a tedy i snížení počátečních rázů, ke kterým dochází u struktur s konstantním objemovým podílem. Další výhodou je pak výrazně nižší výskyt deformací způsobených smykovým napětím, a tedy vyšší tuhost těchto struktur. Výskyt těchto deformací je však značně závislý na materiálu struktur. Například struktury z materiálů na bázi slitin hliníku mají výrazně vyšší sklony k porušení prutů, než struktury ocelové [28]. Vhodnější pro aplikaci uvažující absorpci energie je tedy využití houževnatých materiálů.

Další nespornou výhodou struktur s proměnným průměrem prutu je pak postupný nárůst napětí, který eliminuje velké počáteční rázy. U struktur s konstantním objemovým podílem dochází k jedinému většímu rázu při vysokém špičkovém napětí, zatímco v případě proměnného objemového podílu je nárůst napětí postupný a vyskytuje se zde více, postupně narůstajících, napěťových špiček [10]. Díky tomu jsou počáteční rázy znatelně nižší.

Výzkum v oblasti mikro-prutových struktur s proměnným objemovým podílem je zaměřen především na struktury typu BCC, struktury, jejichž geometrie je definována metodou TPMS, a struktury auxetické. Žádný dohledatelný výzkum není zaměřen na struktury typu F2BCC s proměnným objemovým podílem, které v konfiguraci s konstantním objemovým podílem Seharing a kol. [2] uvádí jako perspektivní pro aplikace uvažující absorpci energie. Výjimkou v tomto ohledu jsou Al-Saedi a kol. [10], kteří pro svůj výzkum využili struktury založené na mírně modifikované elementární buňce typu F2BCC. Ti se však věnovali pouze porovnání struktur s konstantním průměrem prutu a plynule proměnným průměrem prutu. Pro svůj výzkum také zvolili křehký materiál, který je pro aplikace uvažující absorpci energie méně vhodný [28]. Žádný dohledatelný výzkum také není zaměřen na struktury se skokovou změnou průměru prutu.

Vzhledem k nedostatku studií zaměřených na struktury typu F2BCC a studií zahrnujících struktury se skokovou změnou průměru prutu se z hlediska typů struktur jeví jako žádoucí porovnání struktur F2BCC se strukturami využitými v článku [10]. Jelikož jsou oba typy založeny na velmi podobné základní geometrii, může jejich porovnání podhalit vliv geometrických parametrů, jako je úhel sklonu prutu. Z pohledu mechanismu změny průměru prutu se poté jako žádoucí jeví porovnání struktur s konstantním průměrem prutu se strukturami s plynule a skokově proměnným průměrem prutu.

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je porovnání schopnosti absorpce energie a deformačních mechanismů alespoň dvou různých konfigurací mikro-prutových struktur s proměnným průměrem prutu vyrobených z austenitické nerezové oceli 316L metodou Selective Laser Melting.

Dílní cíle práce:

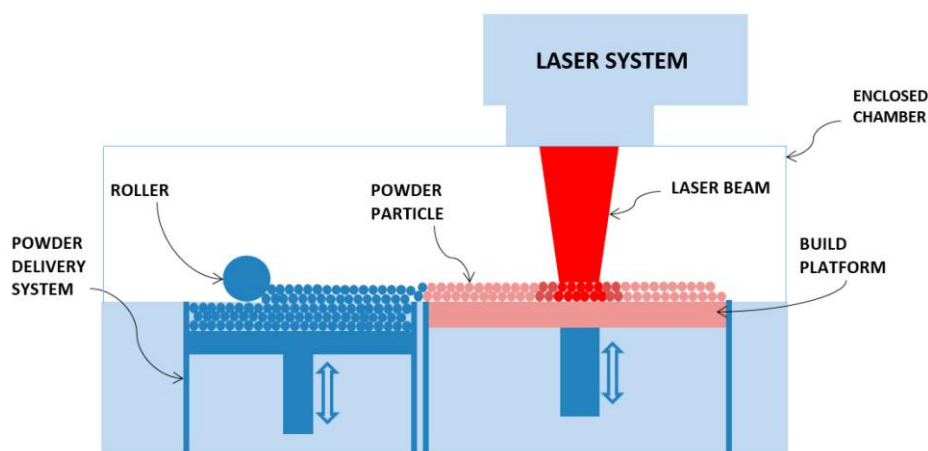
- i) Provedení rešeršní studie mikro-prutových struktur s proměnným průměrem prutu.
- ii) Návrh zkušebních těles s ohledem na možnosti testovacích metod.
- iii) Výroba testovacích těles a provedení tlakové zkoušky struktur.
- iv) Porovnání a vyhodnocení jednotlivých variant mikro-prutových struktur z hlediska absorpce energie a deformačních mechanismů.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Selective Laser Melting

Selective Laser Melting (SLM) je jedna z aditivních technologií výroby. Výroba probíhá na základě 3D dat modelů připravených s použitím CAD modelářů. V prvních krocích je 3D model příslušným softwarem rozložen na vrstvy (tzv. *slicing*), následně jsou přiděleny trajektorii laserového paprsku a procesní parametry. Poté probíhá samotná výroba, kdy je na výrobní platformu nanášena jedna vrstva prášku. Výkonným laserem je vrstva prášku natavena v místech určených 3D daty. Po dokončení tohoto kroku je platforma snížena o výšku vrstvy a cyklus se opakuje, dokud není vrstva po vrstvě dokončen celý díl. Nenatavený prášek zůstává po celý čas výroby okolo vyráběného dílu (tzv. *powder bed systém*). Po ukončení procesu je nutné odstranit zbylý prášek a vyrobený díl odřezat od platformy. V případě potřeby může následovat další zpracování dílu – obrábění, broušení, pískování.

V pracovní komoře stroje je atmosféra tvořená inertním plynem, udržovaná mírným přetlakem. Výrobní platforma může být v případě potřeby předehřata na požadovanou teplotu. [29]



Obr. 4-1 Schéma procesu výroby metodou Selective Laser Melting [29]

Procesní parametry

Výroba struktur byla provedena na zařízení SLM 280^{HL} od společnosti SLM Solutions GmbH (Lübeck, Německo), vybaveným výkonným YLR-laserem. Pro výrobu bylo využito nastavení parametrů doporučené výrobcem, tedy:

- Předehřev platformy na 100 °C.
- Dusíková inertní atmosféra v pracovní komoře stroje.
- Přetlak v pracovní komoře 12 mbar.

- Tloušťka vrstvy 50 μm .
- Scanning contours – výkon laseru 100 W, skenovací rychlost 300 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Hatching – výkon laseru 275 W, skenovací rychlost 700 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Filling contours – výkon laseru 150 W, skenovací rychlost 400 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

4.2 Použitý materiál

Pro výrobu struktur byl použit prášek z nerezové oceli 316L (1.4404) společnosti TLS Technik GmbH, vyrobený metodou plynové atomizace. Nerezová ocel 316L vykazuje dobrou zpracovatelnost, díky čemuž je vhodná pro výrobu součástí s komplexní geometrií. Navíc je tento materiál houževnatý, což je pro absorpci energie žádoucí vlastnost.

Jelikož použitý kovový prášek vykazuje afinitu ke vzdušné vlhkosti, byl před samotnou výrobou vysušen v peci po dobu 16 hodin při teplotě 60°C.

Velikost jednotlivých částí prášku se pohybovala v intervalu 10 μm – 50 μm . Hustota zpracovaného materiálu byla uvažována $\rho_s = 7900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [30]¹, smluvní mez kluzu $R_{p0,2} = 525 \text{ MPa}$ a Youngův modul pružnosti materiálu byl uvažován $E_s = 200 \text{ GPa}$ [31].

Tab. 4-1 Chemické složení prášku nerezové oceli 316L [32]

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

4.3 Návrh mikro-prutových struktur

Návrh mikro-prutových struktur byl omezen několika kritérii. Omezení vycházely především ze způsobu výroby a podmínek pro provedení experimentu.

¹ Zde se může u vyrobených struktur vyskytovat určitá nejistota způsobena použitou výrobní strategií, vnitřní porozitou a geometrií struktur.

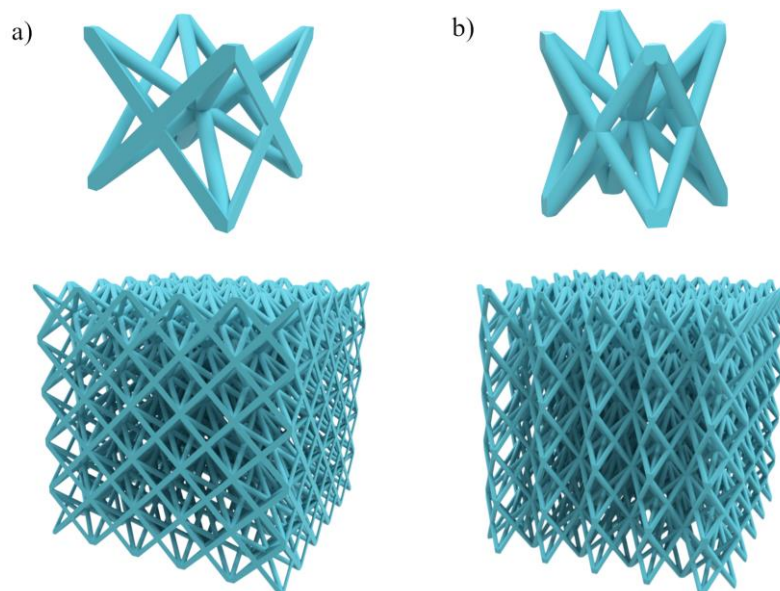
Výroba metodou SLM představovala omezení především v podobě orientace (naklonění) prutů vůči platformě. Na základě výzkumu Vrány [33] byl minimální úhel mezi pruty a výrobní platformou zvolen 35° . Vyřazeny z návrhu byly také pruty orientované horizontálně, zde hrozilo jejich zdeformování vlivem špatného odvodu tepla. V potaz musel být brán také minimální průměr prutu, který je touto metodou vyrobitelný bez větších obtíží. Zde byl, na základě předchozích zkušeností s konkrétní metodou výroby, zvolen minimální průměr 0,3 mm. Tyto podmínky představovaly zásadní omezení, které z výběru vyřadilo velké množství struktur a jejich konfigurací.

Z pohledu proveditelnosti experimentu byly omezeny maximální rozměry podstavy testovacích těles. Vzhledem k rozměrům impaktoru byla maximální délka úhlopříčky podstavy 40 mm. Druhé omezení plynulo z maximálního množství kinetické energie, dosažitelné testovacím zařízením. Testované struktury byly navrženy tak, aby u nich došlo k poměrné deformace alespoň 50 %. Velikost deformace byla určena odhadem na základě předchozích testování na stejném zařízení a analytických modelů pomocí rovnic (8) a (10).

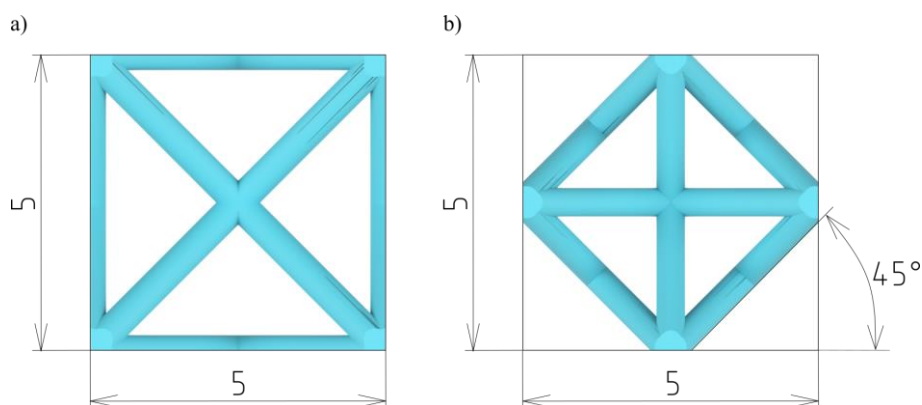
Z důvodu chybějícího výzkumu mikro-prutových struktur s elementární buňkou typu F2BCC byl pro experiment zvolen právě tento typ struktur. Druhým použitým typem byly struktury s elementární buňkou F2BCC, pootočenou o 45° okolo své vertikální osy, přičemž byly zachovány rozměry původní podstavy a výška vrstvy. Tyto struktury jsou dále označovány jako F2BCC_45. Jednotlivé typy struktur a jejich uspořádání je zobrazeno na Obr. 4-2, resp. Obr. 4-3. V obou případech se jedná o struktury typu bending-dominated a jejich Maxwellovo číslo je $M = -9$ (viz rovnice (2)).

Elementární buňky obou zvolených typů struktur jsou si vzájemně velice podobné. Z jejich porovnání tedy může odhalit, jak velký vliv má orientace elementární buňky, respektive jejich prutů, na schopnost absorpce energie.

Struktury typu F2BCC_45 by v porovnání se strukturami F2BCC měly eliminovat některé jejich nedostatky. Jedná se především o orientaci prutů vzhledem k podstavě, kdy pruty struktur typu F2BCC_45 svírají s podstavou minimální úhel 45° , zatímco v případě prutů struktur F2BCC je tento úhel minimálně $35,26^\circ$. Dalším nedostatkem, který je u struktur F2BCC_45 eliminován, je absence okrajových prutů struktur, jejichž průřez je u struktur F2BCC pouze poloviční, oproti ostatním prutům. Právě tyto zmíněné parametry by měly zajišťovat vyšší tuhost struktur typu F2BCC_45.



Obr. 4-2 CAD modely elementárních buněk (nahore) a mikro-prutových struktur (dole) s konstantním průměrem prutu; a) F2BCC; b) F2BCC_45









Obr. 4-3 Orientace elementárních buněk; a) F2BCC; b) F2BCC_45

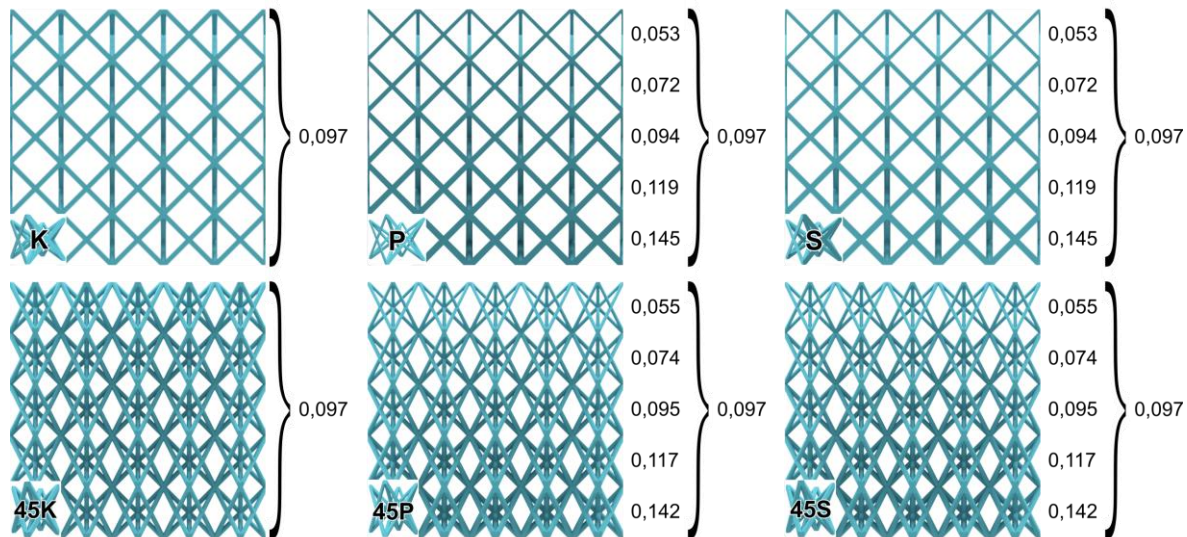
Oba typy byly navrženy ve 3 konfiguracích, a to s konstantním průměrem prutu, s plynule proměnným průměrem prutu a se skokově proměnným průměrem prutu po jednotlivých vrstvách buněk, přičemž u všech konfigurací byla dodržena shodná relativní hustota $\rho_{rel} = 0,097$. Relativní hustoty jednotlivých vrstev jsou znázorněny na Obr. 4-4. Struktury se skládali z $5 \times 5 \times 5$ elementárních buněk o rozměrech $5 \times 5 \times 5$ mm. Celkové rozměry testovacích těles byly tedy $25 \times 25 \times 25$ mm.

Pro snazší orientaci je v Tab. 4-2 uvedena legenda ke značení jednotlivých konfigurací struktur.

Tab. 4-2 Legenda ke značení struktur

Typ struktury	Konfigurace	Označení konfigurace	Označení vzorku
F2BCC	S konstantním průměrem prutu		Kx
	S plynule proměnným průměrem prutu		Px
	Se skokovou změnou průměru prutu		Sx
F2BCC_45	S konstantním průměrem prutu		45Kx
	S plynule proměnným průměrem prutu		45Px
	Se skokovou změnou průměru prutu		45Sx

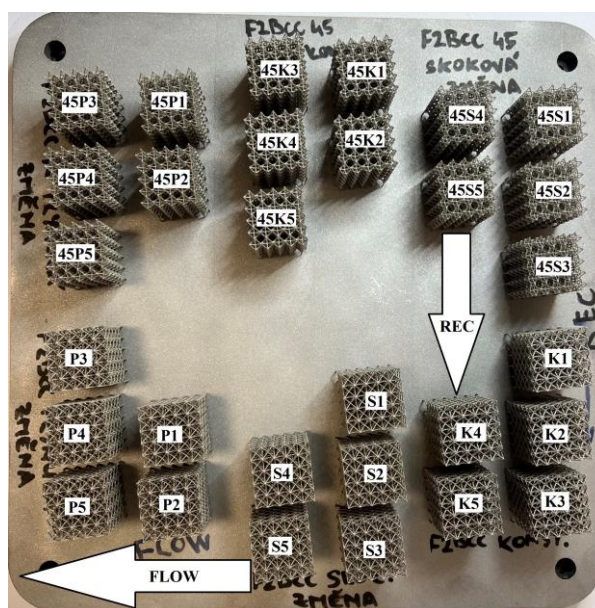
kde x je číslo konkrétního vzorku



Obr. 4-4 Relativní hustoty struktur

4.4 Výroba testovacích těles

CAD modely struktur byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor Professional 2022 (Autodesk, Mill Valley, USA). Modely byly následně převedeny do formátu .stl a zpracovány v programu Materialise Magics (Materialise, Leuven, Belgie), v němž byla vytvořena výrobní data pro samotný 3D tisk – rozmístění struktur na výrobní platformu a rozdělení do vrstev (tzv. slicování). Pro každou konfiguraci bylo vyrobeno 5 testovacích těles, tj. 30 těles celkem.

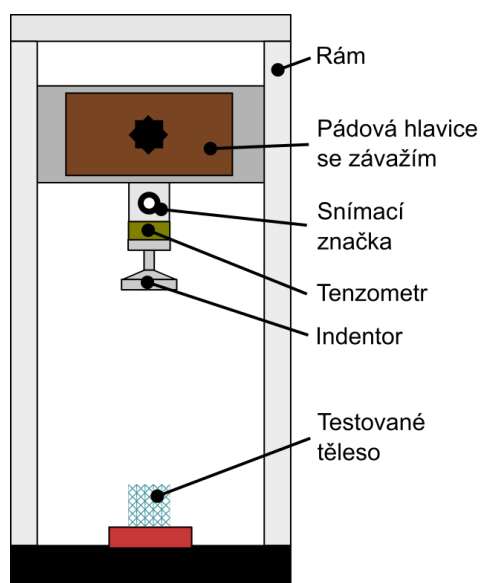


Obr. 4-5 Umístění struktur na výrobní platformě; Flow – směr proudění ochranné atmosféry; Rec – směr pohybu zásobníku s práškem

4.5 Tlaková zkouška

Tlaková zkouška spočívala v provedení pádového testu. Schéma testovacího zařízení je zobrazeno na Obr. 4-6. Pro změření působících sil se na pádové hlavici nacházel tenzometr XY31-3/120. Vzorkovací frekvence tenzometru byla 96 kHz. Celková hmotnost pádové hlavice činila 11,45 kg pro struktury typu F2BCC, pro struktury typu F2BCC_45 pak 13,45 kg². Hlavice byla spouštěna z výšky 1 m a její dopadová rychlost se pohybovala okolo 3 m·s⁻¹. Pádový test byl také zaznamenáván vysokorychlostní kamerou Phantom V710 (Vision Research, Wayne, USA). Kamera snímala s frekvencí 56 808 Hz a rozlišením 1280 × 104 pixelů.

Závislost působící síly na čase, získaná tenzometrem, a obrazový záznam z kamery byly následně vyhodnoceny v programu Matlab R2019b (MathWorks, Natick, USA) a byla získána závislost síly na poloze. Z této závislosti byly následně dopočítány závislosti napětí na poměrné deformaci, efektivita absorpce energie, Youngův modul pružnosti struktur, a v případě struktur s proměnným objemovým podílem také množství absorbované energie jednotlivými vrstvami.



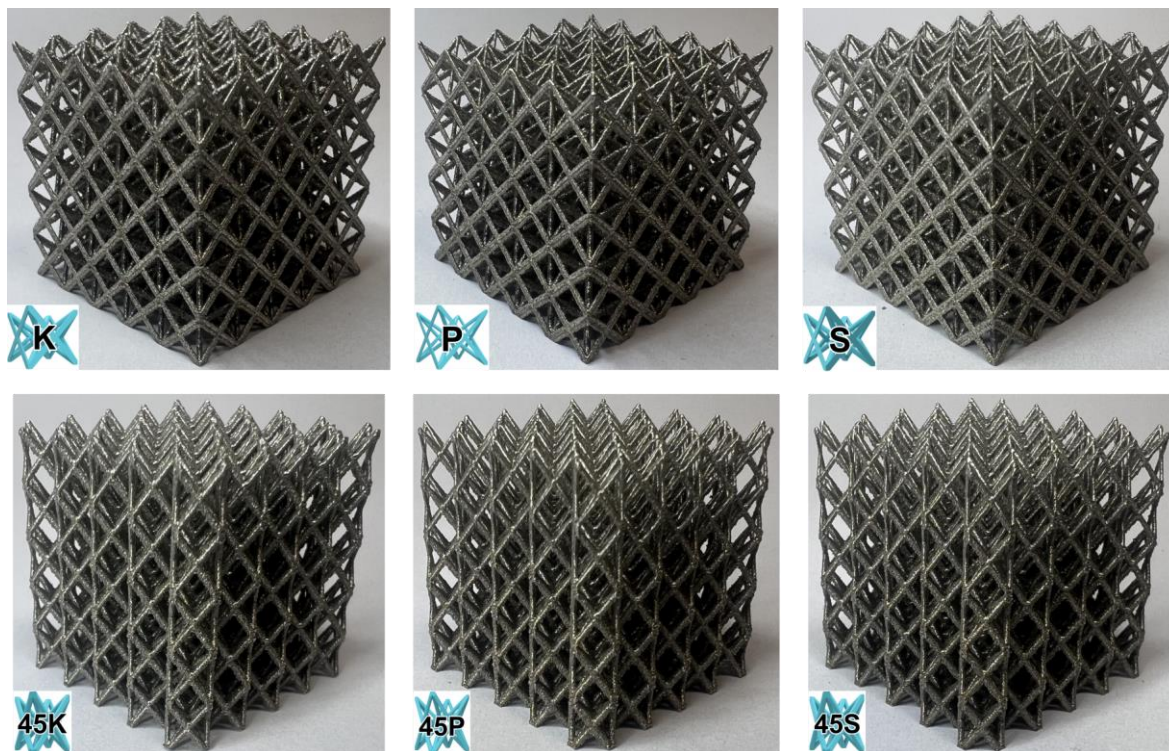
Obr. 4-6 Schéma testovacího zařízení

² Pro vzorek 45K1 činila hmotnost pádové hlavice 11,45 kg

5 VÝSLEDKY

5.1 Analýza vyrobených struktur

Analýza spočívala především v kontrole kvality vyrobených struktur, a v určení jejich skutečných rozměrů a hmotností, resp. relativních hustot.

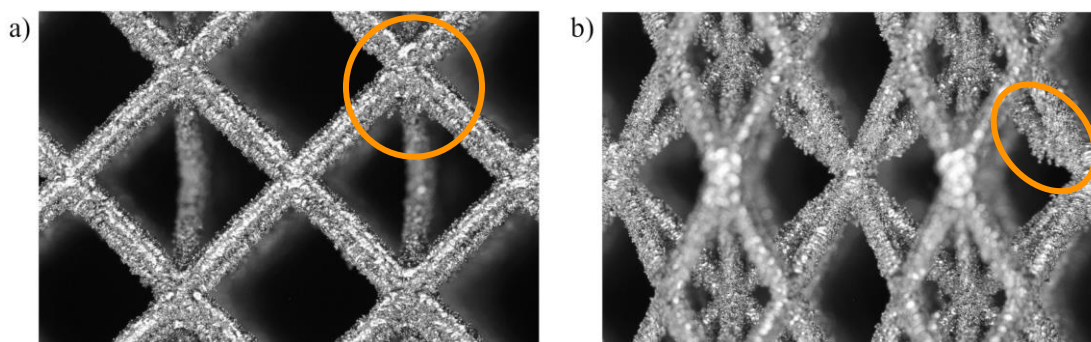


Obr. 5-1 Fotodokumentace struktur

Z měření celkových rozměrů vzorků vyplývá, že šířka a hloubka (rozměry a a b) byly u všech struktur větší než rozměry CAD modelu. Průměrná odchylka je zde 0,13 mm. Jelikož odchylky jsou v rámci všech struktur podobné, lze usuzovat, že jsou způsobeny výrobními nepřesnostmi technologie SLM. Zároveň lze říci, že poloha struktur na výrobní platformě nemá na tyto rozměry vliv. Výška struktur (rozměr h) byla v rámci post-processingu zabrušována na nominální hodnotu, tudíž tento rozměr není ovlivněn nepřesnostmi výrobní technologie.

Při vážení bylo zjištěno, že u struktur typu F2BCC byly jejich skutečné hmotnosti vyšší o 1-10 % než hmotnosti CAD modelu, zatímco u struktur typu F2BCC_45 byly jejich skutečné hmotnosti nižší než hmotnosti CAD modelu, a to o 1-7 %. Tento rozdíl mohl být způsoben natavováním zrn prášku na pruty vlivem orientace prutů. U struktur F2BCC_45 byl nejmenší úhel mezi pruty a platformou 45° , zatímco u struktur F2BCC byl nejmenší úhel $35,26^\circ$. Struktury F2BCC tedy mohly být náchylnější ke vzniku staircase efektu a natavování zrn na pruty. Odchyly hmotnosti od hmotnosti dané CAD modelem jsou zobrazeny na Obr. 5-4.

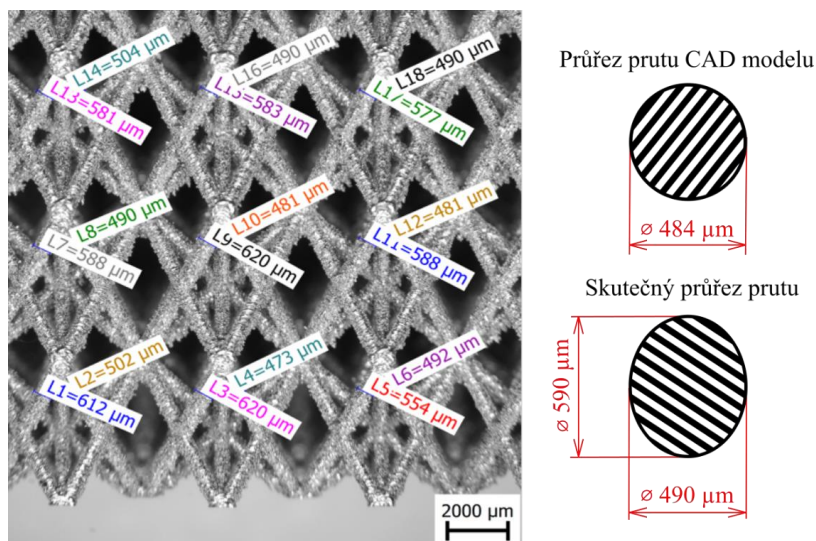
Detailnější analýza vyrobených struktur byla provedena pomocí optického mikroskopu Olympus SZX7 (Olympus, Tokyo, Japonsko). Při kontrole struktur při 20násobném zvětšení se pruty jeví bez výraznějších vad. Místy se vyskytovaly shluky materiálu, především v oblasti uzlů (viz Obr. 5-2 a)). Na některých prutech byla také patrná natavená zrna (viz obr. 5-2 b)).



Obr. 5-2 Detail struktur – 20x zvětšeno; a) vzorek P1; b) vzorek 45K1

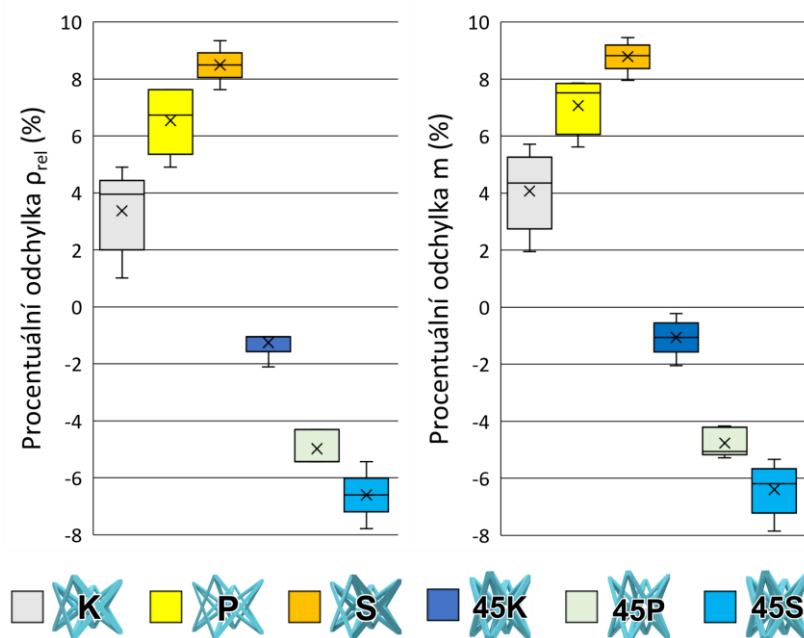
Z měření průměrů prutů, provedeného na snímcích pod mikroskopem, byly patrné odchylky rozměrů od nominálních průměrů. U struktur typu F2BCC byly skutečné průměry prutů o 25-35 % větší než nominální průměry. U struktur typu F2BCC_45 pak byly skutečné průměry větší o 2-10 %, přičemž platilo, že čím menší byl nominální průměr prutu, tím menší byla také odchylka. U struktur typu F2BCC výsledky měření korespondovaly s výsledky vážení, kdy vzorky měly vyšší hmotnost i průměry prutů. U struktur typu F2BCC_45 již výsledky nebyly tak jednoznačné, kdy, i přes hmotnosti nižší než nominální, byly průměry prutů větší než nominální.

Při měření byla pozorována také nekruhovitost průřezu, přičemž nejvíce byl tento fenomén viditelný u vzorku 45K1. Průměry prutů byly měřeny ze 2 úhlů pohledů, vzájemně na sebe kolmých. Průměr hodnot naměřených z prvního úhlu činil $590\ \mu\text{m}$, zatímco průměr hodnot měřených z druhého úhlu byl $490\ \mu\text{m}$. Znázornění průřezu je na Obr. 5-3.



Obr. 5-3 Analýza průřezu prutů – 8x zvětšeno – vzorek 45K1

Z naměřených rozměrů struktur a jejich skutečných hmotností byla dle rovnice (3) dopočítána relativní hustota. V případě všech vyrobených struktur jejich relativní hustota přibližně odpovídala naměřeným hmotnostem. U struktur F2BCC byly skutečné relativní hustoty, stejně jako jejich hmotnosti, vyšší než relativní hustoty CAD modelů, přičemž největší rozdíl zde byl u vzorku S5 a činil 9,35 %. U struktur F2BCC_45 byly jejich relativní hustoty nižší. Zde byla největší odchylka u vzorku 45S3 a činila -7,38 %. Obecně byly odchylky nejmenší u vzorků s konstantním průměrem prutu a nejvyšší u vzorků se skokově proměnným průměrem prutu. To platí pro struktury F2BCC i F2BCC_45. Odchylky od relativní hustoty CAD modelu jsou zobrazeny na Obr. 5-4.

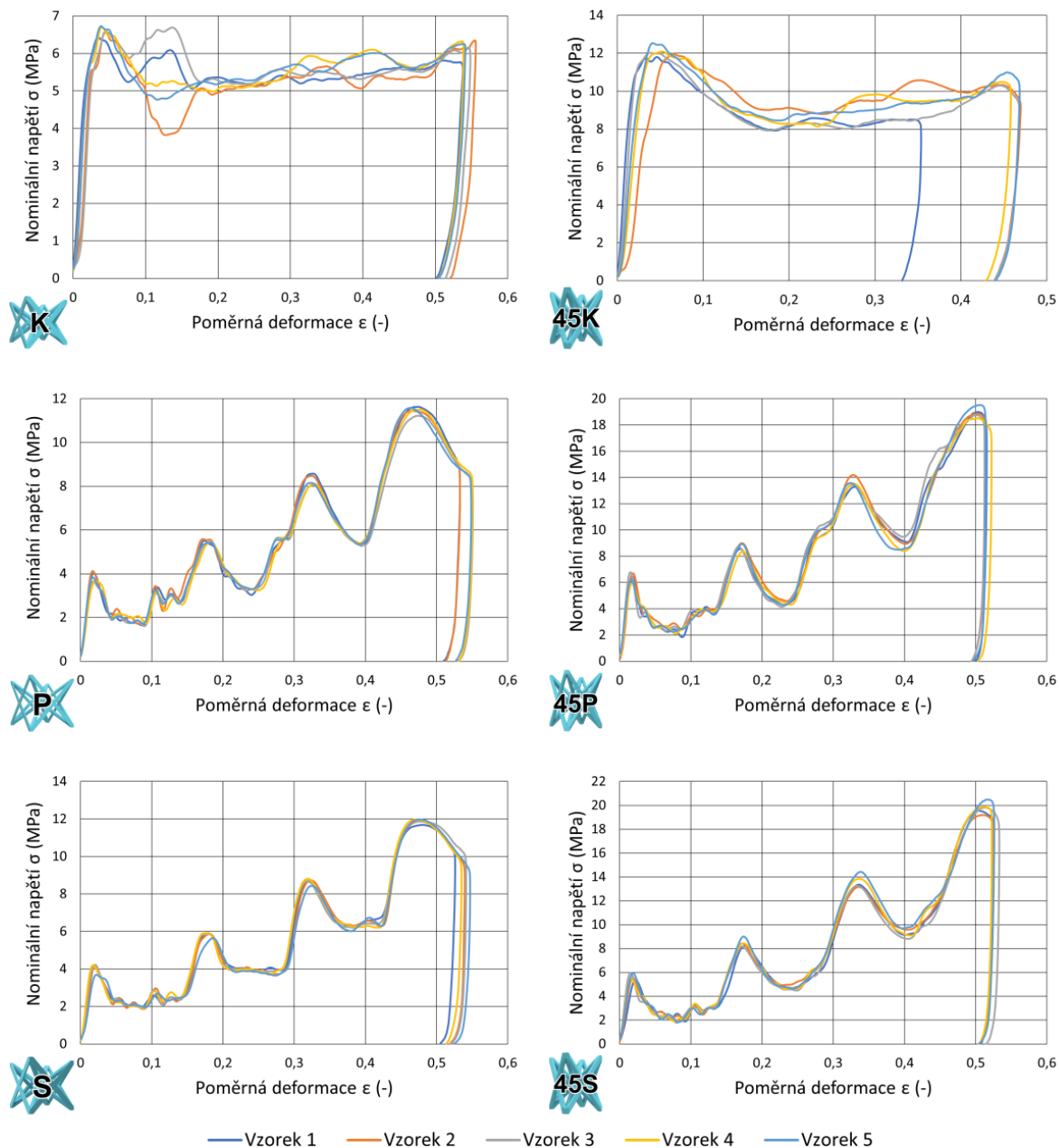


Obr. 5-4 Procentuální odchylka relativních hustot a hmotností od hodnot CAD modelu

Podrobný přehled naměřených parametrů struktur je uveden v příloze A – Tab. 12-1.

5.2 Vyhodnocení tlakové zkoušky

Vyhodnocením naměřených dat z tenzometru a snímků z vysokorychlostní kamery (viz příloha B) byly získány **závislosti napětí na poměrné deformaci jednotlivých struktur** (viz Obr. 5-5).³



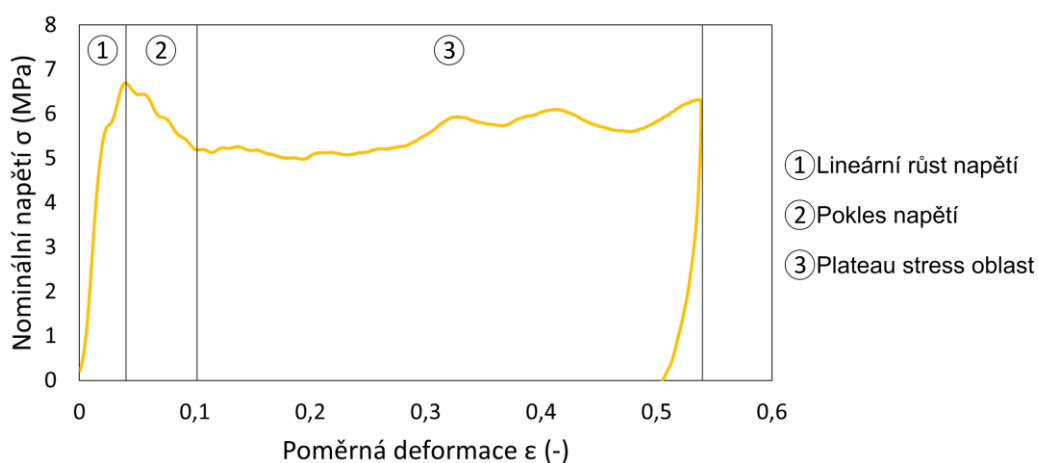
Obr. 5-5 Závislost napětí na deformaci

³ Hodnota nominálního napětí byla získána jako podíl síly F naměřené tenzometrem a plochy podstavy struktur $S = (a \cdot b)$.

Z grafů je patrné, že v případě struktur F2BCC_45 – K se požadované poměrné deformace alespoň 50 % dosáhnout nepodařilo. U těchto struktur bylo u prvního testovaného vzorku dosaženo poměrné deformace 35,4 %, poté byla navýšena hmotnost závaží a poměrná deformace zbylých vzorků se pohybovala v intervalu 46 – 47 %.

Při porovnání typů struktur je patrné, že struktury typu F2BCC_45 dosahovaly znatelně vyšších hodnot napětí, a tedy i tuhosti, oproti strukturám typu F2BCC. Průběh jejich deformačních mechanismů byl téměř srovnatelný.

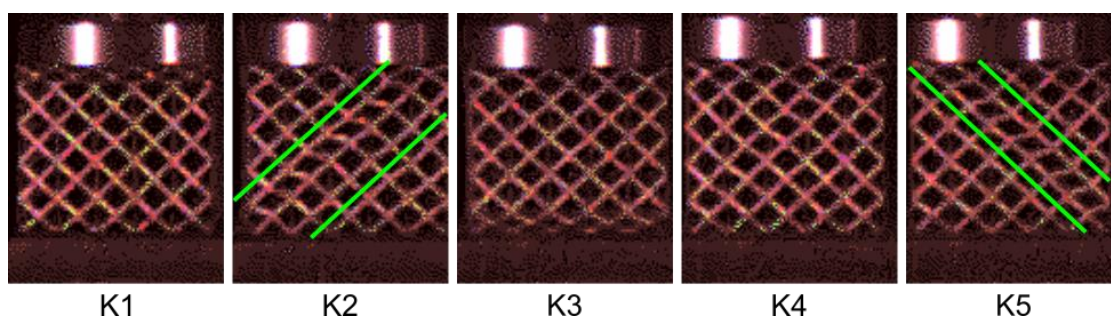
V případě struktur s konstantním průměrem prutu byla křivka napětí tvořena nejprve lineární oblastí, kdy bylo při poměrné deformaci přibližně 4 % dosaženo maximálního špičkového napětí, následovaného jeho poklesem. Poté následovala plateau stress oblast při téměř konstantním napětí (viz Obr. 5-6). Na snímcích v příloze B lze vidět, že struktury se deformovaly ve všech vrstvách relativně rovnoměrně. V případě těchto struktur také docházelo k deformacím vlivem smykového napětí.



Obr. 5-6 Pásma deformace (vzorek K4)

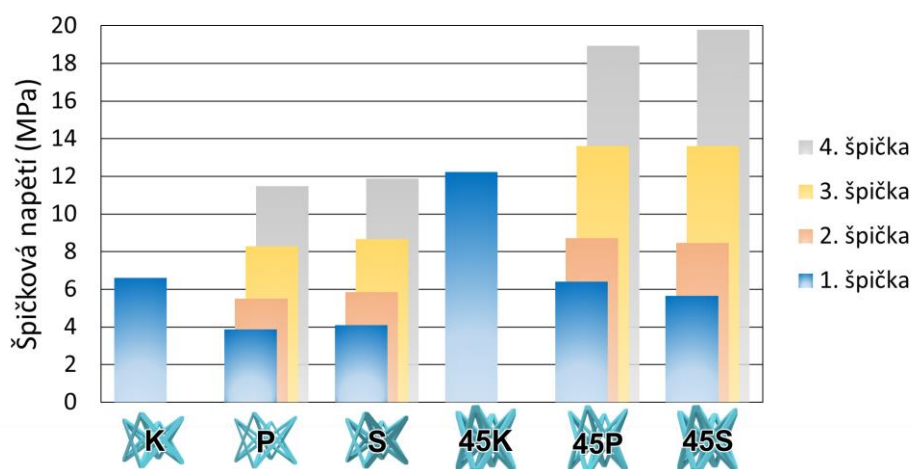
U struktur s plynule a skokově proměnným průměrem prutu byly křivky napětí zcela odlišné. Struktury se deformovaly postupně od vrstev s nejmenším průměrem prutu. Toho si lze opět všimnout na snímcích v příloze B. Napětí zde tak dosahovalo několika špiček, přičemž každá odpovídala okamžiku kolapsu jedné vrstvy v závislosti na jejím objemovém podílu, přičemž s rostoucím objemovým podílem narůstá i maximální dosažená hodnota napětí. Výskyt čtyř špičkových napětí značí, že bylo dosaženo kolapsu čtyř vrstev struktur. V případě struktur se skokově proměnným průměrem prutu byl mezi jednotlivými špičkami napětí výraznější výskyt plateau stress oblasti, než tomu bylo u struktur s plynule proměnným průměrem prutu, u nichž po dosažení lokálního minima téměř okamžitě následoval další lineární nárůst napětí.

K zajímavému jevu docházelo u struktur typu F2BCC s konstantním průměrem prutu. Zde docházelo před začátkem plateau stress oblasti k rozdílnému chování, kdy u některých vzorků došlo k opětovnému růstu napětí, zatímco u jiných došlo k ještě výraznějšímu poklesu napětí. V případě vzorků, u kterých byl zaznamenán pokles napětí (vzorky K2 a K5) došlo ke vzniku deformace prutů pod úhlem 45° vlivem smykových napětí (viz Obr. 5-7), což negativně ovlivnilo jejich tuhost. V případě vzorků, u kterých byl zaznamenán nárůst napětí (vzorky K1 a K3) k této deformaci nedošlo. V případě vzorku K4, u kterého bylo napětí stále konstantní, byly viditelné mírné deformace všech prutů.



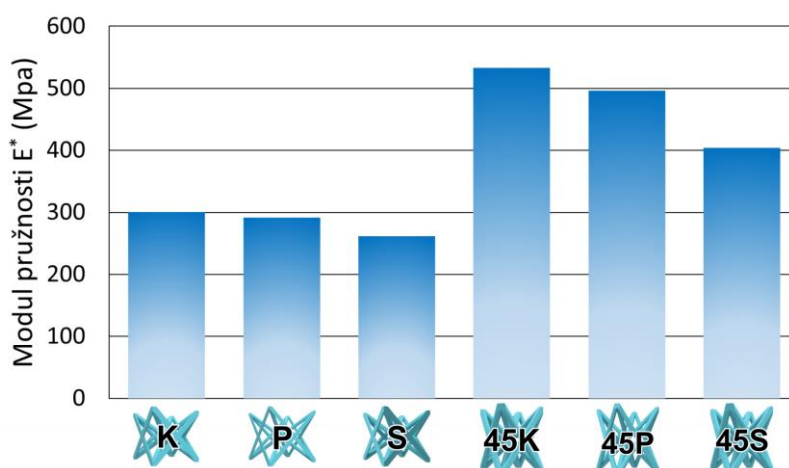
Obr. 5-7 Rozdílná deformace struktur typu F2BCC s konstantním průměrem prutu

Dalším pozorovaným aspektem deformačních mechanismů struktur byly **velikosti dosažených špičkových napětí**. Dle předpokladů byla hodnota prvního špičkového napětí v případě struktur s proměnným průměrem prutu nižší oproti strukturám s konstantním průměrem prutu (viz Obr. 5-8). To bylo dáno nižší relativní hustotou prvních deformovaných vrstev. Procentuální snížení prvního špičkového napětí v porovnání se strukturami s konstantním průměrem prutu bylo v případě struktur F2BCC s plynulou změnou průměru prutu 42 % a se skokovou změnou průměru prutu 38 %. V případě struktur F2BCC_45 pak 48 %, respektive 54 %. V případě struktur s proměnným průměrem prutu bylo celkově dosaženo čtyř špičkových napětí, kdy každé odpovídalo kolapsu jedné vrstvy struktur. S postupně narůstající relativní hustotou vrstev se zvyšovaly také hodnoty špičkového napětí.



Obr. 5-8 Hodnoty dosažených špičkových napětí

Z hodnot napětí a poměrné deformace v průběhu lineárně-elastické oblasti deformace byl následně pomocí rovnice (11) vypočten **modul pružnosti** pro jednotlivé struktury.

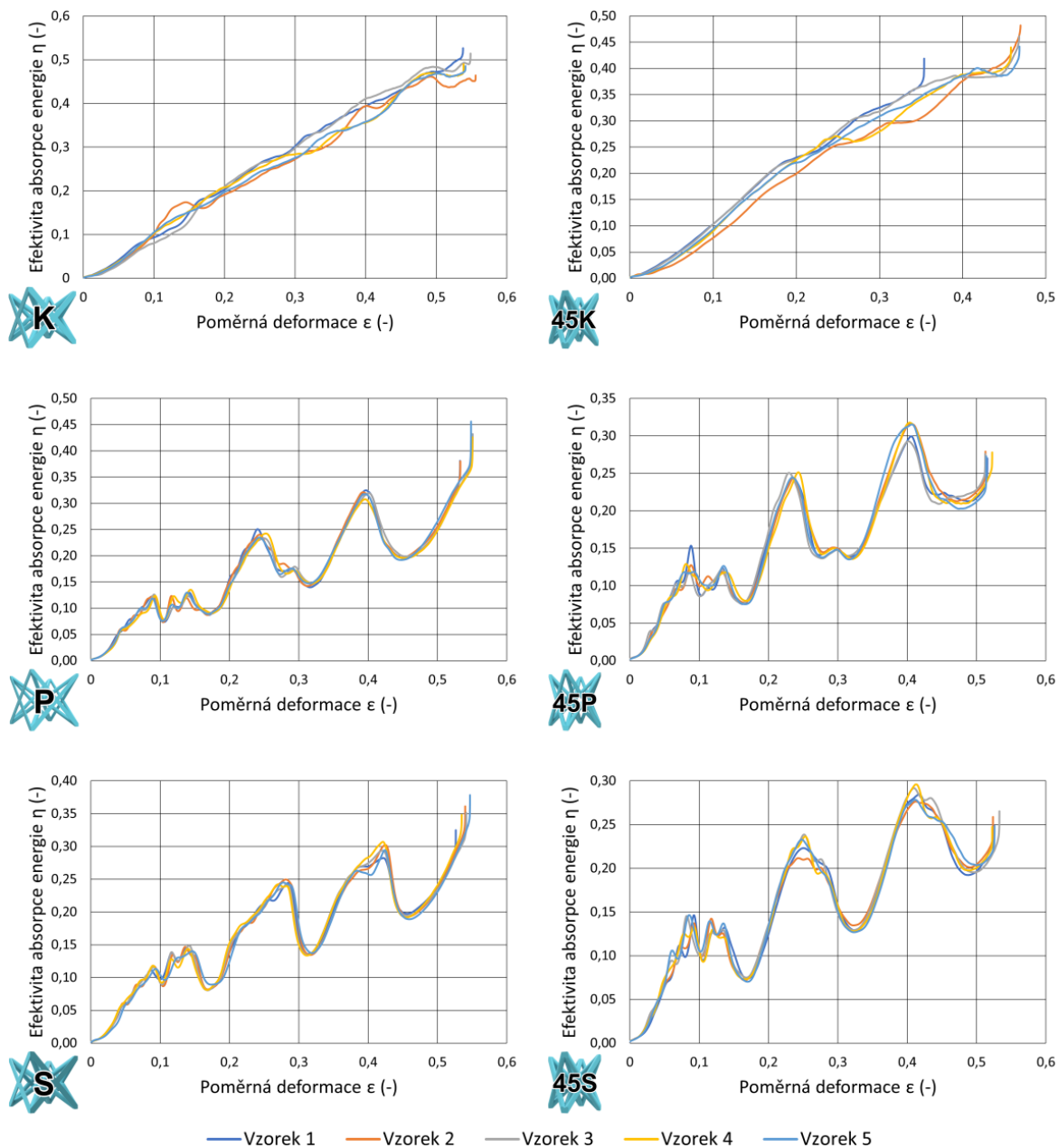


Obr. 5-9 Modul pružnosti struktur

Z Obr. 5-9 je patrné, že v struktury typu F2BCC_45 dosahovaly vyšších hodnot modulu pružnosti oproti strukturám F2BCC. Zároveň pro oba typy struktur platilo, že nejvyšších hodnot dosahovaly struktury s konstantním průměrem prutu, nižších hodnot poté struktury s plynulou změnou průměru prutu a se skokovou změnou průměru prutu.

Následujícím zjišťovaným parametrem byla **efektivita absorpce energie**. Její hodnoty byly počítány dle rovnice (6) a jsou zobrazeny na Obr. 5-10. Zde je viditelné, že u struktur s konstantním průměrem prutu efektivita absorpce energie lineárně rostla, zatímco u struktur s proměnným objemovým podílem rostla ve vlnách tak, jak docházelo k postupnému kolapsu jednotlivých vrstev.

Obecně bylo u struktur s proměnným objemovým podílem dosaženo menší hodnoty efektivity energie, což značí, že u těchto struktur nebyl jejich potenciál pro absorpci energie vyčerpán do takové míry, jako tomu bylo u struktur s konstantním objemovým podílem. To samé lze konstatovat při porovnání struktur F2BCC a F2BCC_45, kdy druhý zmíněný typ struktur opět dosahoval nižších hodnot v porovnání s prvním zmíněným.

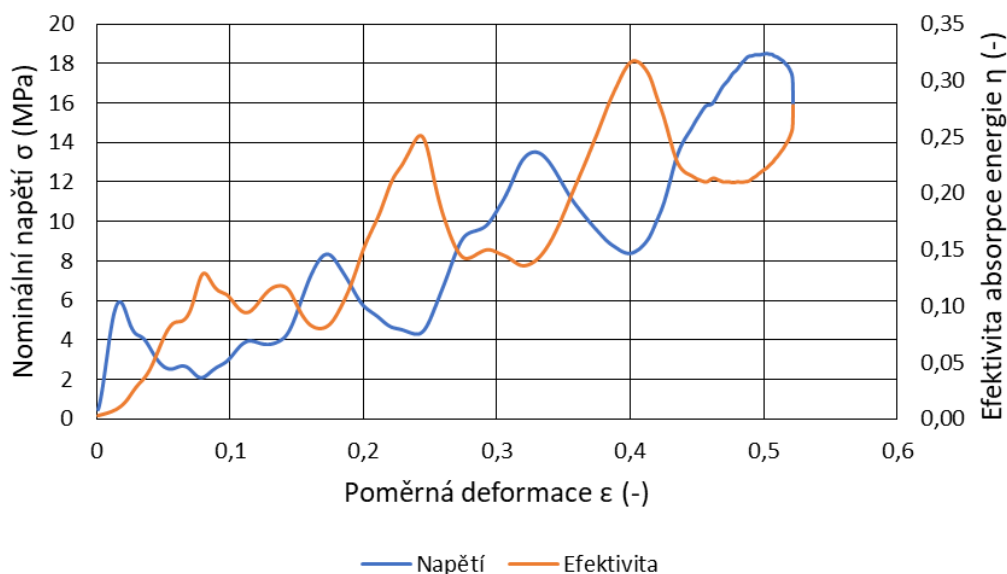


Obr. 5-10 Efektivita absorpce energie

V případě struktur s proměnným objemovým podílem docházelo k výrazné korelaci lokálních maxim efektivity s lokálními minimy napětí, a naopak (viz Obr. 5-11). Lze tedy předpokládat, že při dosažení lokálního minima napětí byl vyčerpán veškerý potenciál jednotlivých vrstev pro absorpci energie a následoval pokles efektivity. V okamžiku kolapsu jednotlivých vrstev opět docházelo k růstu efektivity absorpce energie. Jelikož u křivek napětí nebylo pro tyto struktury dosaženo lokálního minima po kolapsu čtvrté vrstvy, vyskytovaly se zde pouze 3 maxima, což značí, že potenciál čtvrté vrstvy ještě nebyl plně využit.

Struktury s proměnným objemovým podílem tedy při deformaci sledovaly následující scénář:

- Lineární nárůst napětí a dosažení špičkového napětí v okamžiku kolapsu vrstvy.
- Pokles napětí při současném růstu efektivity absorpce energie až do úplné deformace vrstvy.
- Opětovný lineární nárůst napětí při současném poklesu efektivity až do dosažení kolapsu následující vrstvy.



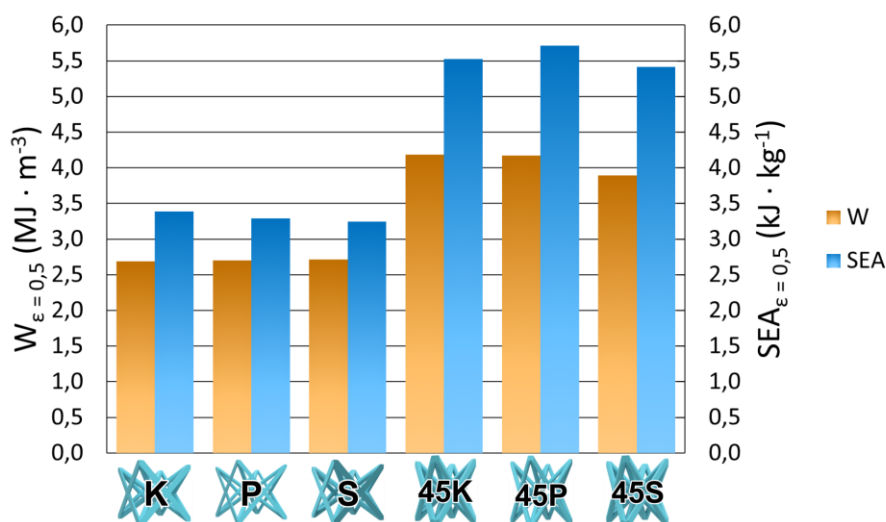
Obr. 5-11 Porovnání závislostí napětí a efektivity na poměrné deformaci (vzorek 45P4)

5.3 Vyhodnocení absorpce energie

Z Obr. 5-10 a definice počátku densifikace, jak jej uvádí rovnice (6), je patrné, že u žádné struktury nebylo densifikace dosaženo. Aby byly struktury vzájemně porovnatelné, bylo množství absorbované energie počítáno do hodnoty poměrné deformace $\epsilon = 0,5$.⁴

Měrná absorbovaná energie (W) byla počítána dle rovnice (4), tedy jako plocha pod křivkou závislosti napětí na poměrné deformaci. Z těchto hodnot byly poté dopočítány hodnoty specific energy absorption (SEA) dle rovnice (5). Hodnoty pro jednotlivé konfigurace jsou zobrazeny na Obr. 5-12, kompletní výčet hodnot pro jednotlivé vzorky je poté uveden v příloze C – Tab. 12-2.

⁴ V případě struktur F2BCC_45 – K nebylo dosaženo poměrné deformace $\epsilon = 0,5$, množství absorbované energie tedy bylo počítáno do hodnoty poměrné deformace $\epsilon = 0,45$. Vzorek 45K1 byl z výpočtů vynechán.



Obr. 5-12 Množství absorbované energie

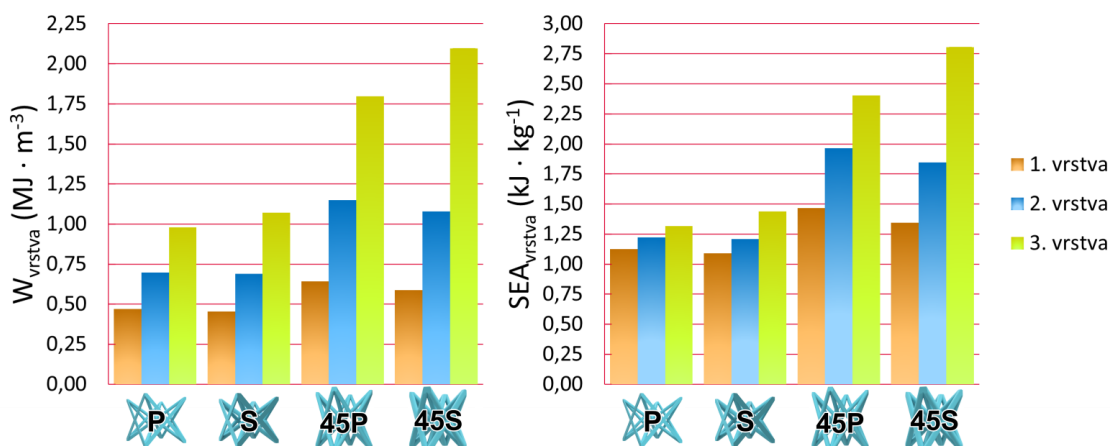
U struktur typu F2BCC byly hodnoty téměř totožné pro všechny konfigurace. V případě měrné absorbované energie připadala nejnížší hodnota na struktury s konstantním průměrem prutu, zatímco nejvyšší hodnota na struktury se skokově proměnným průměrem prutu. Rozdíl mezi jednotlivými konfiguracemi zde byl pouze 0,37 %. V případě hodnot specific energy absorption bylo pořadí struktur opačné. I zde byl ovšem rozdíl zanedbatelný, a to 2,7 %, resp. 1,5 %. Při takto malých rozdílech lze z pohledu absorpce energie všechny konfigurace považovat za rovnocenné.

U struktur typu F2BCC_45 byly hodnoty také velmi podobné pro všechny konfigurace. V případě měrné absorbované energie připadala nejnížší hodnota na struktury se skokově proměnným průměrem prutu, zatímco nejvyšší hodnota na struktury s konstantním průměrem prutu, jejichž hodnota by byla ještě vyšší, pokud by došlo k větší deformaci. Rozdíl mezi strukturami s plynulou a skokovou změnou průměru prutu činil 7,5 %. Rozdíl pro struktury s konstantním průměrem prutu nelze kvantifikovat, jelikož nedošlo k deformaci 50 %. V případě specific energy absorption pak dosahovaly nejvyšších hodnot struktury s plynule proměnným průměrem prutu. Rozdíl pro struktury s konstantním průměrem prutu opět nelze kvantifikovat. Mezi strukturami s plynulou a skokovou změnou průměru prutu byl rozdíl 5,5 %. V případě tohoto typu struktur lze za nejvhodnější z pohledu absorpce energie považovat konfiguraci s konstantním průměrem prutu.

Z porovnání obou typů struktur poté řádově lépe vycházely struktury typu F2BCC_45. Ty oproti strukturám typu F2BCC vykazovaly pro konfiguraci s konstantním, plynule proměnným a skokovým průměrem prutu nárůst měrné absorbované energie postupně o 55,4 %, 54,4 % a 43,5 % a nárůst specific energy absorption postupně o 63,6 %, 73,5 % a 67 %.

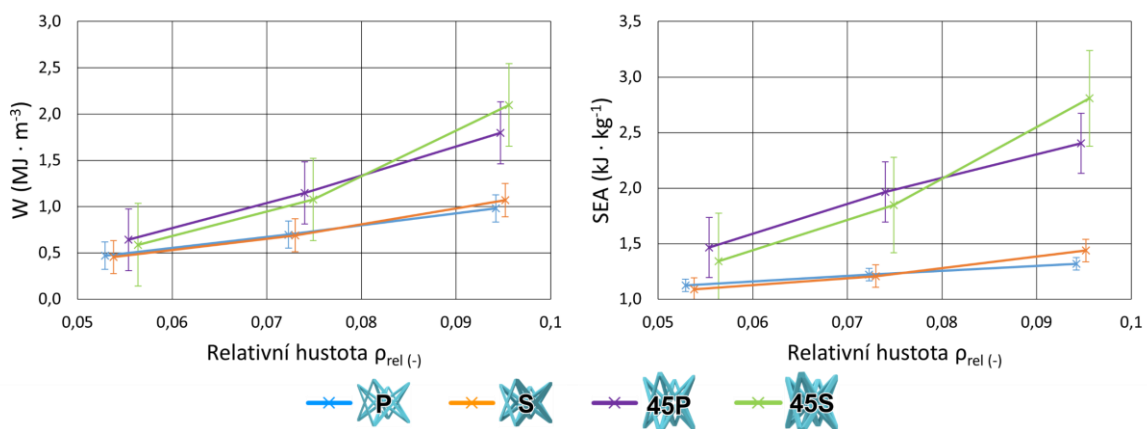
Absorbovaná energie vztažená na vrstvu

Pro struktury s proměnným objemovým podílem byly hodnoty měrné absorbované energie a specific energy absorption počítány také na jednotlivé vrstvy, přičemž jako energie absorbovaná danou vrstvou byla brána hodnota odpovídající intervalu poměrné deformace mezi lokálními minimy efektivit absorpce energie. Pro všechny struktury byly zcela zdeformovány právě tři vrstvy, pro něž byl výpočet proveden. Zde se vyskytovala určitá nepřesnost způsobená použitím hodnoty relativní hustoty CAD modelu, jelikož nebylo možné přesně změřit skutečné relativní hustoty jednotlivých vrstev. Hodnoty měrné absorbované energie (W) a specific energy absorption (SEA) vztažené na jednotlivé vrstvy jsou zobrazeny na Obr. 5-13.



Obr. 5-13 Absorbované energie vztažené na vrstvu

Nárůst hodnot měrné absorbované energie i specific energy absorption byl s rostoucí relativní hustotou vrstev téměř lineární, s výjimkou struktur 45S, které vykazovaly spíše exponenciální nárůst (viz Obr. 5-14). V případě měrné absorbované energie byl tento nárůst strmější, než tomu bylo v případě specific energy absorption. Stejně tak byl nárůst strmější u struktur typu F2BCC_45 než u struktur typu F2BCC.









Obr. 5-14 Závislost absorbované energie na relativní hustotě

Porovnání výsledků s analytickými modely

Porovnání skutečných výsledků s analytickými modely dle Gibson a Ashby [1] bylo provedeno porovnáním koeficientů C_1 – rovnice (8) a C_5 – rovnice (9). Hodnota počátku densifikace dle rovnice (10) nemohla být porovnáвана, jelikož nedošlo k jejímu dosažení. Jako hodnota středního napětí v plateau stress oblasti σ_{pl} v rovnici (9) byla uvažována střední hodnota napětí pro rozmezí poměrné deformace 20 – 40 %, jak udává norma ISO 13314:2011 [10, 34]. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5-1.

Tab. 5-1 Porovnání skutečných hodnot s analytickými modely

Koeficient	Rozsah hodnot dle Gibson a Ashby	Hodnota pro testované struktury					
		 K	 P	 S	 45K	 45P	 45S
C_1	0,1 – 4,0	0,15	0,13	0,12	0,29	0,29	0,24
C_5	0,25 – 0,35	0,32	0,32	0,32	0,58	0,63	0,61

Koeficient C_1 určuje hodnotu relativního modulu pružnosti, který je definován modul pružnosti struktury normalizovaný Youngovým modulem základního materiálu. Jeho hodnoty se pro všechny konfigurace struktur pohybovaly na spodní hranici určené analytickým modelem. Struktury F2BCC_45 dosahovaly v porovnání se strukturami F2BCC přibližně dvojnásobných hodnot koeficientu, což je v souladu s vyššími hodnotami modulu pružnosti těchto typů struktur.

Koeficient C_5 určuje relativní mez kluzu, která je definována jako střední napětí v plateau stress oblasti normalizovaná smluvní mezí kluzu základního materiálu. Jeho hodnoty se pro struktury F2BCC pohybovaly na horní hranici dané analytickým modelem. Struktury F2BCC_45 pak tuto hodnotu vysoce převyšovaly. To bylo dáno vyššími hodnotami napětí, jichž tyto struktury dosahovaly oproti strukturám F2BCC.

6 DISKUZE

V následující kapitole budou zhodnoceny a diskutovány dosažené výsledky struktur z pohledu kvality výroby a následně výsledky tlakové zkoušky.

Vliv kvality výroby

Výsledky vážení struktur a měření průměrů prutů ukázaly, že v případě struktur typu F2BCC vykazovaly jejich skutečné hmotnosti i průměry prutů větší odchylky od nominálních hodnot, než tomu bylo v případě struktur typu F2BCC_45. To potvrzuje předpoklady vzniku nežádoucích jevů při výrobě – staircase efektu a natavování zrn prášku – popsanych v člancích [22–24]. Dle těchto předpokladů by struktury typu F2BCC měly vykazovat větší náchylnost ke vzniku těchto jevů, než struktury F2BCC_45, jejichž pruty svírají s podstavou větší úhel. V případě struktur F2BCC_45 byly jejich hmotnosti nižší než hmotnosti nominální, a to i přes větší průměry prutů než průměry nominální. Lze tedy předpokládat, že se zde projevil vliv pórovitosti prutů.

Vzniklé odchylky hmotností a rozměrů zapříčinily také mírné odchylky skutečné relativní hustoty od nominální hodnoty (viz Tab. 12-1). Tyto odchylky nebyly nijak značné, přesto však jejich vlivem mohlo dojít ke zkreslení některých výsledků.

Výsledky tlakové zkoušky

I přesto, že byly použity struktury typu bending-dominated, docházelo u struktur s konstantním průměrem prutů po dosažení špičkového napětí k jeho výraznému poklesu (viz Obr. 5-5). To nesplňuje předpoklad Ashbyho [1], dle kterého by u tohoto typu struktur k výraznému poklesu napětí dojít nemělo (viz Obr. 2-2). Chování struktur tak odpovídalo spíše strukturám typu stretching-dominated (viz Obr. 2-3). V případě struktur s proměnným průměrem prutů pak již napěťová charakteristika, tvořená několika špičkovými napětími odpovídala předpokladům, založených na výsledcích článků [10, 13–15].

Z porovnání struktur s konstantním a proměnným průměrem prutu je patrné, že v případě využití proměnného průměru prutu došlo k výraznému snížení počátečních napětí. To bylo dáno postupnou deformací jednotlivých vrstev od těch s nejmenším průměrem prutu (viz Obr. 12-1). Z toho je patrná určitá závislost pevnosti struktury na průměru prutu, respektive relativní hustotě, kdy s rostoucí relativní hustotou roste pevnost struktury.

Závislost pevnosti na relativní hustotě potvrzují i hodnoty modulu pružnosti (viz Obr. 5-9), které dosahovaly nejvyšších hodnot v případě struktur s konstantním průměrem prutu. Hodnoty modulu pružnosti byly určovány ze závislosti napětí na poměrné deformaci při malých deformacích. V této oblasti docházelo u struktur s proměnným průměrem prutu k deformaci vrstev o nejnižší relativní hustotě, kterým hodnota modulu pružnosti odpovídá.

Benefitem struktur s proměnným průměrem prutu byla eliminace nežádoucích deformací, způsobených smykovým napětím. Důsledkem těchto deformací je významné snížení pevnosti struktur [15]. K těmto deformacím docházelo pouze u struktur s konstantním průměrem prutu (viz Obr. 5-7, Obr. 12-1), což negativně ovlivnilo jejich pevnost.

Z průběhů napětí lze předpokládat, že pokud by došlo k deformaci struktur až do dosažení počátku oblasti densifikace, dosahovaly by struktury s proměnným průměrem prutu vyšší pevnosti než struktury s konstantním průměrem prutu. To je dáno vyššími hodnotami relativní hustoty spodních vrstev struktur s proměnným průměrem prutu. K deformaci těchto vrstev by však došlo až při působení větších nárazových energií. To potvrzují i dosažené hodnoty efektivity absorpce energie (viz Obr. 5-10), které u struktur s proměnným průměrem prutu dosahovaly nižších hodnot, z čehož plyne, že nebyl jejich potenciál vyčerpán do takové míry, jako v případě konstantního průměru prutu.

Do určitého stupně deformace lze, v omezeném rozsahu nárazových rychlostí, předpokládat, že hodnoty dosažených špičkových napětí zároveň nejsou závislé na velikosti působících energií, nýbrž pouze na typu struktury a její relativní hustotě. To potvrzují také výsledky testování struktur 45K, kdy pro první vzorek bylo použito závaží s hmotností o 2 kg nižší než pro ostatní vzorky, a přesto bylo dosaženo podobné hodnoty špičkového napětí. Z toho plyne, že i při působení energií malých hodnot dojde u struktur s konstantním průměrem prutu k dosažení vyšší hodnoty napětí, a tedy většímu rázu než u struktur s proměnným průměrem prutu, jejichž první deformované vrstvy by měly nižší relativní hustotu.

Při srovnání napěťových charakteristik struktur s plynulou a skokovou změnou průměru prutu je dále patrné, že dosažené hodnoty špičkových napětí, odpovídající kolapsu jednotlivých vrstev, jsou srovnatelné. Zároveň zde byly v případě skokové změny průměru patrné náznaky plateau stress oblastí mezi jednotlivými špičkami napětí (viz Obr. 5-5). To bylo způsobeno konstantním průměrem prutu v rámci jednotlivých vrstev struktur. Deformace struktur s plynulou změnou průměru prutu tak byla více plynulá než v případě skokové změny průměru prutu.

Výrazný vliv na deformační charakteristiku struktur mělo využití houževnatého materiálu. Zde oproti výsledkům autorů [10, 13], kteří testovali struktury z křehkého materiálu, nedocházelo k tak výrazným poklesům napětí při kolapsu vrstev. V případě struktur s konstantním průměrem prutu také došlo ke znatelné eliminaci porušení prutů, než tomu bylo u těchto autorů.

Výpočtem měrných absorbovaných energií a specific energy absorption bylo zjištěno, že struktury s konstantním a plynule i skokově proměnným průměrem prutu dosahovaly srovnatelných hodnot (viz Tab. 12-2). Tyto výsledky tak neodpovídaly předpokladům, vycházejícím z výsledků autorů [10, 11, 13–15], dle kterých by struktury s proměnným objemovým podílem měly absorbovat větší množství energie. Dosažené hodnoty však mohly být zkresleny výpočtem pouze do hodnoty poměrné deformace 50 %. Ze závislosti napětí na poměrné deformaci je patrné, že v případě struktur s proměnným průměrem prutu došlo k úplné deformaci pouze tří vrstev a částečné deformaci čtvrté vrstvy, která tak stále vykazovala potenciál pro absorpci většího množství energie. Pokud by tedy byly hodnoty absorbovaných energií počítány po vyšší hodnotu poměrné deformace, struktury s proměnným průměrem prutu by pravděpodobně dosáhly vyšších hodnot.

Pro struktury s proměnným průměrem prutu bylo dále vyhodnocováno množství absorbované energie vztažené na jednotlivé vrstvy. Z Obr. 5-13 je patrné, že s rostoucí relativní hustotou vrstev rostlo také množství absorbované energie. Všechny struktury vykazovaly lineární trend tohoto růstu, pouze v případě struktur typu F2BCC_45 se skokovou změnou průměru prutu byl trend spíše exponenciální. V tomto srovnání však byly využity nominální hodnoty relativních hustot vrstev, které nemusely přesně odpovídat skutečným hodnotám. Hodnoty byly počítány pouze pro tři vrstvy, u nichž došlo k jejich úplné deformaci. Pro lepší určení trendu závislosti by bylo žádoucí provedení dalšího testování a výpočtů pro větší množství vrstev.

Srovnání struktur typu F2BCC_45 a F2BCC přineslo důležité poznatky o vlivu geometrického uspořádání prutů. Přesto, že jsou oba typy tvořeny stejným typem elementární buňky, dosahovaly struktury F2BCC_45 ve všech vyhodnocovaných parametrech vyšších hodnot než struktury F2BCC. To jasně vypovídá o velkém vlivu geometrického uspořádání prutů, kdy i malá změna orientace elementární buňky rapidně zvyšuje pevnost struktur. Velký vliv zde zřejmě tvořila orientace prutů, kdy pruty struktury F2BCC_45 svíraly s podstavou větší úhel. Z tohoto důvodu zde nejspíše docházelo k výskytu menších ohybových momentů, a tedy nižšímu napětí v prutech. Jelikož struktury typu F2BCC měly vyšší skutečnou relativní hustotu, lze se domnívat, že v případě stejných relativních hustot by rozdíly mezi strukturami byli ještě markantnější. Ze srovnání těchto dvou typů struktur také plyne jejich praktická využitelnost. V případě struktur typu F2BCC budou vznikat menší rázy, ale budou schopny absorbovat menší množství energie než struktury F2BCC_45.

Použitelnost analytických modelů

Analytické modely pro určení základních parametrů mikro-prutových struktur dané rovnicemi (8) a (9) byly se skutečnými výsledky porovnávány srovnáním koeficientů C_1 , respektive C_5 , pro něž Gibson a Ashby určili intervaly hodnot, jichž mohou dosahovat [1].

Hodnoty koeficientu C_1 , udávajícího relativní modul pružnosti, se pro oba typy struktur pohybovaly na spodní hranici intervalu určeného autory [1]. Struktury typu F2BCC_45 zároveň dosahovaly přibližně dvojnásobných hodnot koeficientu oproti strukturám F2BCC. To, s uvažováním vlivu nestejných relativních hustot, přibližně odpovídalo rozdílům hodnot modulu pružnosti jednotlivých struktur (viz Obr. 5-9).

Hodnoty koeficientu C_1 pro struktury F2BCC přibližně odpovídaly hodnotám zjištěným v článku [13], kde byly testovány struktury s elementární buňkou typu BCC z křehkého materiálu – slitiny hliníku. Z tohoto srovnání plyne, že hodnota relativního modulu pružnosti závisí především na geometrickém uspořádání a relativní hustotě struktur. Materiál struktur má vliv na celkové hodnoty modulu pružnosti, na hodnotu relativního modulu však již méně.

Hodnoty koeficientu C_5 se pohybují nad horní hranicí daného intervalu. Struktury typu F2BCC_45 zde opět dosahovaly oproti strukturám F2BCC přibližně dvojnásobných hodnot, což přibližně odpovídalo rozdílům dosažených napětí mezi jednotlivými typy struktur.

V případě struktur F2BCC_45 hodnoty koeficientu přibližně odpovídaly hodnotám zjištěným autory [10], kteří testovali struktury stejného typu z křehkého materiálu – slitiny hliníku. I v tomto případě lze konstatovat, že hodnota relativní meze kluzu struktur závisí především na geometrickém uspořádání a relativní hustotě struktur. Materiál má opět vliv na celkové hodnoty napětí, ale hodnotu relativního napětí ovlivňuje méně významně.

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo porovnání schopnosti absorpce energie alespoň dvou různých konfigurací mikro-prutových struktur s proměnným průměrem prutu vyrobených z materiálu 316L metodou SLM.

Za tímto účelem byly zvoleny dva typy mikro-prutových struktur založené na elementárních buňkách typu F2BCC, přičemž v prvním případě byly elementární buňky orientovány konvenčním způsobem a ve druhém případě byly pootočený o 45 % (viz Obr. 4-2). Pro oba typy byly následně navrženy tři konfigurace, a to s konstantním průměrem prutu, s plynule proměnným průměrem prutu a se skokově proměnným průměrem prutu po jednotlivých vrstvách. Pro možnost vzájemného porovnání byly všechny konfigurace navrženy se stejnou relativní hustotou a tvořilo je $5 \times 5 \times 5$ elementárních buněk.

Testovací vzorky byly následně vyrobeny technologií SLM. Pro každou konfiguraci bylo vyrobeno 5 vzorků. Vzorky byly vyrobené v dobré kvalitě a bez poškození, jedinou zjištěnou imperfekcí byly z pravidla větší průměry prutů, než bylo navrženo.

Následně byly vzorky podrobeny pádovému testu (viz Obr. 4-6), jehož výstupem byla závislost působící síly na deformaci. Z této závislosti byly následně dopočítány závislosti napětí na poměrné deformaci a z nich poté účinnosti absorpce energie v závislosti na poměrné deformaci a hodnoty měrné absorbované energie a specific energy absorption. Analýzou snímků z vysokorychlostní kamery byly vyhodnocovány také průběhy deformačních mechanismů jednotlivých struktur. Výsledky byly následně porovnány s analytickými modely (rovnice (8) a (9)).

Během pádového testu nebylo dosaženo oblasti densifikace a hodnoty absorbované energie byly tedy vyhodnocovány pro hodnotu poměrné deformace $\varepsilon = 50 \%$.

Z hlediska množství absorbované energie byly zjištěné výsledky následující:

- Množství absorbované energie pro struktury s konstantním i proměnným průměrem prutu bylo přibližně srovnatelné. V případě struktur typu F2BCC byly rozdíly menší než 0,5 %. Rozdíly struktur typu F2BCC_45 se pak pohybovaly do 7,5 % ve prospěch struktur s plynulou změnou průměru prutu.
- Znatelně větší množství měrné absorbované energie (W) i specific energy absorption (SEA) bylo pozorováno v případě struktur F2BCC_45. Oproti strukturám F2BCC byl nárůst následující:

○ Konstantní průměr prutu:	W – 55,4 %	SEA – 63,6 %
○ Plynule proměnný průměr prutu:	W – 54,4 %	SEA – 73,5 %
○ Skokově proměnný průměr prutu	W – 43,5 %	SEA – 67 %

Zde se tedy nepotvrdil předpoklad, dle kterého by struktury s proměnným objemovým podílem měly mít lepší schopnost absorpce energie než struktury s konstantním průměrem prutu.

Z hlediska deformačních mechanismů bylo zjištěno toto chování:

- Výskyt deformací prutů způsobených smykovým napětím, a to výhradně u struktur s konstantním průměrem prutu.
- Postupná deformace vrstev v případě struktur s proměnným průměrem prutu, a tedy výrazné snížení počátečních rázů oproti strukturám stejného typu s konstantním průměrem prutu. Procentuální snížení počátečních rázů bylo následující:
 - F2BCC s plynulou změnou průměru o 42 %
 - F2BCC se skokovou změnou průměru o 38 %
 - F2BCC_45 s plynulou změnou průměru o 48 %
 - F2BCC_45 se skokovou změnou průměru o 54 %

K deformacím způsobeným smykovým napětím v případě struktur s konstantním průměrem prutu nedocházelo u všech testovaných vzorků (viz Obr. 5-7). Jejich deformační mechanismus se tak může lišit a obecně jej nelze přesně predikovat. Naopak v případě struktur s proměnným průměrem prutu byl deformační mechanismus u všech vzorků téměř stejný a lze tedy předpokládat, že predikce bude spolehlivější.

Z celkového srovnání výsledků tedy vyplývá, že hlavním benefitem struktur s proměnným průměrem prutu není nutně lepší schopnost absorpce energie, ale především výrazné snížení počátečních rázů a možnost využití pro širší spektrum působících energií. Jelikož velikost špičkového napětí není závislá na množství působící energie, lze hodnoty počátečních rázů snižovat využitím nižší relativní hustoty, a to až po limity výrobní metody. Především snížení rázů, a tedy i přetížení, působícího na posádku, je velmi důležitým aspektem z hlediska bezpečnosti a činí mikro-prutové struktury perspektivní pro využití jako součást prvků pasivní bezpečnosti a v aplikacích uvažujících absorpci energie.

S ohledem na zadání práce lze všechny cíle práce považovat za splněné.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ASHBY, M. F. The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2006, **364**(1838), 15–30. ISSN 1364503X. Dostupné z: doi:10.1098/rsta.2005.1678
- [2] SEHARING, Asliah, Abdul Hadi AZMAN a Shahrum ABDULLAH. *A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts* [online]. B.m.: SAGE Publications Inc. 1. červen 2020. ISSN 16878140. Dostupné z: doi:10.1177/1687814020916951
- [3] MCKOWN, S., Y. SHEN, W. K. BROOKES, C. J. SUTCLIFFE, W. J. CANTWELL, G. S. LANGDON, G. N. NURICK a M. D. THEOBALD. The quasi-static and blast loading response of lattice structures. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2008, **35**(8), 795–810 [vid. 2023-02-22]. ISSN 0734-743X. Dostupné z: doi:10.1016/J.IJIMPENG.2007.10.005
- [4] ZHANG, Lei, Stefanie FEIH, Stephen DAYNES, Shuai CHANG, Michael Yu WANG, Jun WEI a Wen Feng LU. Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **23**, 505–515. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.08.007
- [5] ZHANG, Wei Ming, Zhen Yu LI, Jin Shui YANG, Li MA, Zhuang LIN, Rüdiger SCHMIDT a Kai Uwe SCHRÖDER. A lightweight rotationally arranged auxetic structure with excellent energy absorption performance. *Mechanics of Materials* [online]. 2022, **166**. ISSN 01676636. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechmat.2022.104244
- [6] HOLMAN, Heather, Minoo Naozer KAVARANA a Taufiek Konrad RAJAB. *Smart materials in cardiovascular implants: Shape memory alloys and shape memory polymers* [online]. B.m.: John Wiley and Sons Inc. 1. květen 2021. ISSN 15251594. Dostupné z: doi:10.1111/aor.13851
- [7] MALONEY, Kevin J., Kathryn D. FINK, Tobias A. SCHAEGLER, Joanna A. KOLODZIEJSKA, Alan J. JACOBSEN a Christopher S. ROPER. Multifunctional heat exchangers derived from three-dimensional micro-lattice structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2012, **55**(9–10), 2486–2493 [vid. 2023-05-17]. ISSN 0017-9310. Dostupné z: doi:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2012.01.011

- [8] SAKSHIKOKIL-SHAH, Anirban SUR, Sanjay DARVEKAR a Mohanish SHAH. *Recent Advancements of Micro-Lattice Structures: Application, Manufacturing Methods, Mechanical Properties, Topologies and Challenges* [online]. B.m.: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. 1. prosinec 2021. ISSN 21914281. Dostupné z: doi:10.1007/s13369-021-05992-y
- [9] GIBSON, Lorna J. a Michael F. ASHBY. *Cellular Solids: Structure and Properties* [online]. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. ISBN 9781139878326. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781139878326
- [10] AL-SAEDI, Dheyaa S.J., S. H. MASOOD, Muhammad FAIZAN-UR-RAB, Amer ALOMARAH a P. PONNUSAMY. Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM. *Materials and Design* [online]. 2018, **144**, 32–44. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.01.059
- [11] 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
- [12] KHOSROSHAHI, S. Farajzadeh, S. A. TSAMPAS a U. GALVANETTO. Feasibility study on the use of a hierarchical lattice architecture for helmet liners. *Materials Today Communications* [online]. 2018, **14**, 312–323. ISSN 23524928. Dostupné z: doi:10.1016/j.mtcomm.2018.02.002
- [13] MASKERY, I., N. T. ABOULKHAIR, A. O. AREMU, C. J. TUCK, I. A. ASHCROFT, R. D. WILDMAN a R. J.M. HAGUE. A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2016, **670**, 264–274 [vid. 2023-02-20]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/J.MSEA.2016.06.013
- [14] RODRIGO, Chamini, Shanqing XU, Yvonne DURANDET, Darren FRASER a Dong RUAN. Quasi-static and dynamic compression of additively manufactured functionally graded lattices: Experiments and simulations. *Engineering Structures* [online]. 2023, **284**, 115909 [vid. 2023-03-28]. ISSN 0141-0296. Dostupné z: doi:10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.115909
- [15] YU, Shixiang, Jinxing SUN a Jiaming BAI. Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing. *Materials & Design* [online]. 2019, **182**, 108021 [vid. 2023-04-01]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATDES.2019.108021

- [16] HA, Ngoc San a Guoxing LU. *Thin-walled corrugated structures: A review of crashworthiness designs and energy absorption characteristics* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 1. prosinec 2020. ISSN 02638231. Dostupné z: doi:10.1016/j.tws.2020.106995
- [17] 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 [vid. 2023-03-06]. ISSN 0734-743X. Dostupné z: doi:10.1016/J.IJIMPENG.2017.02.007
- [18] LI, Q. M., I. MAGKIRIADIS a J. J. HARRIGAN. Compressive strain at the onset of densification of cellular solids. *Journal of Cellular Plastics* [online]. 2006, **42**(5), 371–392 [vid. 2023-03-06]. ISSN 0021955X. Dostupné z: doi:10.1177/0021955X06063519
- [19] CRUPI, Vincenzo, Emre KARA, Gabriella EPASTO, Eugenio GUGLIELMINO a Halil AYKUL. Static behavior of lattice structures produced via direct metal laser sintering technology. *Materials & Design* [online]. 2017, **135**, 246–256 [vid. 2023-05-18]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATDES.2017.09.003
- [20] 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 [vid. 2023-05-18]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:10.1016/J.ACTAMAT.2016.05.054
- [21] WANG, Peng, Yijie BIAN, Fan YANG, Hualin FAN a Bailin ZHENG. Mechanical properties and energy absorption of FCC lattice structures with different orientation angles. *Acta Mechanica* [online]. 2020, **231**(8), 3129–3144. ISSN 16196937. Dostupné z: doi:10.1007/s00707-020-02710-x
- [22] CALIGNANO, F. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. *Materials & Design* [online]. 2014, **64**, 203–213 [vid. 2023-02-28]. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATDES.2014.07.043
- [23] CABANETTES, F., A. JOUBERT, G. CHARDON, V. DUMAS, J. RECH, C. GROSJEAN a Z. DIMKOVSKI. Topography of as built surfaces generated in metal additive manufacturing: A multi scale analysis from form to roughness. *Precision Engineering* [online]. 2018, **52**, 249–265 [vid. 2023-02-22]. ISSN 0141-6359. Dostupné z: doi:10.1016/J.PRECISIONENG.2018.01.002

- [24] VRÁNA, Radek, Daniel KOUTNÝ, David PALOUŠEK, Libor PANTĚLEJEV, Jan JAROŠ, Tomáš ZIKMUND a Jozef KAISER. Selective laser melting strategy for fabrication of thin struts usable in lattice structures. *Materials* [online]. 2018, **11**(9). ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11091763
- [25] GROSSMANN, Alexander, Julian GOSMANN a Christian MITTELSTEDT. Lightweight lattice structures in selective laser melting: Design, fabrication and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2019, **766**, 138356 [vid. 2023-02-28]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/J.MSEA.2019.138356
- [26] QIU, Chunlei, Sheng YUE, Nicholas J.E. ADKINS, Mark WARD, Hany HASSANIN, Peter D. LEE, Philip J. WITHERS a Moataz M. ATTALLAH. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2015, **628**, 188–197 [vid. 2023-03-06]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/J.MSEA.2015.01.031
- [27] DOWNING, David, Martin LEARY, Matthew MCMILLAN, Ahmad ALGHAMDI a Milan BRANDT. Heat transfer in lattice structures during metal additive manufacturing: numerical exploration of temperature field evolution. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2020, **26**(5), 911–928 [vid. 2023-02-28]. ISSN 13552546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-11-2018-0288
- [28] KOBAN, Tomáš. *Porovnání mikro-prutových struktur pro absorpci energie*. Brno, 2018. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedúci bakalárskej práce Ing. Ondřej Červinek.
- [29] AHMED, Sazzad H. a Ahsan MIAN. Influence of material property variation on computationally calculated melt pool temperature during laser melting process. *Metals* [online]. 2019, **9**(4) [vid. 2023-03-11]. ISSN 20754701. Dostupné z: doi:10.3390/met9040456
- [30] SLM SOLUTIONS. *Material Data Sheet 316L* [online]. Lübeck: SLM Solutions Group AG. 2022. Dostupné z: <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/powders/>
- [31] THYSSENKRUPP. *Stainless Steel 316L - 1.4404 Data Sheet* [online]. West Midlands: thyssenkrupp Materials (UK) Ltd. 2017. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-316l-14404.html>

- [32] ČERVINEK, Ondřej, Benjamin WERNER, Daniel KOUTNÝ, Ondřej VAVERKA, Libor PANTĚLEJEV a David PALOUŠEK. Computational approaches of quasi-static compression loading of SS316L lattice structures made by selective laser melting. *Materials* [online]. 2021, **14**(9). ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14092462
- [33] VRÁNA, Radek. *Návrh porézních struktur pro aditivní výrobu technologií selective laser melting*. Brno, 2014. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
- [34] ISO 13314:2011. *Mechanical testing of metals — Ductility testing — Compression test for porous and cellular metals*. Geneva: British Standard Institution. 2011

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

SYMBOL	JEDNOTKA	VÝZNAM VELIČINY
M	-	Maxwellovo číslo
b	-	Počet prutů
j	-	Počet uzlů
ρ_{rel}	-	Relativní hustota
ρ^*	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Hustota struktury
m^*	kg	Hmotnost struktury
V^*	m^3	Objem prutů struktury
E^*	MPa	Modul pružnosti struktury
ρ_s	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Hustota plného materiálu
m_s	kg	Hmotnost plného materiálu
V_s	m^3	Objem struktury
E_s	GPa	Youngův modul pružnosti materiálu
$R_{p0,2}$	MPa	Smluvní mez kluzu materiálu
W	$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$	Měrná absorbovaná energie
$W_{\varepsilon=0,5}$	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$	Měrná absorbovaná energie pro $\varepsilon = 50 \%$
W_{vrstva}	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$	Měrná absorbovaná energie vztažená na vrstvu
SEA	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	Specific energy absorption
$SEA_{\varepsilon=0,5}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Specific energy absorption pro $\varepsilon = 50 \%$
SEA_{vrstva}	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Specific energy absorption vztažená na vrstvu
η	-	Efektivita absorpce energie
$\eta(\varepsilon)$	-	Okamžitá efektivita absorpce energie
σ	MPa	Nominální napětí
$\sigma(\varepsilon)$	MPa	Okamžité napětí
σ_{pl}	MPa	Střední napětí v plateau stress oblasti

ε	-	Poměrná deformace
ε_d	-	Počátek oblasti densifikace
F	N	Zatěžující síla
a	mm	Délka hrany struktury
b	mm	Délka hrany struktury
h	mm	Výška struktury
d	μm	Průměr prutu
S	mm^2	Plocha podstavy struktury
α	$^\circ$	Úhel sklonu prutu od podstavy

ZKRATKA	VÝZNAM ZKRATKY
SLM	Selective laser melting
3D	Trojrozměrný
CAD	Computer aided design
TPMS	Triply periodic minimal surface
BCC	Body centered cubic
BCCZ	Body centered cubic s pruty ve směru z
FCC	Face centered cubic
FCCZ	Face centered cubic s pruty ve směru z
FBCCZ	Kombinace FCC a BCC s pruty ve směru z
F2BCC	Kombinace dvou FCC a BCC
AFCC	All-face centered cubic
EC	Edge centered

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	Přehled základních typů mikro-prutových struktur, a) BCC, b) BCCZ, c) FCC, d) FCCZ, e) FBCCZ, f) F2BCC, g) AFCC, h) EC, i) Gyroid, j) Auxetická struktura [2].....	14
Obr. 2-2	Deformačně-napěťová charakteristika struktur typu bending-dominated [1]	16
Obr. 2-3	Deformačně-napěťová charakteristika struktur typu stretching-dominated [1]	16
Obr. 2-4	a) Struktura s plynulou změnou průměru prutů [10]; b) Struktura se skokovou změnou výšky elementární buňky [11]	17
Obr. 2-5	Elementární buňka typu F2BCC potočená o 45° [10]	18
Obr. 2-6	Proměnný průměr prutu; a) v jednom směru; b) ve dvou směrech [14]	19
Obr. 2-7	Schéma struktury nakloněné o úhel α [21].....	24
Obr. 2-8	a) Staircase efekt [23], b) Teplotní gradient [24]	25
Obr. 4-1	Schéma procesu výroby metodou Selective Laser Melting [29]	28
Obr. 4-2	CAD modely elementárních buněk (nahore) a mikro-prutových struktur (dole) s konstantním průměrem prutu; a) F2BCC; b) F2BCC_45	31
Obr. 4-3	Orientace elementárních buněk; a) F2BCC; b) F2BCC_45	31
Obr. 4-4	Relativní hustoty struktur	32
Obr. 4-5	Umístění struktur na výrobní platformě; Flow – směr proudění ochranné atmosféry; Rec – směr pohybu zásobníku s práškem	33
Obr. 4-6	Schéma testovacího zařízení	34
Obr. 5-1	Fotodokumentace struktur	35
Obr. 5-2	Detail struktur – 20x zvětšeno; a) vzorek P1; b) vzorek 45K1	36
Obr. 5-3	Analýza průřezu prutů – 8x zvětšeno – vzorek 45K1	37
Obr. 5-4	Procentuální odchylka relativních hustot a hmotností od hodnot CAD modelu	37
Obr. 5-5	Závislost napětí na deformaci	38
Obr. 5-6	Pásma deformace (vzorek K4)	39
Obr. 5-7	Rozdílná deformace struktur typu F2BCC s konstantním průměrem prutu .	40
Obr. 5-8	Hodnoty dosažených špičkových napětí.....	40
Obr. 5-9	Modul pružnosti struktur	41

Obr. 5-10	Efektivita absorpce energie.....	42
Obr. 5-11	Porovnání závislostí napětí a efektivity na poměrné deformaci (vzorek 45P4)	43
Obr. 5-12	Množství absorbované energie.....	44
Obr. 5-13	Absorbované energie vztažené na vrstvu.....	45
Obr. 5-14	Závislost absorbované energie na relativní hustotě.....	45
Obr. 12-1	Snímky deformací struktur.....	66

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1	Chemické složení prášku nerezové oceli 316L [32].....	29
Tab. 4-2	Legenda ke značení struktur	32
Tab. 5-1	Porovnání skutečných hodnot s analytickými modely.....	46
Tab. 12-1	Přehled parametrů jednotlivých struktur.....	65
Tab. 12-2	Hodnoty absorbované energie.....	67

12 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A – Přehled parametrů jednotlivých struktur

PŘÍLOHA B – Deformace struktur

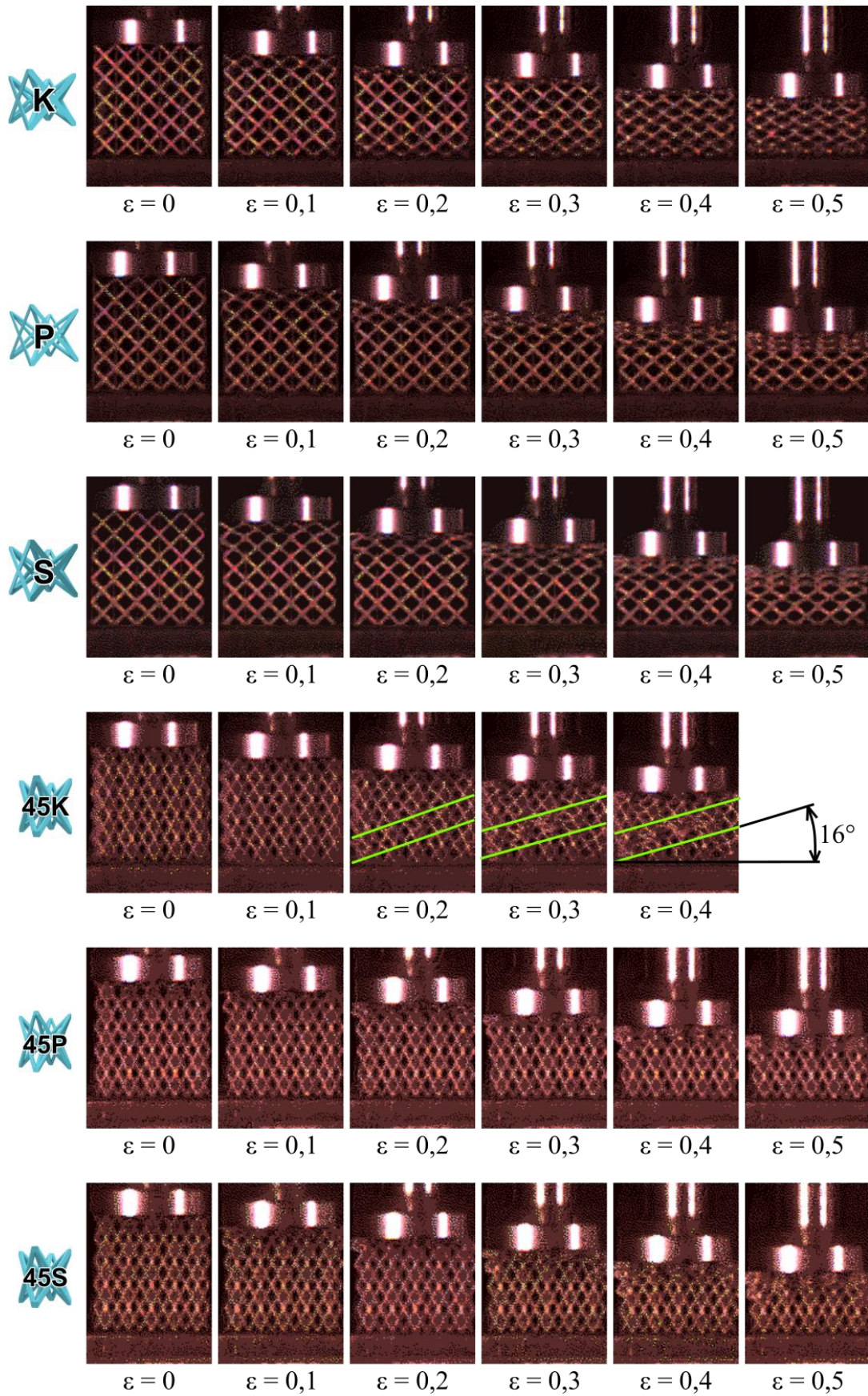
PŘÍLOHA C – Hodnoty absorbované energie

PŘÍLOHA A

Tab. 12-1 Přehled parametrů jednotlivých struktur

Struktura	Hmotnost		Rozměry			Relativní hustota			
	CAD model (g)	Skutečná (g)	a (mm)	b (mm)	h (mm)	CAD model (-)	Skutečná (-)		
 K		K1	12,150	25,15	25,09	25,00		0,098	
		K2	12,352	25,12	25,09	24,98		0,100	
		K3	11,914	12,517	25,16	25,10	25,00	0,097	0,101
		K4	12,456	25,14	25,13	25,01		0,101	
		K5	12,636	25,15	25,16	24,99		0,102	
 P		P1	12,883	25,14	25,14	24,99		0,104	
		P2	12,931	25,10	25,14	24,99		0,105	
		P3	11,915	12,625	25,16	25,16	25,01	0,097	0,102
		P4	12,744	25,14	25,14	25,00		0,103	
		P5	12,928	25,10	25,13	24,99		0,105	
 S		S1	12,942	25,16	25,16	25,00		0,105	
		S2	13,064	25,18	25,17	25,00		0,106	
		S3	11,912	13,081	25,18	25,14	25,01	0,097	0,106
		S4	13,058	25,13	25,12	25,00		0,106	
		S5	13,156	25,12	25,15	25,01		0,107	
 45K		45K1	11,799	25,18	25,16	24,99		0,096	
		45K2	11,688	25,14	25,11	24,99		0,095	
		45K3	11,928	11,802	25,18	25,17	25,01	0,097	0,096
		45K4	11,824	25,09	25,06	24,99		0,096	
		45K5	11,901	25,15	25,08	25,02		0,096	
 45P		45P1	11,353	25,14	25,07	25,01		0,092	
		45P2	11,442	25,05	25,10	25,01		0,093	
		45P3	11,928	11,451	25,16	25,09	25,01	0,097	0,093
		45P4	11,352	25,11	25,15	25,01		0,092	
		45P5	11,330	25,15	25,10	25,01		0,092	
 45S		45S1	11,227	25,08	25,18	25,01		0,091	
		45S2	11,186	25,16	25,10	25,00		0,091	
		45S3	11,922	11,054	25,16	25,13	25,01	0,097	0,090
		45S4	11,248	25,15	25,16	25,00		0,091	
		45S5	11,318	25,10	25,10	24,99		0,092	

PŘÍLOHA B



Obr. 12-1 Snímky deformací struktur

PŘÍLOHA C

Tab. 12-2 Hodnoty absorbované energie

Struktura	$W_{\epsilon=0,5}$ (MJ·m ⁻³)	$SEA_{\epsilon=0,5}$ (kJ·kg ⁻¹)	Struktura	$W_{\epsilon=0,5}$ (MJ·m ⁻³)	$SEA_{\epsilon=0,5}$ (kJ·kg ⁻¹)		
 K	K1	2,70	3,49	45K1	-	-	
	K2	2,54	3,21	45K2	4,25	5,66	
	K3	2,74	3,43	 45K	45K3	4,04	5,33
	K4	2,73	3,42		45K5	4,20	5,54
	K5	2,72	3,37		45K5	2,23	5,57
	\bar{x}	2,69	3,38	\bar{x}	4,18	5,53	
 P	P1	2,73	3,32	45P1	4,11	5,66	
	P2	2,74	3,31	45P2	4,24	5,78	
	P3	2,64	3,27	 45P	45P3	4,28	5,83
	P4	2,67	3,28		45P4	4,08	5,61
	P5	2,72	3,27		45P5	4,13	5,69
	\bar{x}	2,70	3,29	\bar{x}	4,17	5,71	
 S	S1	2,72	3,28	45S1	3,84	5,34	
	S2	2,70	3,22	45S2	3,89	5,41	
	S3	2,74	3,27	 45S	45S3	3,79	5,33
	S4	2,74	3,28		45S4	3,95	5,50
	S5	2,67	3,16		45S5	3,99	5,49
	\bar{x}	2,71	3,24	\bar{x}	3,89	5,41	