



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VLIV VÝŠKY VRSTVY NA KRITICKÝ ÚHEL ADITIVNĚ VYRÁBĚNÝCH MIKRO-PRUTOVÝCH STRUKTUR

EFFECT OF LAYER THICKNESS ON CRITICAL ANGLE OF ADDITIVELY MANUFACTURED LATTICE
STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Nosek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Vaverka

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Jakub Nosek
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Ondřej Vaverka
Akademický rok:	2018/19

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:

Vliv výšky vrstvy na kritický úhel aditivně vyráběných mikro–prutových struktur

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jednou z požadovaných vlastností mikro–prutových struktur je jejich samonosnost, což znamená, že je lze vyrobit bez podpůrných struktur. Minimální úhel, který pro to musí svírat prut s podložkou, se nazývá kritický. Čím je nižší, tím má konstruktér větší volnost při navrhování geometrie mikro–prutové struktury. Jedním z faktorů, který může hodnotu kritického úhlu snížit, je výška nanášené vrstvy prášku.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je popsání vlivu výšky nanášené vrstvy na vlastnosti mikro–prutových struktur.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešerše výroby mikro–prutových struktur,
- návrh experimentů a zkušebních těles,
- výroba a digitalizace zkušebních těles,
- vyhodnocení vlivu výšky vrstvy.

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

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

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

KESSLER, J. et al. Basic design rules of unit cells for additive manufactured lattice structures. MATEC Web of Conferences. Les Ulis: EDP Sciences, 2017, 137. ISSN 22747214.

SING, S. L., WIRIA F. E., YEONG W. Y. Selective laser melting of lattice structures: A statistical approach to manufacturability and mechanical behavior. Robotics and Computer Integrated Manufacturing. Elsevier, 2018, 49, 170-180. ISSN 0736-5845.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této práce je popsání vlivu výšky vrstvy na kritický úhel mikro-prutových struktur vyrobených technologií SLM. Vliv výšky vrstvy je zkoumán jak na samostatných prutech, tak i na celých mikro-prutových strukturách vyrobených z nerezového materiálu 316L. Při použití nižší výšky vrstvy lze dosáhnout lepší rozměrové přesnosti. U mikro-prutových struktur se zmenšilo množství nalepeného prášku ze spodní strany. Díky této práci je možné rozhodnout, zda má smysl snižovat výšku vrstvy za účelem zlepšení vyrobiteľnosti mikro-prutových struktur i za cenu prodloužení výrobního času

KLÍČOVÁ SLOVA

SLM, výška vrstvy, pruty, 316L, mikro-prutové struktury

ABSTRACT

Aim of this work is to describe the effect of a layer thickness on critical angle of a lattice structures manufactured by SLM technology. The effect of layer thickness was investigated on single struts and on lattice structures made from stainless steel 316L. Better geometrical accuracy could be obtained, if the smaller layer thickness is used. Less attached powder particles on downskins was also observed on lattice structures. Thanks to this thesis, it is possible to determine, if it is meaningful to decrease the layer thickness in order to improve manufacturability of lattice structures even with higher manufacturing time.

KEYWORDS

SLM, layer thickness, strut, 316L, lattice structure

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOSEK, Jakub. *Vliv výšky vrstvy na kritický úhel aditivně vyráběných mikro-prutových struktur*. Brno, 2019, 45 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vaverka.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Ondřeji Vaverkovi za vedení a cenné rady. Také bych chtěl poděkovat své rodině, která mě po celou dobu studia podporovala. Závěrem bych chtěl poděkovat i firmě Liturella z.s.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Ondřeje Vaverky. 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	12
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
2.1	Pruty	13
2.2	Mikro-prutové struktury.	16
2.3	Výška vrstvy	21
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	22
3.1	Analýza problému	22
3.2	Cíl práce	23
4	MATERIÁL A METODY	24
4.1	Příprava a výroba zkušebních těles.	24
4.1.1	Pruty	24
4.1.2	Mikro-prutové struktury	27
4.2	Metody vyhodnocení vzorků	28
4.2.1	Pruty	28
4.2.2	Mikro-prutové struktury.	29
5	VÝSLEDKY	30
5.1	Pruty	30
5.2	Mikro-prutové struktury	35
6	DISKUZE	37
7	ZÁVĚR	39
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	42
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	43
11	SEZNAM TABULEK	45

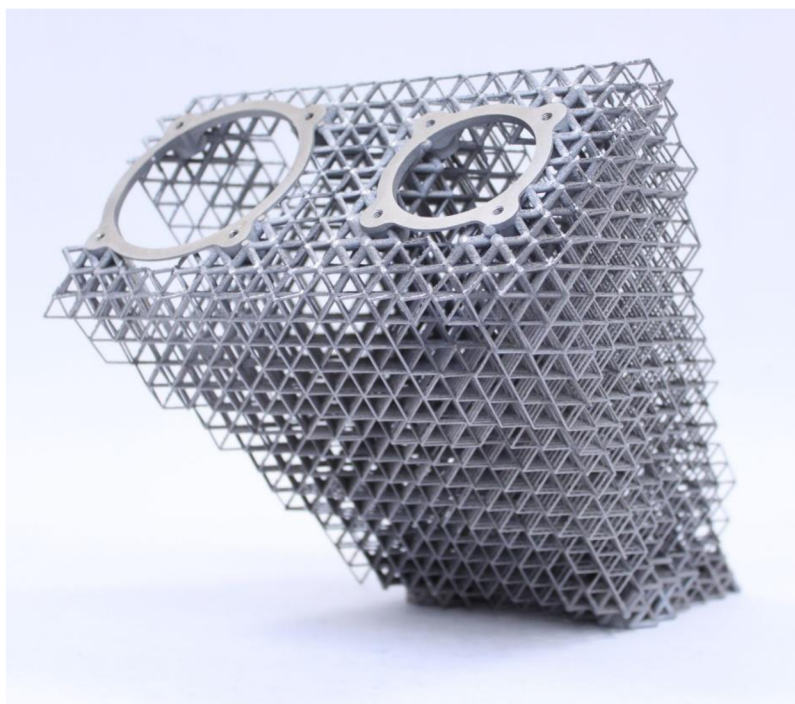
1 ÚVOD

V současné době se aditivní technologie stávají čím dál více rozšířenými. Je to nekonvenční metoda výroby, která pro vytvoření dílů využívá postupného přidávání materiálu. Díky aditivním technologiím je možné vyrábět prototypy velice rychle. Dnes se tyto technologie nepoužívají pouze na výrobu prototypů, ale i například k výrobě speciálně tvarovaných, či topologicky optimalizovaných dílů, které by byly konvenčními metodami nevyrobitelné.

Aditivní technologie mohou být využity například v kosmonautice, díky možnosti snížení hmotnosti vyrobených dílů náhradou plného materiálu za takzvanou mikro-prutovou strukturu. Takové struktury jsou vyrobeny z tenkých prutů, které společně tvoří příhradovou konstrukci.

Jednou z mnoha aditivních technologií je Selective laser melting (SLM), která pro výrobu dílů využívá spékání kovového prášku laserem. Vliv na kvalitu a přesnost vyrobených dílů mají procesní parametry. Mezi hlavní procesní parametry patří výkon laseru, výška vrstvy, vzdálenost jednotlivých drah laseru a skenovací rychlost

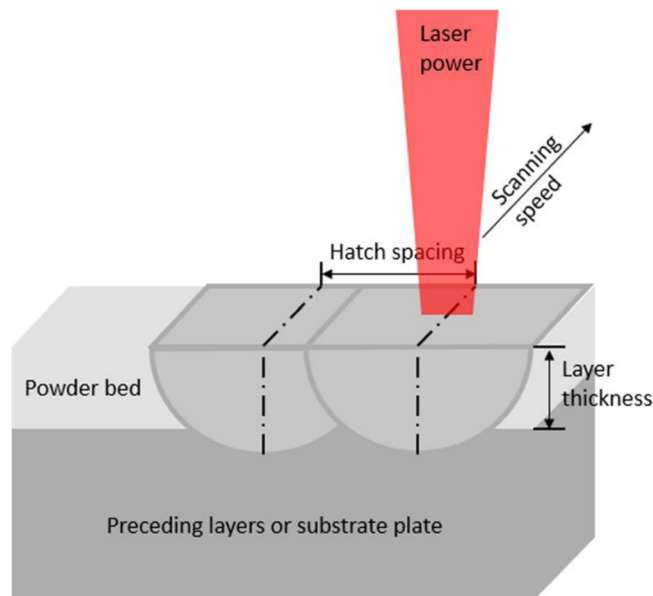
Existuje mnoho vědeckých článků, které se zabývají vlivy jednotlivých procesních parametrů na vyrobitelnost a vlastnosti mikro-prutových struktur. Žádný výzkum však nezkoumá přímý vliv výšky vrstvy na vyrobitelnost prutů při různých úhlech, či na vyrobitelnost a vlastnosti mikro-prutových struktur.



obr. 1-1 Konzole satelitu z mikro-prutové struktury. [1]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Technologie SLM je aditivní technologie, která využívá spékání kovového prášku. Touto technologií je možné vyrábět jak prototypy, tak finální výrobky, které mají potenciální využití například v kosmonautice. Aby se díl správně vyrobil, je nutné zvolit vhodné procesní parametry. Mezi hlavní parametry patří výkon laseru, skenovací rychlost, vzdálenost mezi jednotlivými dráhami laseru a výška vrstvy.



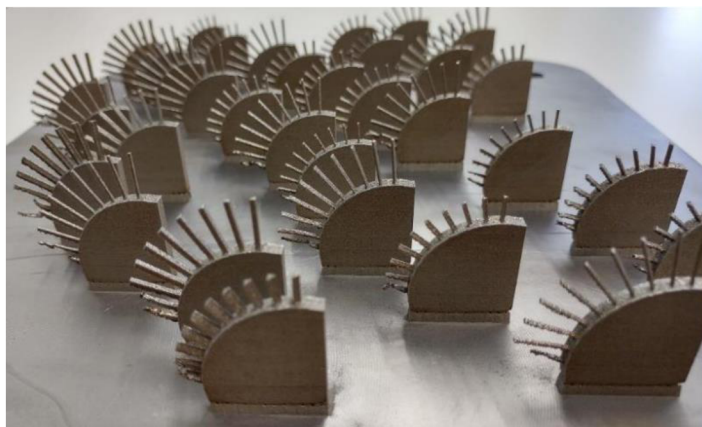
obr. 2-1 Přehled jednotlivých procesních parametrů pro SLM technologii: výkon laseru (laser power), výška vrstvy (layer thickness), skenovací rychlost (scanning speed), vzdálenost mezi jednotlivými návary (hatch distance). [2]

2.1 Pruty

Kessler et al. [3] zkoumali, jaký je minimální průměr prutu, při kterém se prut vyrobí bez deformací. Jejich zkušební pruty byly vyráběny z materiálu 316L. Kromě velikosti příčného průřezu zjišťovali, zda má na vyrobiteľnost prutu vliv i tvar příčného průřezu. Zjistili, že pruty kruhového průřezu se dají vyrobiť od nominálního průměru 0,15 mm. Skutečný průměr těchto prutů byl však o 25 % větší než nominální. Od nominálního průměru 0,35 mm se pruty vyráběly se zápornou úchytkou. Vyrobené pruty byly tedy menší, než bylo požadováno.

Nekruhové příčné průřezy měly podobné výsledky. Skutečné rozměry prutů s eliptickým, kosočtverečným i trojúhelníkovým průřezem dosahovaly menších rozměrů než nominálních. U čtvercového průřezu však tento jev nebyl pozorován a vyrobené pruty měly příčný průřez větší než nominální.

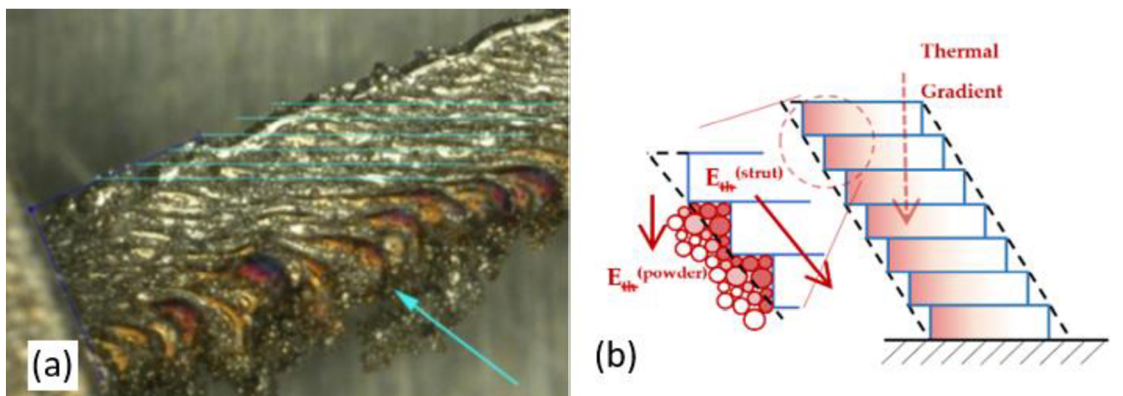
Na základě těchto výsledků udělala Kessler a její kolegové další studii [4], která zkoumala vliv úhlu, který svírá prut s podložkou. Jejich zkušební vzorky byly pruty s obsahem příčného průřezu $0,4 \text{ mm}^2$, $0,7 \text{ mm}^2$ a 1 mm^2 . Jednotlivé sady vzorků se lišily i geometrií. Byly použity kruhové, eliptické, čtvercové, kosočtverečné a trojúhelníkové průřezy prutů.



obr. 2-2 Zkušební vzorky, které použila Kessler a kolegové v jejich výzkumu. [3]

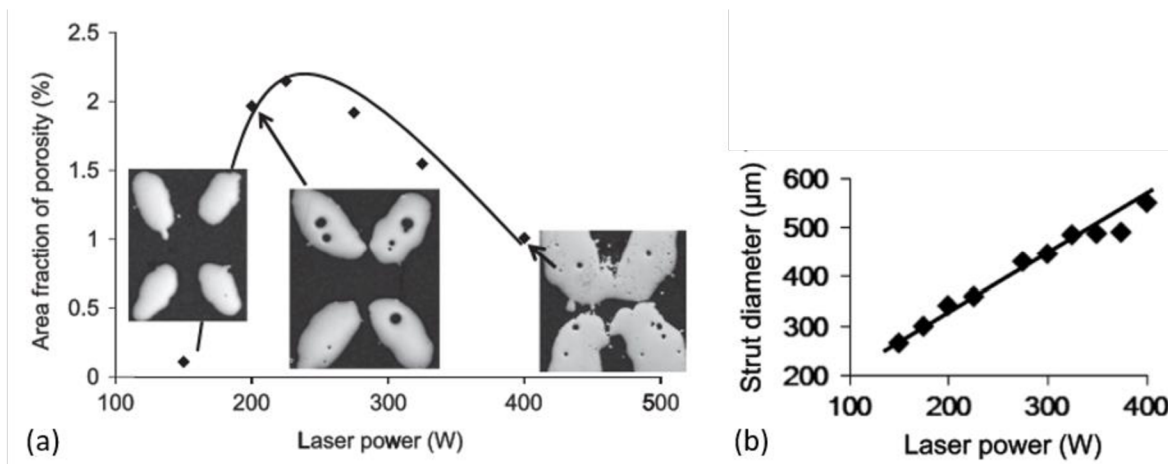
Jejich vzorky byly stavěny s výkonem laseru 180 W, skenovací rychlostí 1450 m/s pro kontury a 1000 mm/s pro vnitřní plochy. Všechny vzorky byly stavěny s výškou vrstvy $45 \text{ }\mu\text{m}$. Zjistili, že tvar příčného průřezu výrazně neovlivňuje vyrobitelnost prutů svírajících s podložkou větší úhly. Všechny pruty svírající s podložkou menší úhel jak 20° nebyly vyrobeny. Z výsledků také vyplynulo, že prut trojúhelníkového, nebo eliptického průřezu dosahuje lepší kvality při menších úhlech (20° – 40°) než ostatní průřezy. Autoři si myslí, že by to mohlo být způsobeno změnou teplotního gradientu v průběhu stavby vlivem geometrie prutu.

Pro pruty svírající menší úhly s podložkou je charakteristický nalepený prášek ze spodní strany. Teplotní tok přehřívá okolní částice prášku, které mají s prutem pouze bodový kontakt, částečně je nataví a ty zůstanou na prut navařeny. Tento jev zvyšuje drsnost povrchu prutu a zhoršuje jeho rozměrovou přesnost. [5]



obr. 2-3 (a) Prut se stopami po svařování a nalepeným práškem ze spodní strany [4]; (b) schéma tepelného přenosu při tisku. [5]

Qui et al. [6] zkoumali vlivy procesních parametrů na pruty, které jsou součástí mikroprutové struktury. Pro jejich stavby použili hliníkový materiál AlSi10Mg, který je rozdílný od nerezového materiálu 316L použitého v této práci, ale dá se předpokládat podobný vliv procesních parametrů na nerezové pruty. Zjistili, že při konstantní skenovací rychlosti má výkon laseru téměř lineární vliv na velikost prutu. Čím byl výkon laseru vyšší, tím byl i průměr prutu vyšší. Kromě toho se s rostoucím výkonem laseru zvyšovalo i množství nalepeného prášku na prutu. Dále zjistili, že výkon laseru ovlivnil i porozitu, závislost však nebyla lineární.

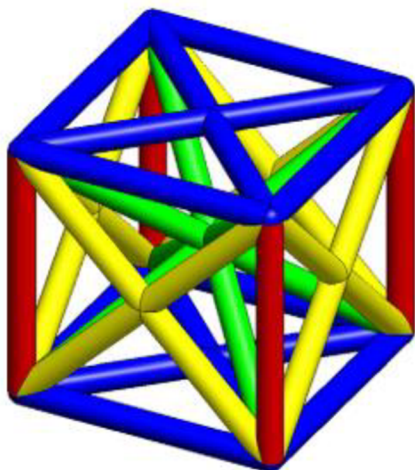


obr. 2-4 (a) Graf závislost porozity na výkonu laseru při konstantní skenovací rychlosti doplněný o snímky z mikroskopu; (b) graf závislosti průměru prutu na výkonu laseru. [6]

Ve druhé sérii pokusů zkoumali vliv skenovací rychlosti na vyrobitelnost prutů. Při konstantním výkonu laseru neměla skenovací rychlost zásadní vliv na kvalitu prutů. Až při nízkých skenovacích rychlostech docházelo ke zvětšování průměru prutů.

2.2 Mikro-prutové struktury.

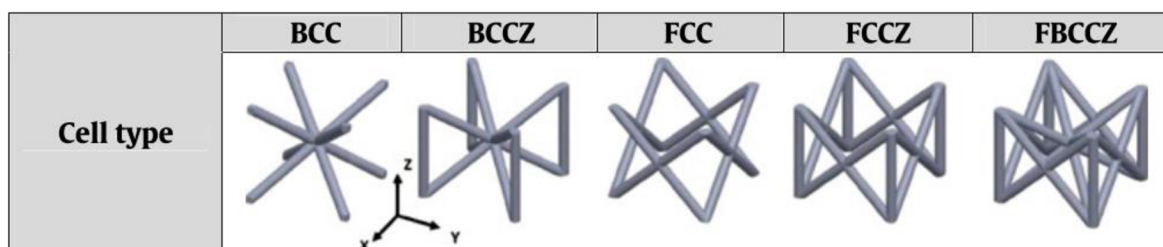
Leary et al.[7] zkoumali vyrobiteľnosť základných mikro-prutových struktur a jejich mechanické vlastnosti. Předmětem jejich zkoumání byly struktury s krychlovými základními buňkami. Pro každý typ buňky se lišil minimální úhel, který svíral prut s podložkou. Jejich zkušební vzorky byly vytvářeny z materiálu AlSi12Mg při nastaveném výkonu laseru 350 W a výškou vrstvy 50 μm .



obr. 2-5 Rozdílné sklony prutů pro jednotlivé typy krychlových elementárních buněk. Modré 0° , zelené $35,3^\circ$, žluté 45° , červené 90° . [7]

Nejprve ověřili vyrobiteľnosť jednotlivých prutů se sklony podle **obr. 2-5** za použití různých průměrů. Zjistili, že není možné vyrábět pruty rovnoběžné s podložkou. Rozhodli se pruty rovnoběžné s podložkou odstranit z modelů a průměr prutů zvolili 1 mm vzhledem k jejich dobré vyrobiteľnosti.

Jakmile Leary et al. ověřili vyrobiteľnosť jednotlivých prutů, navrhli 5 zkušebních mikro-prutových struktur, které následně podrobili mechanickým testům. Všechny 5 navržených struktur bylo úspěšně vyrobeno. Na **obr.2-6** můžeme vidět použité zkušební struktury.



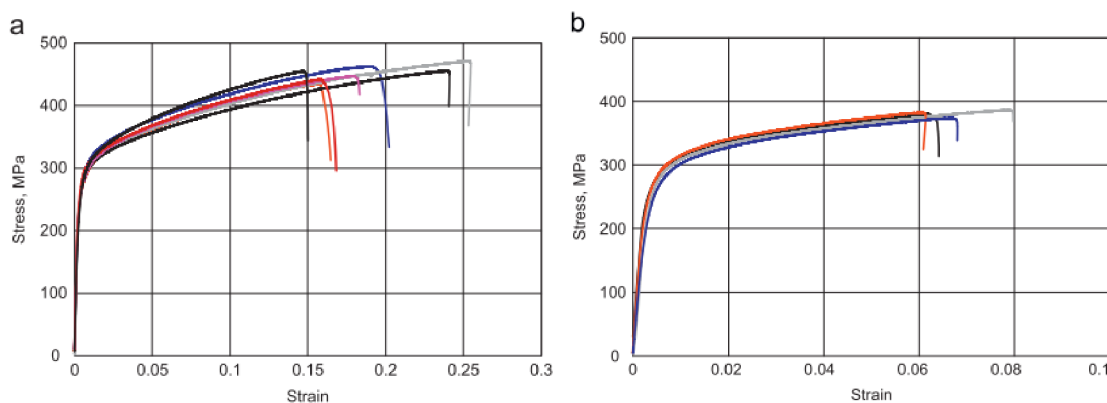
obr. 2-6 Typy jednotlivých elementárních buněk: BCC (Kubická prostorově středěná), FCC (Kubická plošně středěná), BCCZ (Kubická prostorově středěná s pruty ve směru osy Z), FCCZ (Kubická plošně středěná s pruty ve směru osy Z), FBCCZ (Kubická plošně i prostorově středěná s pruty ve směru osy Z) [7]

Z výsledků bylo patrné, že ty struktury, které byly vyztuženy pruty ve směru zatěžování, tedy osy Z, mají lepší absorpční vlastnosti. Nejlepších výsledků dosáhla struktura vytvořená z FBCCZ buněk.

Santorinaios et al.[8] prováděli výzkum na mikro-prutových strukturách vyrobených z materiálu 316L. Vytvořili sérii struktur s různými velikostmi elementárních buněk. Při tvorbě struktur s většími buňkami jak 5 mm docházelo k prohýbání prutů a struktury nebyly dobře vyrobeny. Nejlepších mechanických výsledků dosahovala struktura s velikostí buňky 1 mm. Tyto testy však neprobíhaly při konstantní relativní hustotě, jak se často provádí u gyroidních struktur, ale byly prováděny při konstantním průměru prutu nastaveném na 0,1 mm.

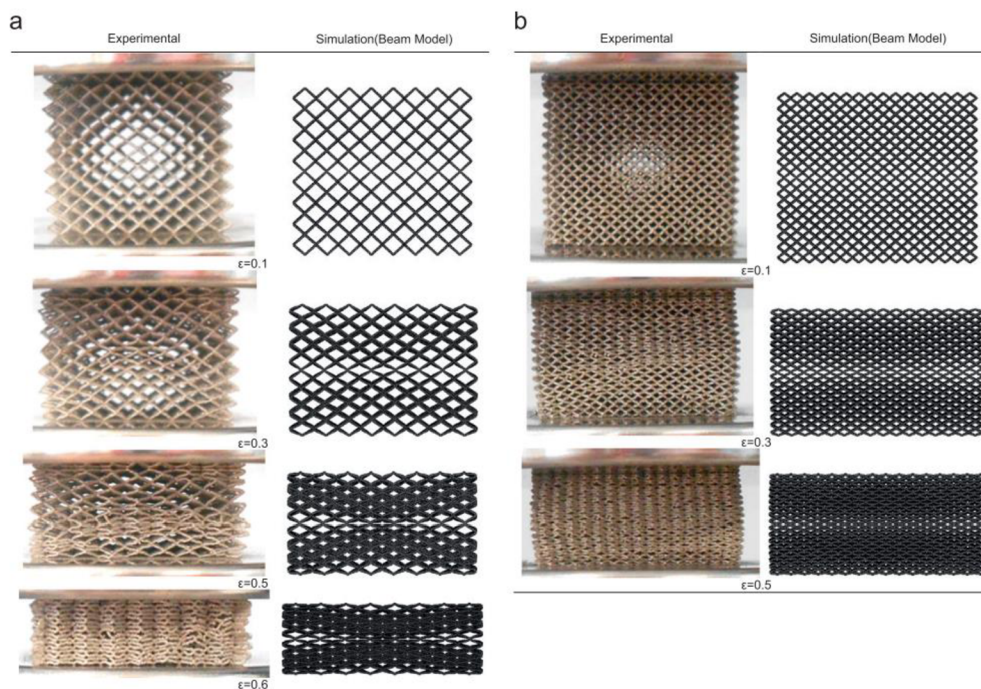
Kromě vlivu velikosti struktury na mechanické vlastnosti Santorinaios et al. pozorovali i vliv procesních parametrů na mechanické vlastnosti. Strukturu o velikosti buňky 2,5 mm vytvořili za použitím různých procesních parametrů. Ta struktura, která byla vyrobena s vyšším výkonem laseru a delším skenovacím časem měla vyšší relativní hustotu. Struktura vyráběná za pomoci většího výkonu měla také lepší mechanické vlastnosti.

Gümtük a Mines [9] se zabývali chováním nerezových mikro-prutových struktur v tlaku a snažili se pro ně vytvořit numerický model. Pro vytvoření tohoto modelu potřebovali experimentálně zjistit skutečný modul pružnosti nerezových mikro-prutů. Jejich pruty měly průměr 0,21 mm a byly vyráběny dvěma způsoby. Jednou s výkonem laseru 140 W a dobou expozice 500 μ s a po druhé s výkonem 90 W a dobou expozice 1000 μ s. Na těchto prutech provedli zkoušku tahem. Tahové zkoušky byly prováděny pouze na jednom prutu, který s podložkou svíral úhel 90°. Výsledné křivky deformace byly srovnatelné, jen se lišila hodnota maximální deformace. To podle Gümtüka a Mineše bylo způsobeno rozdílnou optikou v SLM stroji.



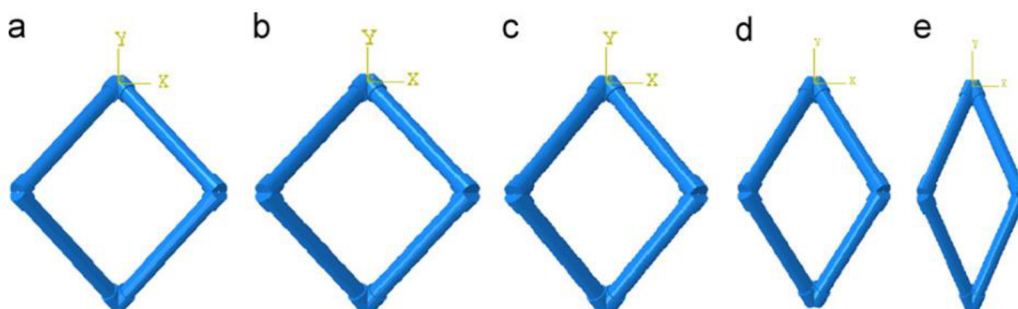
obr. 2-7 Deformační křivky nerezového mikro-prutu o průměru 210 μ m vyrobeným (a) výkonem laseru 90 W s expozicí 1000 μ m; (b) výkonem laseru 140 W a expozicí 500 μ m..[9]

Během jejich výzkumu neuvažovali vliv sklonu prutu na jeho mechanické vlastnosti, protože podle Shena et al. [10] má nerezový prut tištěný pod úhlem 45° jen o 5% horší mechanické vlastnosti než ten, který svírá s podložkou úhel 90°. Také se ukázalo, že buňky s kratšími pruty mají lepší mechanické vlastnosti než ty s delšími pruty.



obr. 2-8 Porovnání deformací experimentálního a prutového modelu buněk o velikosti (a) 2,5 mm; (b) 1,25 mm.

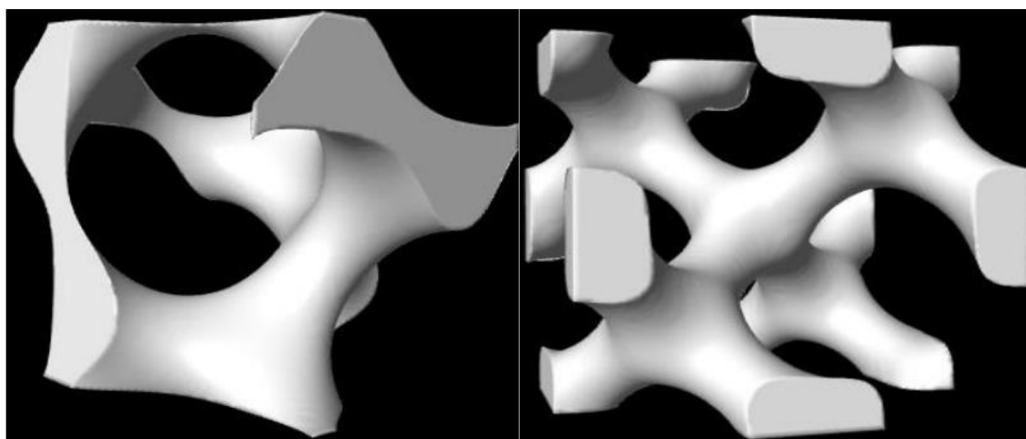
Smith et al. [11] se také zabývali modelováním mikro-prutových struktur pomocí metody konečných prvků. Předmětem jejich zkoumání byly BCC a BCCZ struktury. Pomocí výpočtů a sérií testů dokázali, že úpravou tvaru BCC buňky dokáží zlepšit mechanické vlastnosti struktury. Buňky upravovali tak, že měnili poměr výšky k šířce a hloubce jednotlivých buněk. Tato úprava měla kromě mechanických vlastností vliv na relativní hustotu a celkové vlastnosti struktury. To bylo pravděpodobně zapříčiněno tím, že jednotlivé pruty měly menší převisy a díky tomu byly jejich jednotlivé vrstvy lépe spojeny. Kromě toho mají pruty svírající menší úhel s podložkou lepší rozměrovou přesnost.



obr. 2-9 BCC buňky s poměrem stran: (a) 1; (b) 0,9; (c) 0,8; (d) 0,7; (e) 0,6.

Dalším typem struktur jsou struktury gyroidní. Tyto struktury jsou samonosné ve všech směrech, a proto nepotřebují při výrobě žádné podpory. Gyroidními strukturami se zabývali Hao et al. [12] Konkrétně se zabývali modelováním a následnou možností výroby Schoenova Gyroidu a Schwartz Dimond struktury při různých velikostech elementární buňky a stejné objemové hustotě. Pro jejich výzkum byl použit materiál 316L. Procesní parametry byly voleny: výkon laseru 95 W, skenovací rychlost 500 mm/s, vzdálenost jednotlivých návarů 75 μm a výška vrstvy 75 μm .

Při použití buňky o velikosti 2 mm bylo ve struktuře více buněk, ale jednotlivé pruty struktury byly tenčí. I přesto že byly pruty v menších buňkách malé, nedocházelo při stavbě k jejich poničení recoterem. Přebytečný prášek bylo i u buněk o velikosti 2 mm stále možno odstranit bez problémů. Při stavbách větších buněk byly jednotlivé pruty tlustší, ale na druhou stranu se zvětšovala i vzdálenost převisů. Hao et al. Ověřili, že je možné vyrobit obě gyroidní struktury s velikostí elementárních buněk 2 až 8 mm bez problémů.

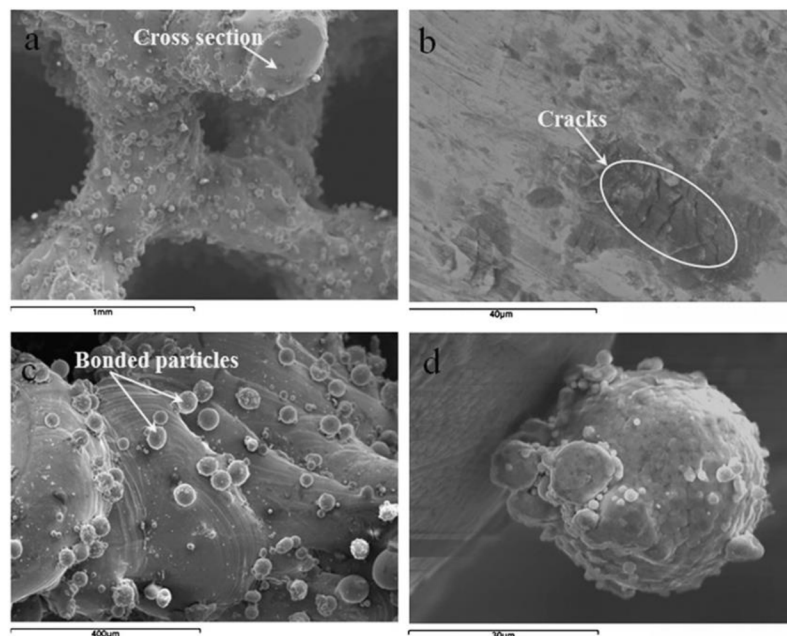


obr. 2-10 (a) Schoenův Gyroid; (b) Swartz Dimond struktura. [12]

Různými gyroidními strukturami se zabývali také Yan et al. [13] Kromě vyrobiteľnosti jednotlivých struktur zkoumali i vliv velikostí elementárních buněk na mechanické vlastnosti výsledné struktury. Opět byl použit materiál 316L, výkon laseru 95 W a výška vrstvy 75 μm . Vytvořili sérii vzorků Schoenových gyroidů s velikostí elementární buňky 2 až 8 mm s relativní hustotou 15 %.

Opět bylo možné vytvořit struktury i s většími elementárními buňkami, podle Yana je možné stavět větší elementární buňky díky tomu, že gyroidy mají sférické jádro a náklon elementů se plynule mění po vrstvách, na rozdíl od struktur vyrobených z přímých prutů. I přes hladké napojování a kulovité jádro jednotlivých prutů nebyli Yan et al. schopni vyrobit struktury s buňkami většími jak 9 mm. Struktura se při tisku v některých místech kroutila směrem nahoru, což vedlo k defektům ve struktuře.

Bylo zjištěno, že jednotlivé pruty byly vyrobeny bez pórů, ale občas se v nich vyskytovaly drobné praskliny, které jsou pravděpodobně způsobeny zbytkovým napětím. Dále bylo na strukturách pozorováno množství nalepeného prášku, což podle Yana je zapříčiněno částečným natavením okolních částic při tavbě a jejich následné přilepení ke struktuře. Stejný jev při stavbě struktur z materiálu 316L pozorovali i Santorinaos et al.[13]



obr. 2-11 Snímky z elektronového mikroskopu (a) pruty gyroidní struktury s velikostí buňky 2 mm; (b) prasklina v řezu prutu; (c) nalepený prášek na stěnách prutu; (d) detail nalepené částice na stěně prutu.

S rostoucí velikostí elementárních buněk rostla i porozita jednotlivých prutů. Buňky velikosti 2 mm měly relativní hustotu 99,5 %, kdežto největší zkoumané buňky o rozměrech 8 mm měly relativní hustotu pouze 90,6 %. Mechanické vlastnosti se také zhoršovaly s rostoucí velikostí elementárních buněk. Mez kluzu byla u nejmenších buněk až o 36 % vyšší než u těch největších.

Na tento výzkum navázali Yan et al. [14] v dalším výzkumu, kde se zaměřili opět na gyroidní struktury vyrobené z materiálu 316L. V tomto výzkumu zjišťovali, jaký má vliv natočení celé struktury na její mechanické vlastnosti. Zjistili, že vyrobené pruty struktur byly ve všech případech větší, než měly být. Orientace neměla vliv na vyrobitelnost. Pokud byla struktura naorientovaná tak, že nejvíce prutů bylo s podložkou rovnoběžných, což je považováno za nejhorší pozici při výrobě na SLM, byly naměřené lepší mechanické vlastnosti, než u struktur s pruty orientovanými se sklonem 45°.

2.3 Výška vrstvy

Jedním z hlavních procesních parametrů je výška vrstvy. Většinou není během výzkumů na výšku vrstvy kladen důraz. S klesající výškou vrstvy roste i čas potřebný na výrobu dílu. Proto je nutno zvážit, jestli má snižování vrstev vliv na kvalitu vyráběných dílů.

Vlivem výšky vrstvy na kvalitu vyrobeného dílu se zabývali Delgado et al. [15] Během jejich testů zjistili, že výška vrstvy ovlivňuje rozměrovou přesnost dílu, a to konkrétně šířku dílu. S rostoucí výškou vrstvy rostla i rozměrová nepřesnost. Kromě rozměrové přesnosti zvyšování výšky negativně ovlivnilo i mez pevnosti. Při použití vyšší vrstvy byla mez pevnosti nižší.

Vlivem výšky vrstvy na kvalitu dílů vyráběných pomocí SLM technologie se zabýval Nguyen et al. [16] Pro jejich výzkum byl použit materiál Inconel 718 s velikostí jednotlivých zrn 15 μm až 45 μm . Průměrná velikost práškových zrn byla tedy 26 μm , což zajišťovalo rovnoměrné rozvrstvení prášku po vrstvách. Byla vytvořena série zkušebních vzorků vyráběná s výškou vrstvy 20, 30, 40 a 50 μm .

Při použití menší výšky vrstvy byla pozorovaná menší drsnost povrchů. Dále byla pozorována větší hustota materiálu, což podle Nguyena může být způsobeno tím, že při použití menších vrstev nanášeného prášku byly roztaveny všechny částice. Navíc plyn, který mohou jednotlivé částice obsahovat, mohl snadněji unikat, protože výška jedné vrstvy byla menší. Dalším jevem, který pozorovali byla změna barvy jednotlivých výtisků při různých výškách. Tato změna barvy byla pravděpodobně zapříčiněna rozdílnou velikostí zrn ve struktuře materiálu. Jemnějších zrn struktury bylo dosaženo při menších výškách vrstvy. Tento jev může být podle Nguyena způsoben hustotou vnesené energie, která je dána rovnicí[17]:

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (1)$$

Kde E je hustota vnesené energie, P je výkon laseru, v je skenovací rychlost, h je hatch distance (vzdálenost mezi jednotlivými návary) a t je výška vrstvy. Jedinou proměnnou v tomto vzorci byla výška vrstvy t . Proto hustota vnesené energie s rostoucí výškou klesala. Pro výšku 20 μm byla energie rovna 114 J/mm^3 a pro výšku vrstvy 50 μm byla rovna 46 J/mm^3 . Díky tomu, že při menších vrstvách byla vnesena větší energie, docházelo k rychlému nárůstu a následnému rychlému poklesu teploty zapříčiněným teplotním gradientem. Tyto rychlejší změny pravděpodobně způsobily jemnější strukturu zrn.

Podobný výzkum také na materiálu Inconel 718 provedli Sufiiarov et al. [18]. A jejich výsledky se shodovaly s výsledky Nguyena et al. [16]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Základem pro většinu porézních struktur jsou pruty. Kessler et al. [3] [4] zjistili, že pruty menší jak 0,35 mm nejsou vyrobeny s velkou rozměrovou přesností. Dále, že se vyrobiteľnost prutů s tvarem jejich příčného průřezu nemění. Pruty, které svíraly s položkou menší úhel jak 20° nebyly vyrobeny.

Qui et al. [6] zjistili závislost výkonu laseru na rozměrovou přesnost prutů a na jejich vnitřní porositu.

Leary et al. [7] zkoumali vliv typu elementární buňky struktury na její mechanické vlastnosti. Tyto buňky se skládaly z prutů o průměru 1 mm, protože při tomto průměru nebyly problémy s vyrobiteľností prutů.

Santorinaios et al. [13] zjišťovali závislost mechanických vlastností na velikosti elementárních buněk. Jejich struktury byly vyráběny z prutů o průměru 0,1 mm bez potíží i přesto, že Kessler et al. [3] považovali pruty z materiálu 316L o průměru 0,1 mm za nevyrobiteľné. Struktury o velikostech buněk do 5 mm byly vyráběny v pořádku, u větších buněk docházelo k prohýbání prutů, což znemožňovalo vyrobiteľnost těchto struktur. Ukázalo se, že na mechanické vlastnosti prutů má vliv i výkon laseru. Při vyšším výkonu laseru měly struktury lepší vlastnosti. Tento jev mohl být spojený s rostoucím průměrem prutu vlivem rostoucího výkonu laseru, jak jej popsal Qui et al. [6]

Gümtük a Mines [9] se zabývali chováním nerezových struktur v tlaku. Jejich zkušební struktury se skládaly z prutů o průměru 0,21 mm. Všechny jejich struktury byly vyrobeny bez problémů i přesto, že Kessler et al. [3] tvrdí, že minimální použitelný průměr prutu je 0,35 mm.

Smith et al. [11] upravovali vlastnosti mikro-prutových struktur tak, že měnili poměr stran buněk struktury. Struktury, které měly buňky více natažené do výšky, dosahovaly lepších výsledků. To mohlo být způsobeno tím, že pruty svíraly menší úhel s podložkou, měly menší převisy a jednotlivé vrstvy byly lépe spojeny.

Gyroidními strukturami se zabývali Hao et al. [12] a Yan et al. [13]. Obě výzkumné skupiny ověřily, že je možné vyrobit gyroidní struktury s velikostí buněk až 8 mm. Na rozdíl od Santorinaios et al. [13], kteří byli schopni vyrobit prutové buňky pouze o velikosti 5 mm. To, že je možné vyrobit gyroidní struktury s většími buňkami může být způsobeno plynulými přechody jednotlivých prutů a sférickým jádrem buněk.

Na tento výzkum navázali Yan et al. [14], kde porovnávali mechanické vlastnosti gyroidních struktur při různých natočeních. Zjistili, že natočení struktury má vliv na mechanické vlastnosti. Při takovém natočení, kdy více prutů svíralo s podložkou 0° byly mechanické vlastnosti lepší. Při tom pruty rovnoběžné s podložkou se většinou považují za

nevyrobitelné, což popisuje i Kessler et al. [4]. Podrobné zkoumání rozměrů vyrobených struktur ukázalo, že veškeré vyrobené pruty jsou tlustší, než byly jejich nominální hodnoty. Přitom průměr prutu byl větší, než uváděná limitní hodnota 0,35 mm. Tento jev by mohl být zapříčiněn vysokým výkonem laseru, což popisoval Qui et al. [6]. Větší průměr prutů mohl být také způsoben nalepeným práškem na spodní straně převisů, což popisovali Pantělejev et al. [5]

Delgado et al. [15] pozoroval závislost výšky vrstvy na rozměrovou přesnost dílů. Jednalo se však o plné díly, a ne o pruty, či mikro-prutové struktury. Při nižších výškách vrstev byla rozměrová přesnost lepší. Kromě toho se ukázalo, že při nižších výškách vrstev byla mez pevnosti vyšší.

Výškou vrstvy se zabývali také Nguyen et al. [16] a Sufiiarov et al. [18]. Jejich vzorky však nebyly z materiálu 316L, ale z Inconelu 718. Obě výzkumné skupiny pozorovaly, že nižší vrstvy vedou k menší drsnosti povrchu a větší hustotě materiálu. Kromě těchto jevů Nguyen et al. pozorovali rozdílné barvy vyrobených dílů. Tyto změny barvy byly pravděpodobně způsobeny rozdílnou vnesenou energií a rozdílným chladnutím, díky čemuž měla struktura vyrobená s menší výškou vrstvy jemnější zrna.

Veškeré výše zmíněné práce se zabývaly vlivem procesních parametrů na kvalitu výrobků vyrobených pomocí technologie SLM. Nguyen et al. [16] a Sufiiarov et al. [18] se zabývali vlivem výšky vrstvy na kvalitu vyrobených dílů, ale nepoužívali nerezový materiál. Vliv výšky vrstvy na kvalitu dílu vyrobených z nerezového materiálu zkoumali Delgado et al. [15] Vliv výšky vrstvy však nebyl hlavní náplní jejich zkoumání. Předchozí články uváděly, že pruty se při menším úhlu sevřeném s podložkou vyrábí hůř. Podle těch článků, které se zabývaly vlivem výšky vrstvy, se při menších výškách vrstev dá dosáhnout lepší geometrické přesnosti a lepších mechanických vlastností. Proto by mohlo snižování výšky vrstvy vést ke zlepšení celkové výrobitelnosti prutů a mikro-prutových struktur, a tedy i na minimální úhel, při kterém se ještě pruty vyrobí bez výrazných poruch.

3.2 Cíl práce

Cílem této práce je zjistit, jaký vliv má výška nanášené vrstvy na výrobitelnost a vlastnosti mikro-prutových struktur vyráběných technologií SLM. Tento vliv bude zkoumán na jednotlivých i na mikro-prutových strukturách.

Dílními cíli této práce jsou:

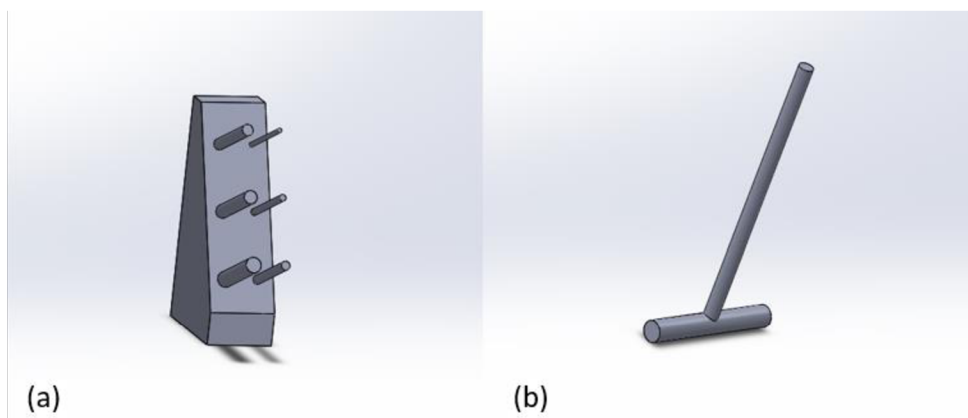
- Vypracovat rešerši zaměřenou na mikro-prutové struktury
- Výroba zkušebních těles
- Digitalizace vyrobených zkušebních těles
- Analýza vlivu výšky vrstvy

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Příprava a výroba zkušebních těles.

4.1.1 Pruty

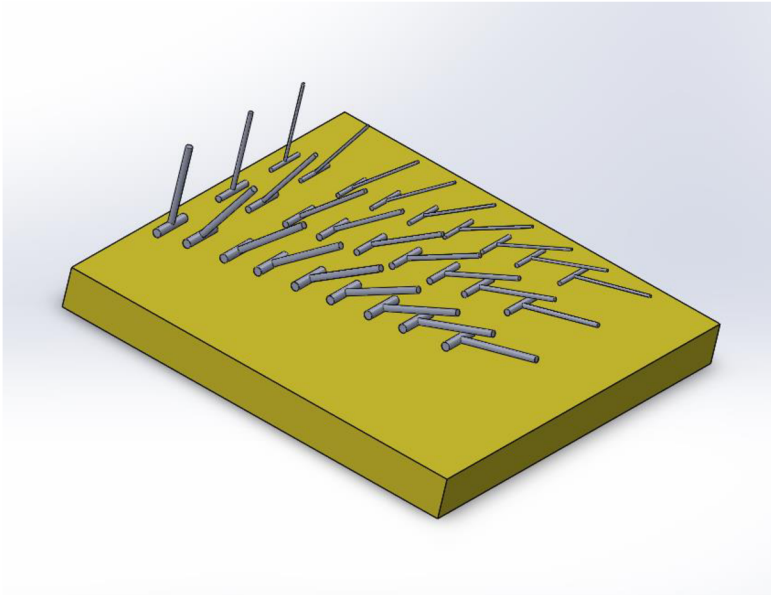
Nejprve bylo navrženo více tvarů zkušebních těles v programu Solidworks 2018. Následně byl zvolen ten typ, ve kterém bylo použito co nejméně materiálu. Zvolené řešení tak zajistilo nejrychlejší výrobu a zároveň nejmenší spotřebu materiálu.



obr. 4-1 (a) Původní navržené těleso; (b) použité zkušební těleso.

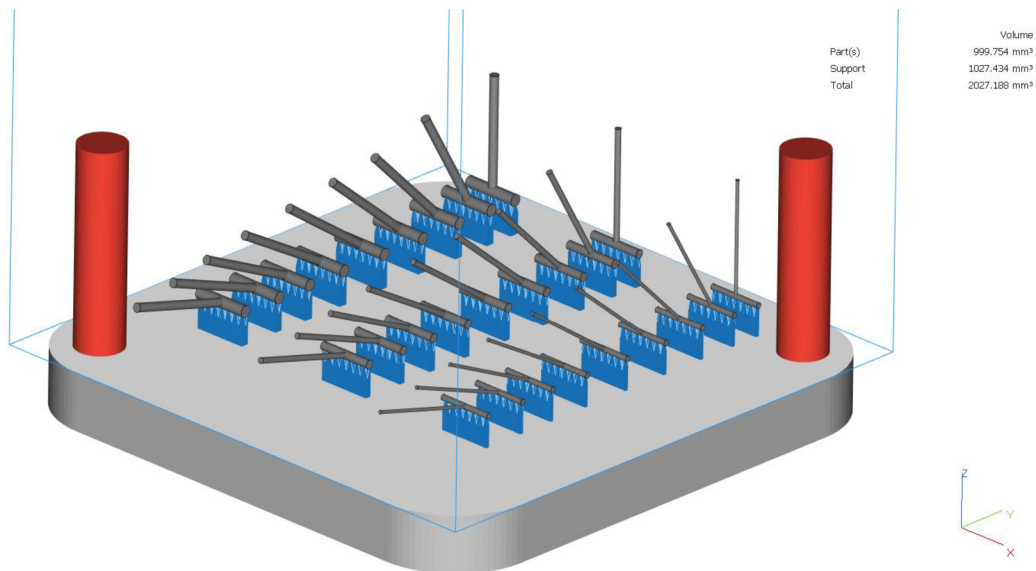
Po navržení tvaru zkušebního tělesa byla zvolena finální podoba celé zkušební stavby. Podle poznatků Kessler [3] byl použit prut kruhového průřezu s průměrem 0,6 mm o délce 20 mm. Za účelem většího rozsahu testu byly vyráběny také pruty s průměrem 1 a 1,5 mm. Tyto pruty byly dále natáčeny tak, aby svíraly s tiskovou podložkou různé úhly. Pro ověření vlivu výšky vrstvy byl minimální úhel zvolen 15° , který byl podle Kessler[4] nevyrobitelný. Pokud by se potvrdilo, že výška vrstvy ovlivňuje vyrobitelnost prutů svírajících s podložkou menší úhly, bylo by to vidět právě na prutu pod úhlem 15° . Ve zkušební stavbě byly pruty stavěny pod úhly 90° , 60° , 45° , 40° , 30° , 25° , 20° a 15° .

Na obrázku **obr. 4-2** je vyobrazeno rozložení všech zkušebních prutů. Po prvním zkušebním testu bylo uspořádání prutů lehce pozměněno. První uspořádání mělo pruty v jedné linii. Pokud by došlo k poškození bříty recoateru vlivem kroucení prutů, které by se zvedaly nad úroveň vrstvy, byly by ovlivněny všechny ostatní pruty v řadě. Proto pro druhou stavbu bylo použito „schodovité“ uspořádání. To znamená, že se pruty nenacházely v zákrytu.



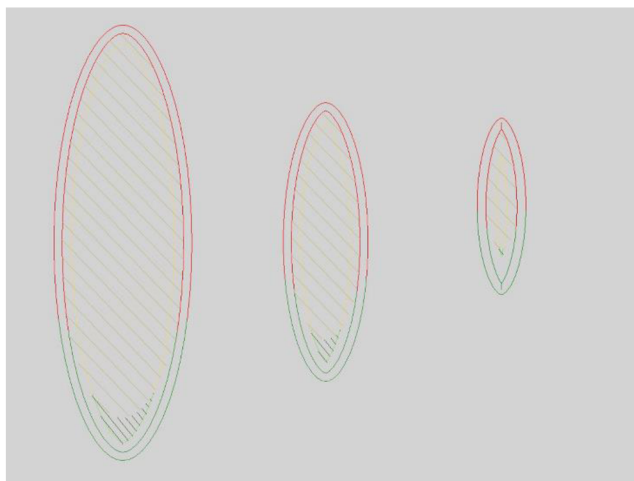
obr. 4-2 Výsledné uspořádání zkušebních těles. Žlutě je tisková podložka a šedě zkušební tělesa.

Z CAD modelu byla vytvořena STL data, která byla dále zpracována v programu Magics 22, který slouží k přípravě programu pro tisk na SLM stroji. Pod každý zkušební prut byly umístěny podpory o výšce 5 mm. Tyto podpory byly přidány, aby bylo možné pruty od podložky bez problémů oddělit. Vyrobené díly byly z principu fungování technologie SLM na podložku navařené. Díky podporám bylo možné pruty od podložky oddělit za pomoci štípacích kleští.



obr. 4-3 Připravená série vzorků na podporách. Modře jsou podpory, tmavě šedě vzorky, světle šedě tisková platforma a červeně je vyhrazen prostor nutný k odšroubování platformy ze stroje.

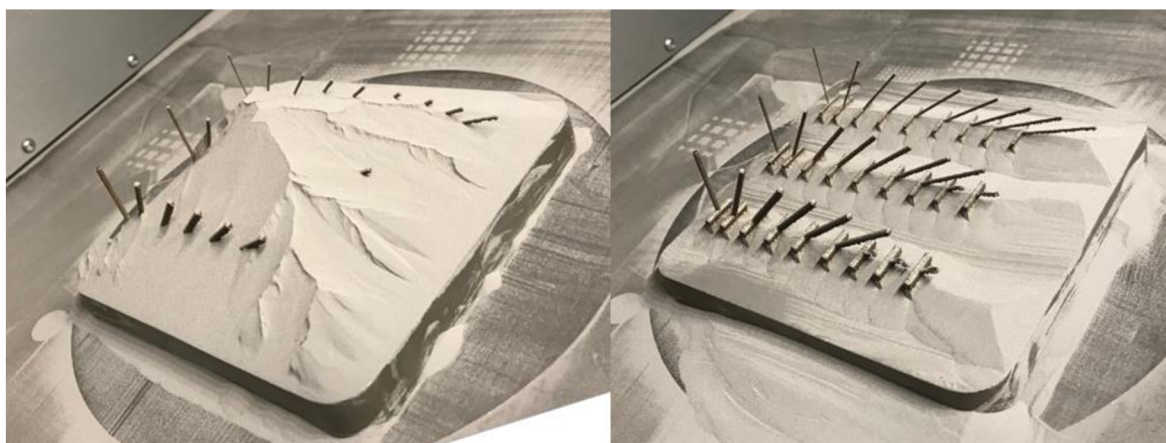
Pro výrobu prutů byla použita defaultní skenovací strategie. Tato strategie rozlišuje i plochy převisů, pro které jsou upraveny procesní parametry tak, že hustota vnesené energie má nižší hodnotu. Parametry jsou upraveny, aby se předešlo nalepování prášku na spodní strany výrobků a zlepšila se tak jejich rozměrová přesnost.



obr. 4-4 Použité skenovací strategie pro všechny průměry vyráběné pod úhlem 20°. Zeleně jsou upravené oblasti převisů, červeně obrysy a žlutě jsou výplně.

Tyto zkušební vzorky byly tisknuty z nerezového materiálu 316L na stroji SLM 280HL při nastavení dvou různých výšek vrstvy. Konkrétně to bylo 50 μm a 30 μm . Pro takovéto výšky vrstvy jsou na našem pracovišti procesní parametry přednastavené přímo od výrobce stroje. Při tisku je mezi každou vrstvou vložena prodleva 12 s, která má zajistit lepší chladnutí výtisku a zabránit tak deformacím a zvedáním výtisků nad úroveň jednotlivých vrstev. Použitý materiál měl průměrnou velikost zrn od 20 do 53 μm .

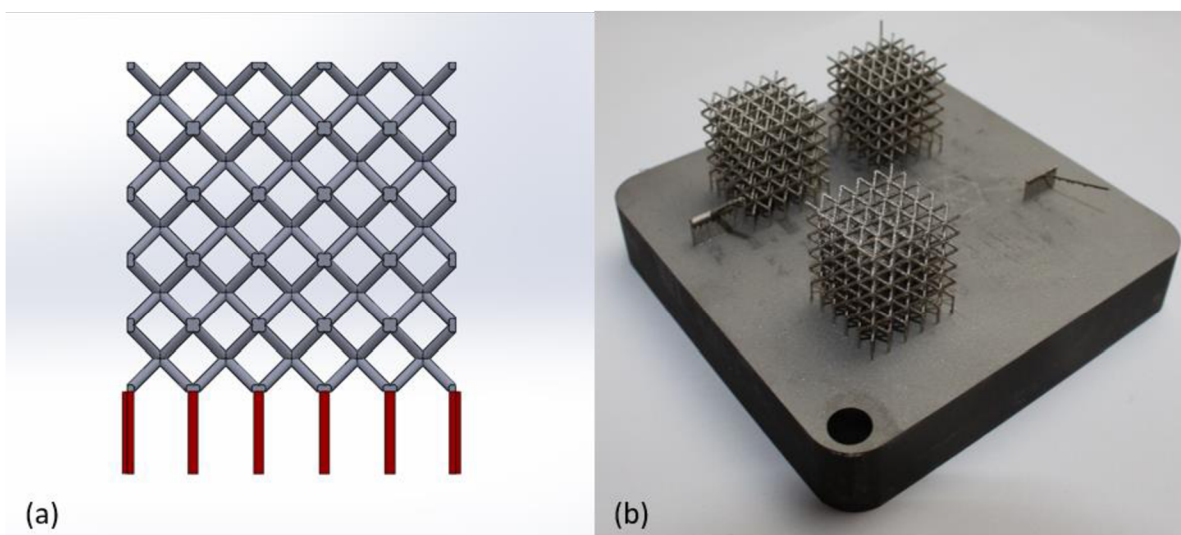
Po dokončení tisku byl odstraněn přebytečný prášek a hotový výtisk byl vyjmut ze stroje, aby mohly být vzorky vyhodnoceny.



obr. 4-5 Proces odstraňování kovového prášku.

4.1.2 Mikro-prutové struktury

Na základě výsledků z testovacích prutů byla navržena mikro-prutová BCC struktura. Velikost elementární buňky struktury byla 4 mm a průměr jednotlivých prutů byl 0,6 mm. Opět byly vzorky vyrobeny s použitím přednastavených procesních parametrů od výrobce s výškou vrstvy 50 a 30 μm . Jediný rozdíl v procesních parametrech bylo zvětšení prodlevy mezi vrstvami ze 12 s na 35 s. Zvětšení této prodlevy by mohlo vést ke zlepšení kvality výtisku a zmenšení množství nalepeného prášku ze spodní strany prutů.



obr. 4-6 (a) Mikro-prutová struktura vymodelovaná v programu Solidworks. Červeně podpory, šedě je výsledná struktura. (b) Struktury vyrobené s výškou vrstvy 30 μm .

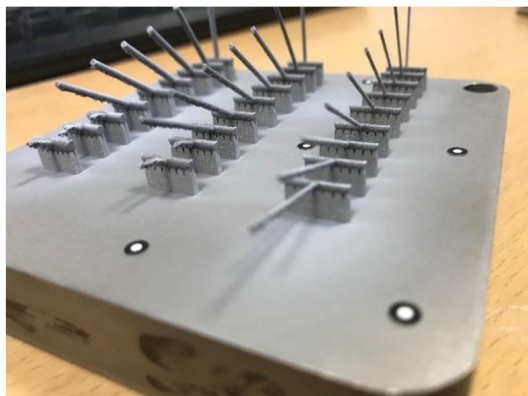
Pod struktury byly umístěny tenké podpory o délce 5 mm, aby bylo možné struktury bez poškození oddělit od podložky.

Při tisku s výškou vrstvy 30 μm byly na tiskovou podložku umístěny i tři pruty. Tyto pruty byly do stavby přidány, aby se ověřilo, zda má zvýšení časové prodlevy mezi vrstvami vliv na vyrobiteľnosť prutů. Byly vyráběny dva pruty s průměrem 0,6 mm pod úhlem 90° a 20° a jeden s průměrem 1,5 mm vyrobený pod úhlem 40°.

4.2 Metody vyhodnocení vzorků

4.2.1 Pruty

Vzorky byly nejdříve nafoceny. Po nafocení byly vzorky osázeny identifikačními body, které umožnily naskenování pomocí 3D skeneru ATOS Triplescan. Připravené vzorky byly před samotným skenováním nastříkány titanovým práškem rozpuštěným v lihu. Bez tohoto nástřiku nebylo možné vzorky naskenovat, protože byly příliš lesklé a skener je nedokázal rozpoznat.



obr. 4-7 Zkušební vzorek olepený kontrolními body pro 3D skenování.

Naskenovaný vzorek byl porovnán s CAD modelem vzorku a byly vyhodnoceny odchylky pomocí programu GOM Inspect 2018. Kromě odchylek modelu a vyrobeného vzorku byly na naskenovaném modelu vytvořeny maximální vepsané, minimální opsané a Gausovy válce ke všem zkoumaným prutům.

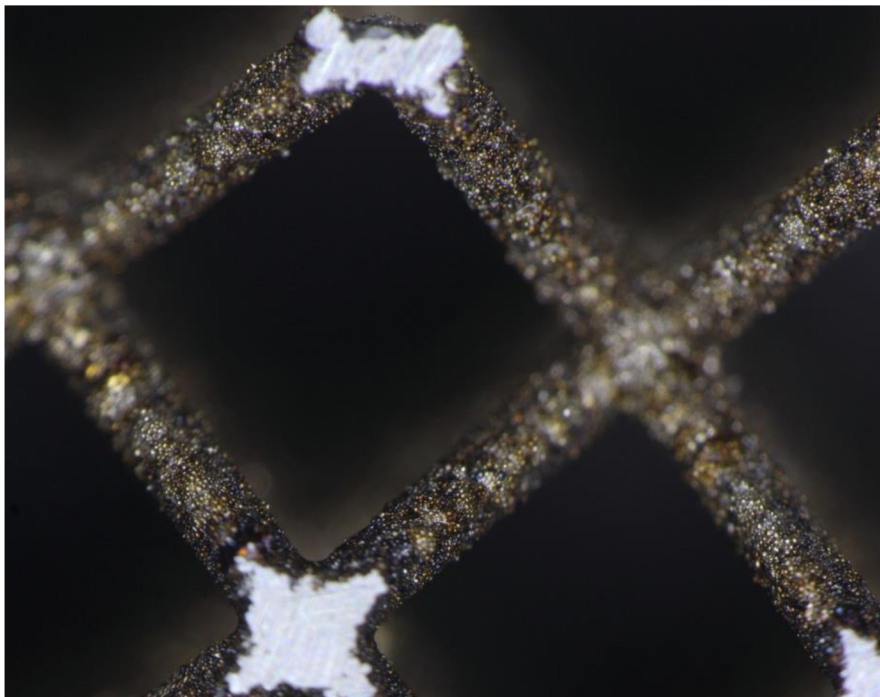
Po naskenování byly jednotlivé pruty odděleny od platformy a vloženy pro přehlednost do označeného přípravku. V tomto přípravku byly pruty opět nafoceny, tentokrát pomocí fotoaparátu připojeného na světelný mikroskop.



obr. 4-8 Vzorky tištěné s výškou vrstvy 50 μm .

4.2.2 Mikro-prutové struktury.

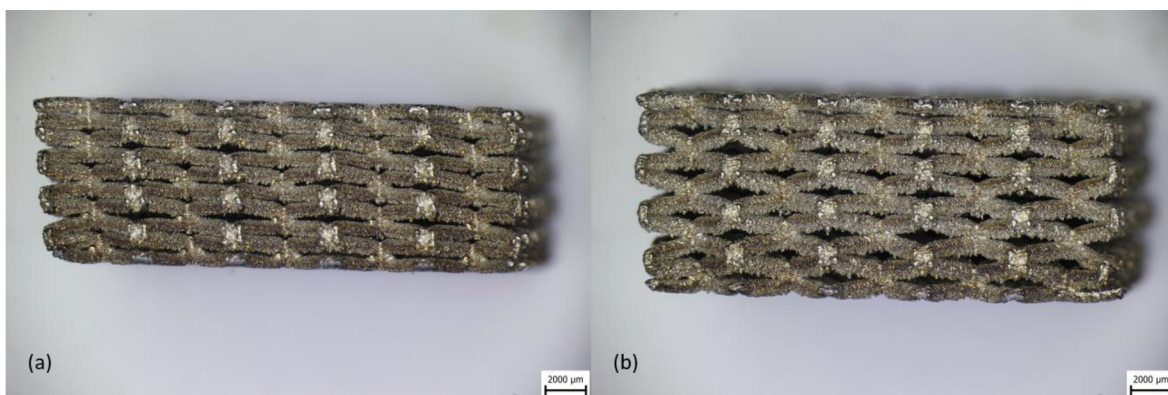
Vzorky byly nejdříve nafoceny fotoaparátem. Poté byly odstraněny z podložky. Po odstranění z podložky byly odstraněny podpory a místa, ve kterých se struktury dotýkaly podpor byly zabroušeny tak, aby struktura měla ve všech směrech stejné rozměry. Následně byly vyrobené struktury nafoceny pomocí fotoaparátu připojeného na světelný mikroskop. Tyto snímky byly vizuálně porovnány.



obr. 4-9 Zabroušené plochy ze spodní strany struktury.

Kromě vizuálních testů byly struktury zváženy a jejich hmotnosti byly porovnány s teoretickou hmotností.

Pro ověření vlivu výšky byl na 3 vzorcích struktur vyráběných při obou výškách proveden impact test. [19] Na strukturu byl spuštěn indentor z výšky 1 m o hmotnosti 8,45 kg.



obr. 4-10 Rozdílná deformace po impact testu struktury vyráběné s výškou vrstvy (a) 30 μm; (b) 50 μm.

5 VÝSLEDKY

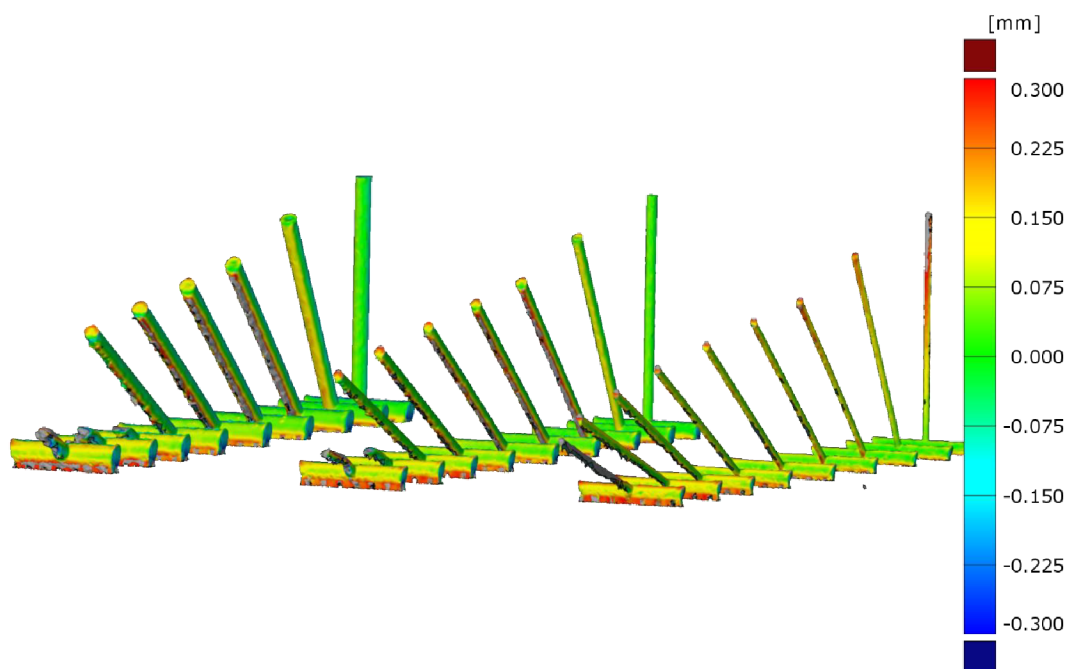
5.1 Pruty

Z navržených těles se ne všechny podařilo vyrobit, což bylo předpokládáno. Nejhorších výsledků při obou výškách dosahovaly nejtlustší pruty. Tedy ty o průměru 1,5 mm. V tabulce **tab. 5-1** lze vidět úspěšnost při výrobě jednotlivých prutů. U všech nevyrobených prutů byla výroba zastavena manuálně, a to z toho důvodu, že se pruty zvedaly nad úroveň jednotlivých vrstev. Zastavením výroby vadných prutů se předešlo poškození recoateru, nebo samotného výtisku.

Úhel sevřený s podložkou		90°	60°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°
1,5 mm	30 μm	zeleně	zeleně	zeleně	žlutě	červeně	červeně	červeně	červeně	červeně
	50 μm	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	červeně	červeně	červeně
1 mm	30 μm	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	žlutě	červeně	červeně	červeně
	50 μm	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	červeně	červeně	červeně
0,6 mm	30 μm	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	žlutě	žlutě
	50 μm	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně	zeleně

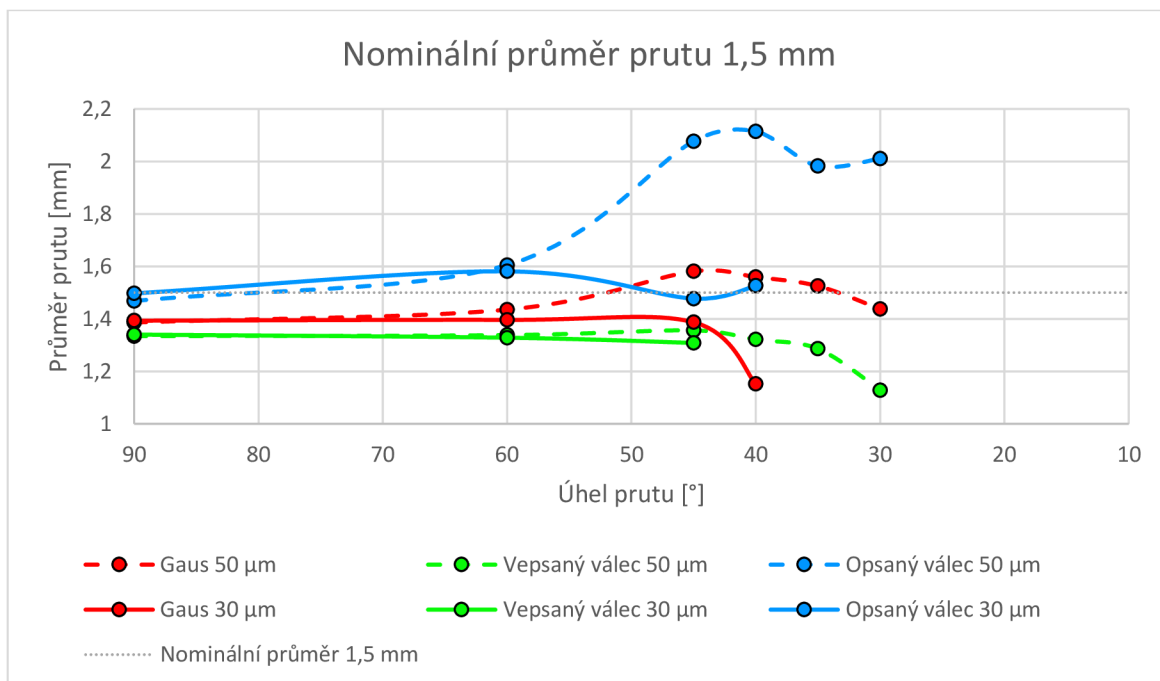
tab. 5-2 Porovnání vyrobitelnosti jednotlivých prutů. Červeně jsou pruty, které musely být při stavbě zastaveny, žlutě pruty, které se vyrobily až do konce, ale byly velice nekvalitní. Zeleně jsou pruty vyrobené bez problémů.

Ty pruty, které byly vyrobeny, byly naskenovány a porovnány s CAD daty. Z obrázku lze vidět, že úhly vyrobených prutů byly v pořádku. Jak jde z obrázku však vidět, pruty nejsou kulaté a dochází k velkým odchylkám od CAD modelu zejména na spodních stranách prutů.

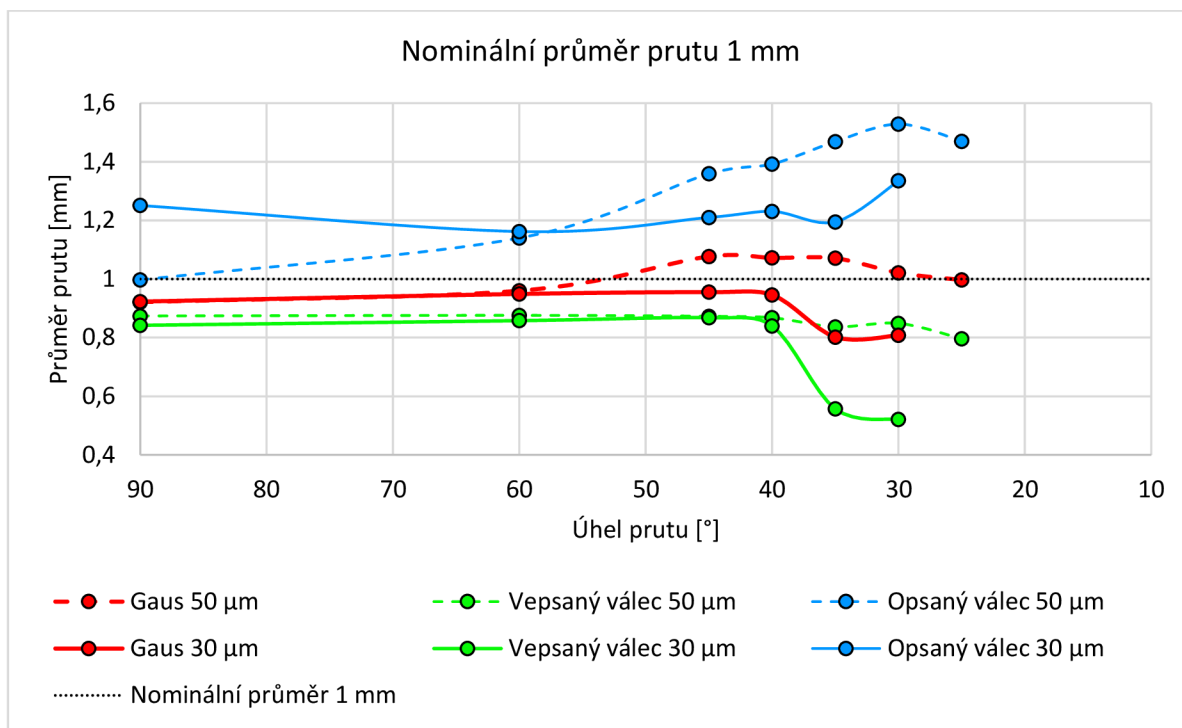


obr. 5-1 Porovnání vyrobených těles s CAD modelem.

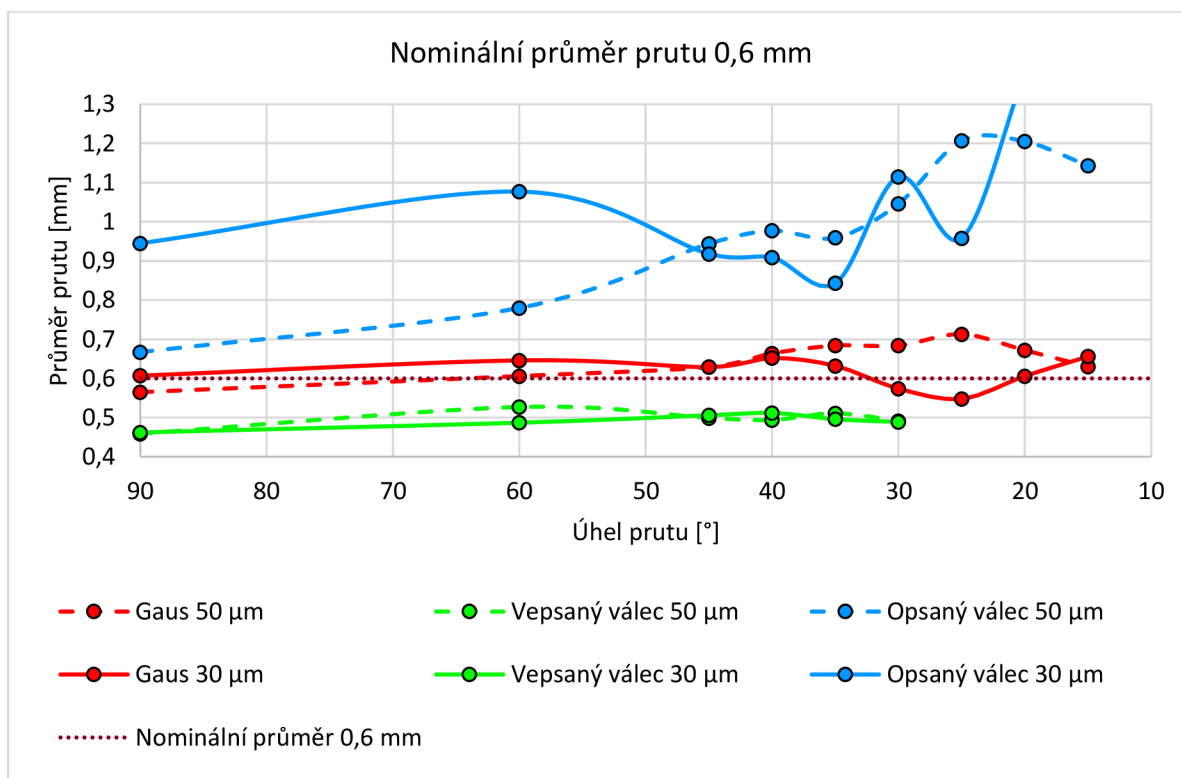
Z odečtených průměrů opsaných, vepsaných a Gausových válců byly sestaveny grafy. Pro porovnání byly vždy do jednoho grafu vloženy pruty o stejném průměru stavěné při 30 i 50 μm . U všech průměrů prutů zůstával průměr Gausova válce konstantní i pro menší úhly sevřené s podložkou, což by potvrzovalo teorii, že při menší vrstvě se budou stavět lépe. V grafech jsou hodnoty naměřené na vzorcích vyráběných při 30 μm zaneseny plnou čarou a hodnoty ze vzorků stavěných při 50 μm čárkovanou.



obr. 5-2 Graf srovnání průměrů opsaných, vepsaných a Gausových válců pro prut s nominálním průměrem 1,5 mm.



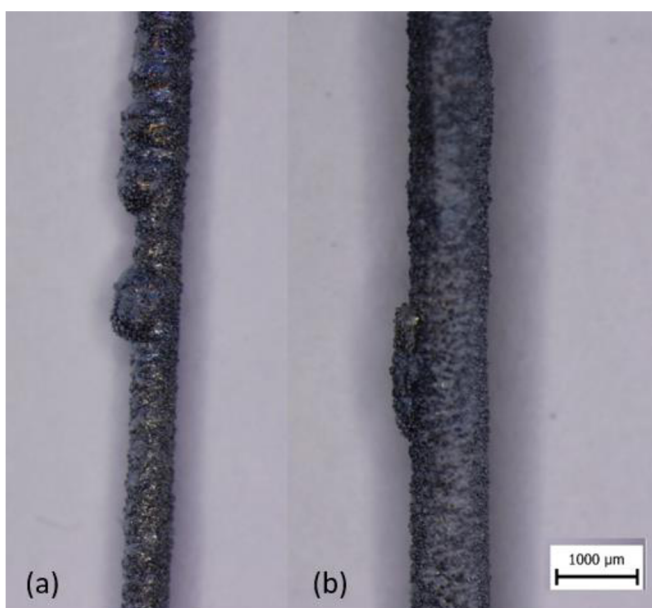
obr. 5-3 Graf srovnání průměrů opsaných, vepsaných a Gausových válců pro prut s nominálním průměrem 1 mm.



obr. 5-4 Graf srovnání průměrů opsaných, vepsaných a Gausových válců pro prut s nominálním průměrem 0,6 mm.

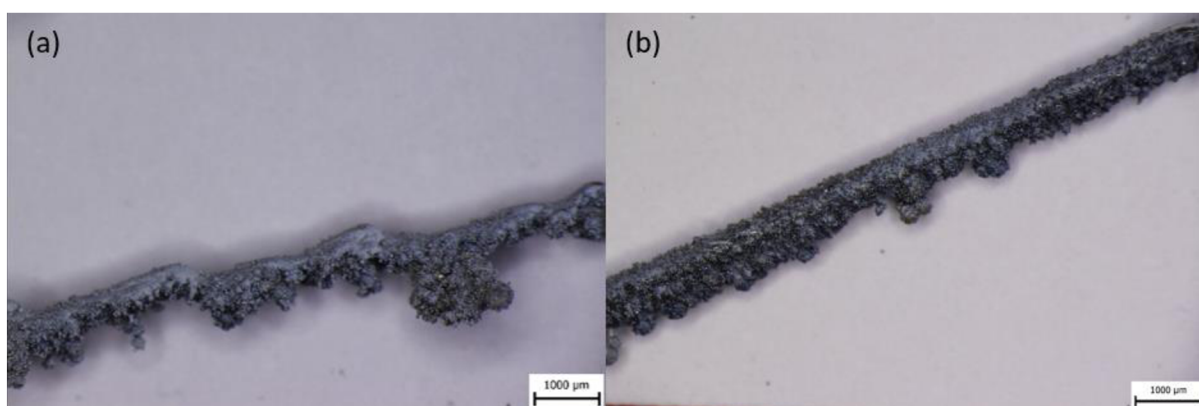
Z grafů je možné vidět, že průměry Gausových válců zůstávaly konstantní i při menších úhlech. To ukazuje pozitivní vliv zmenšování výšky vrstvy na rozměrovou přesnost. Na druhou stranu se při použití vrstvy 30 μm nepodařilo vyrobit pruty s menšími sevřenými úhly s podložkou jako u vrstvy 50 μm .

Při výšce 30 μm se i na prutech kolmých na podložku objevovala lokální geometrická nepřesnost. Nebyla však způsobena nalepeným práškem ze spodní strany prutu, protože kolmý prut nemá žádný převis. Byl to přímo roztavený materiál, který byl součástí prutu. Průměr prutu v těchto místech byl výrazně větší než jeho nominální průměr.



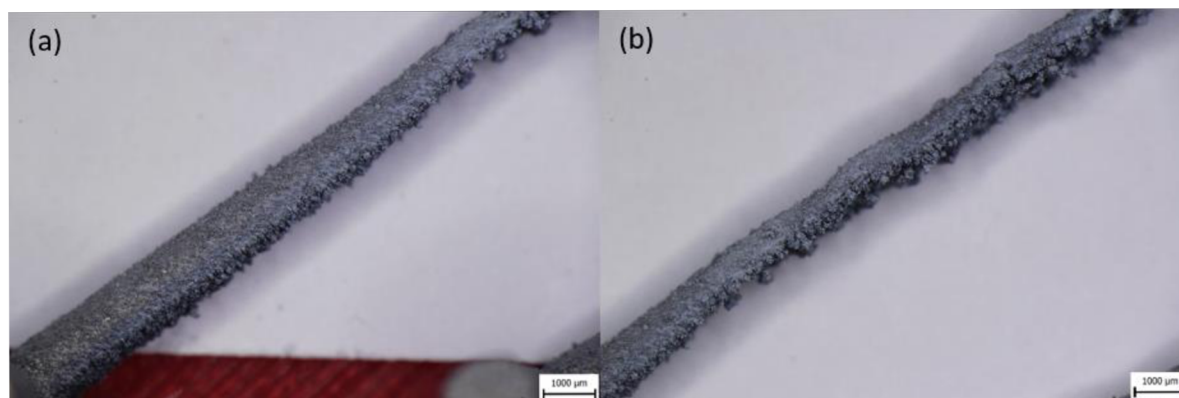
obr. 5-5 Lokální rozměrová nepřesnost u prutů stavěných s výškou vrstvy 30 μm . (a) Průměr 0,6 mm; (b) 1 mm.

Prut s průměrem 0,6 mm vyrobený s výškou vrstvy 30 μm a úhlem 15° byl sice vyroben, ale velice špatně. Prut neměl kruhový průřez a měl schodovitý tvar. Stejný prut vyrobený s výškou vrstvy 50 μm neměl schodovitý tvar, ale byl ze spodní strany zploštělý.



obr. 5-6 Prut stavěný pod úhlem 15° stavěný s výškou vrstvy (a) 30 μm , (b) 50 μm .

Pruty o průměru 1,5 mm dosahovaly horší vyrobiteľnosti. Prut vyráběný pod úhlem 40° a výškou vrstvy 30 μm se ze začátku vyráběl bez problémů. Zhruba po 5 mm se začal průřez prutu výrazně deformovat a ze spodní strany byl zploštělý, plný nalepeného prášku. Výroba sice nemusela být zastavena, ale prut nebyl správně vyroben.



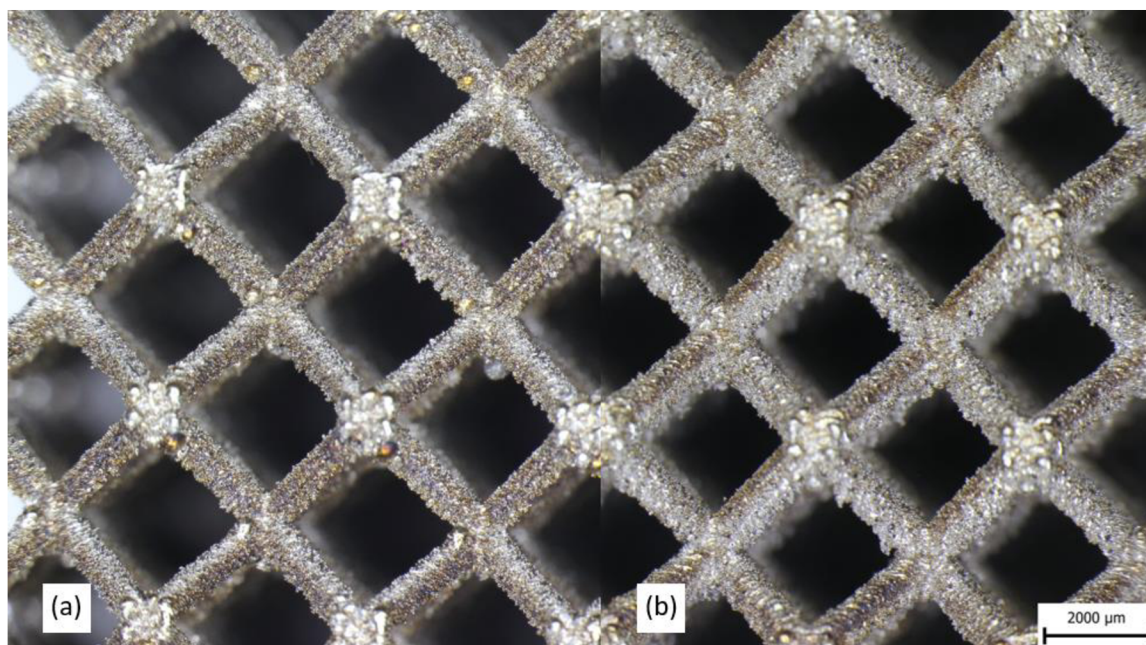
obr. 5-7 Prut s průměrem 1,5 mm a sklonem 40° vyráběný s výškou vrstvy 30 μm (a) začátek prutu; (b) pokračování prutu.



obr. 5-8 Prut s průměrem 1,5 mm a sklonem 40° vyráběný s výškou vrstvy 30 μm.

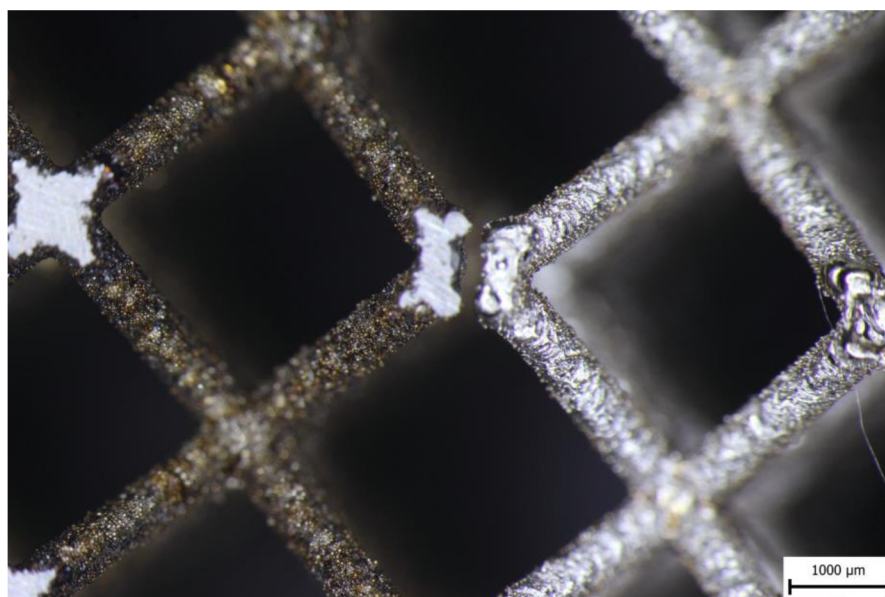
5.2 Mikro-prutové struktury

Navržené struktury byly vyrobeny bez problémů i pro výšku vrstvy 30 μm i pro výšku vrstvy 50 μm . Pruty nebyly nijak zdeformovány a výsledná struktura byla bez vad. Struktura vyrobená s výškou vrstvy 30 μm měla na spodních stranách nalepené menší množství prášku, můžeme tedy konstatovat, že jsme dosáhli menší drsnosti spodních stran prutů.



obr. 5-9 Rozdílné množství nalepeného prášku ze spodní strany prutů ve struktuře vyráběné s výškou vrstvy (a) 30 μm ; (b) 50 μm .

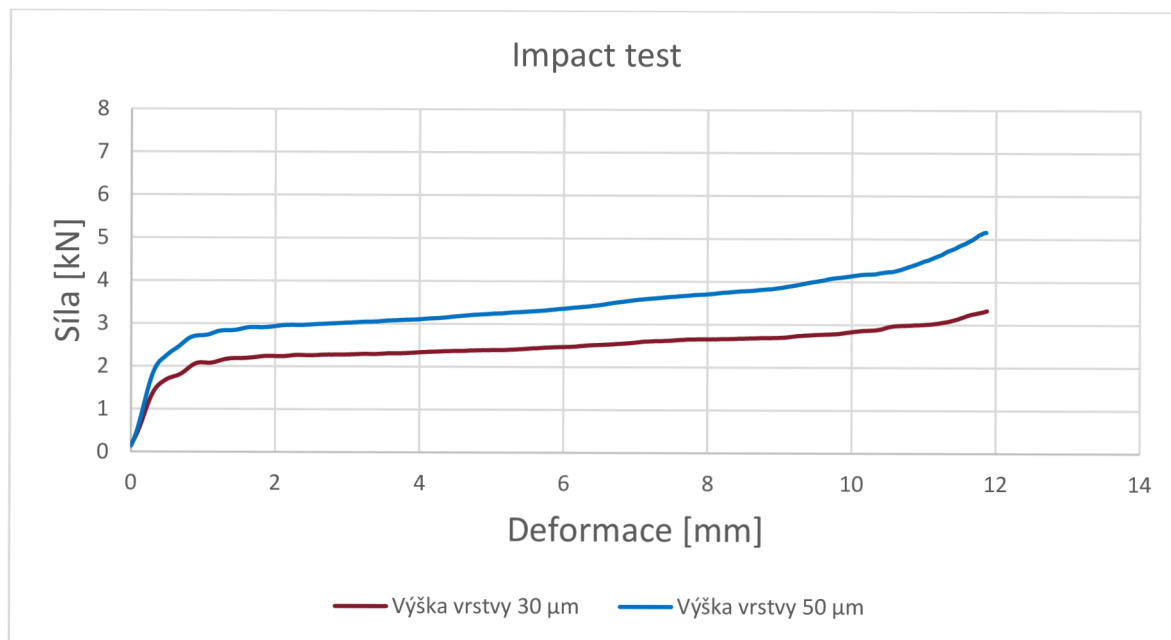
U obou nastavených výšek měly struktury rozdílnou barvu na spodní a vrchní straně. Vrchní strana struktury má stříbrnou barvu, spodní strana měla tmavě šedou barvu.



obr. 5-10 Rozdíl barvy a spodní (vlevo) a vrchní (vpravo) strany struktury vyráběné s výškou vrstvy 30 μm .

U struktur vyráběných s různou výškou vrstvy se lišila i hmotnost. Struktury vyráběné s výškou vrstvy 30 μm se pohybovala hmotnost struktury kolem 6,25 g a u struktur vyráběných s výškou vrstvy 50 μm byl hmotnost přibližně 7,5 g. Při čemž teoreticky vypočítaná hmotnost struktury byla 6,735 g. Rozdílná hmotnost struktur byla způsobena rozdílnými hodnotami skutečných průměrů vyrobených prutů.

Výsledky z impact testu ukázaly, že mikro-prutové struktury vyráběné s větší výškou vrstvy byly tužší, což bylo způsobeno právě větším průměrem prutu.



obr. 5-11 Graf výsledků z impact testu.

6 DISKUZE

Mechanické vlastnosti a vyrobiteľnosť mikro-prutových štruktúr zásadne ovplyvňujú jednotlivé pruty, ze ktorých sa štruktúry skladajú. Kvalita a vyrobiteľnosť prutů se výrazně lišila při použití výšky vrstvy 30 a 50 μm .

První rozdíl byl kritický úhel, kterého se povedlo u prutů dosáhnout. Pruty vyráběné s výškou vrstvy 50 μm se podařilo vyrobiť i s menším úhlem sevřeným s podložkou. Tento kritický úhel závisel však i na průměru jednotlivých prutů. Čím menší průměr byl, tím menší úhel bylo možné vyrobiť.

Nejvýraznější rozdíl byl mezi výškami vrstev vidět u prutu s průměrem 0,6 vyráběného pod úhlem 15°. Tento prut při menší výšce měl schodovitý tvar. Tento tvar vznikl tak, že vyrobená část prutu se zvedala nad úroveň jednotlivé vrstvy a recoater prut při průjezdu zatlačil zpátky pod úroveň vrstvy. Jelikož měl prut malý průměr, byl pružný a tento jev se stále opakoval a vznikl schodovitý tvar. Prut se stejným úhlem vyrobený při výšce vrstvy 50 μm neměl schodovitý tvar, byl však ze spodní strany zploštělý a plný nalepeného prášku.

Rozdíl kvality jednotlivých prutů byl pravděpodobně způsoben rozdílnou hustotou vnesené energie. Použité procesní parametry dodané výrobcem rozlišují jednotlivé části vyráběných dílů na normální plochy a plochy převisů. Tyto plochy mají upravené nastavení. Toto upravené nastavení parametrů má zajistit, aby nebylo ze spodní strany převisů nalepeno tak velké množství prášku, nedocházelo k přepalování převisů a tím pádem k jejich deformaci. U použitých parametrů pro výšku vrstvy 30 μm byla hustota vnesené energie vyšší, než u 50 μm . Tento rozdíl pravděpodobně způsobil rozdíly kvality těchto dvou prutů.

Další rozdíl, který byl pozorován byl u prutu se sklonem 40°. Při nastavené výšce 30 μm se prut vyráběl prvních 5 mm bez výrazných deformací. Během jeho dalšího nárůstu délky docházelo postupně ke zplošťování spodní strany prutu a ke vzrůstání množství nalepeného prášku ze spodní strany. U prutu vyrobeného s výškou vrstvy 50 μm se žádné zploštění spodní straně prutu neprojevovalo. Bylo pozorováno pouze nalepený prášek ze spodní strany. Tato deformace prutu s menší výškou by mohla být opět způsobena rozdílem hustoty vnesené energie. Kromě toho mohla k deformaci přispět i vlastní hmotnost prutu, která ohýbala prut a tím pádem byly následné vrstvy špatně navařeny.

Horší vyrobiteľnosť prutů s větším průměrem by mohla být také zapříčiněna větším obsahem plochy, která se vyrábí podle procesních parametrů pro převisy. Pravděpodobně toto nastavení není ideální pro výrobu prutů a způsobovalo výrazné deformace tlustších prutů, které vedly až ke ztrátě vyrobiteľnosti.

U kolmých prutů při výšce vrstvy 30 μm docházelo k lokálním geometrickým nepřesnostem. V některých místech prutu byl průřez výrazně rozšířen. Nejednalo se o nalepený prášek, ale o navařený materiál, který byl s prutem pevně spojen. Tento jev byl pravděpodobně způsoben taky větší hustotou vnesené energie. Při výrobě nejtlustšího prutu o průměr 1,5 mm se tento jev neobjevoval. Při ponechání stejných procesních parametrů s jedinou změnou prodlevy mezi jednotlivými vrstvami ze 12 na 35 sekund se tento jev přestal objevovat.

Z grafů lze vidět, že výsledky jsou pro všechny průměry podobné. Jediným výrazným rozdílem byl kritický úhel pro rozdílné průměry. Průměr Gausova válce zůstává konstantní i při menších úhlech při použití menší výšky vrstvy. Průměr opsaného válce s klesajícím úhlem výrazně roste. Tento jev je způsoben nalepeným práškem ze spodní strany. Průměry prutů si při větších úhlech drží zápornou úchylku, což bylo podle rešerše očekávané.

Opsané válce u prutů s menším průměrem vyráběných s výškou vrstvy 30 μm mají vyšší hodnoty. Tato odchylka byla způsobena výše popsány lokálními rozměrovými nepřesnostmi.

Struktury vyrobené s výškou vrstvy 30 μm měly menší množství nalepeného prášku ze spodní strany. Tím byla dosažena lepší rozměrová přesnost. Tento rozdíl byl pravděpodobně zapříčiněn menším rozměrem převisu na jednotlivou vrstvu. Průměry prutů měly převážně zápornou úchylku. Pruty vyrobené s výškou vrstvy 50 μm měly průměr větší než nominální.

Rozdílná barva horních a spodních stran struktur způsobilo rozdílné nastavení pro plochy převisů, tedy spodní strany prutů. Při výrobě spodních stran prutů byla vnesená energie velká a docházelo tak k přepalování materiálu. Toto přepalování způsobilo změnu barvy spodní strany struktury. Díky tomu, že pruty nebyly příliš dlouhé, bylo možné vyrobit struktury bez deformací. Při výrobě struktur s většími elementárními buňkami by tento jev mohl vést k výrazným deformacím prutů ve struktuře.

Výsledky impact testu byly předpokladatelné. Na stejnou deformaci je zapotřebí větší síly pro strukturu vyrobenou s výškou vrstvy 50 μm . Tento rozdíl byl způsoben převážně rozdílnými průměry prutů.

7 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo ověřit, zda má výška vrstvy vliv na výrobu a vlastnosti mikro-prutových struktur vyráběných technologií SLM. Tento vliv byl zkoumán jak na samostatných prutech, ze kterých se mikro-prutové struktury skládají, tak i na celých strukturách.

Byla navržena sada zkušebních prutů, která byla vyrobena s výškou vrstvy 30 a 50 μm . Vyrobené pruty byly následně digitalizovány a byly odečteny hodnoty opsaných, vepsaných a Gausových válců.

Ukázalo se, že při použití nižší výšky vrstvy lze dosáhnout vyšší rozměrové přesnosti i pro menší úhel sevřený s podložkou. Na druhou stranu pruty s větším průměrem nebyly při menších úhlech vůbec vyrobeny. Tento jev byl pravděpodobně zapříčiněn nevhodným nastavením procesních parametrů pro plochy převisů.

Prodloužení časové prodlevy mezi spékáním jednotlivých vrstev mělo pozitivní vliv na geometrickou přesnost prutů kolmých k podložce. Pruty vyrobené s větší prodlevou neměly po obvodu nalepené kapky materiálu a jejich průměr dosahoval konstantních hodnot.

Mikro-prutové struktury vyrobené s nižší výškou vrstvy měly menší množství nalepeného prášku ze spodní strany. Hmotnost těchto struktur byla menší než hmotnost struktur vyráběných s vyšší výškou. Vyšší hmotnost struktur stavěných s větší výškou byla zapříčiněna nalepeným práškem ze spodní strany prutů.

Během práce bylo zjištěno, že snižování výšky vrstvy může snížit množství nalepeného prášku ze spodní strany prutů v mikro-prutové struktuře. Nevýhodou však je delší doba výroby. Přímý vliv výšky vrstvy na kritický úhel nebyl prokázán, protože výrobu výrazně ovlivňovaly nastavené procesní parametry pro plochy převisů. Pro další zkoumání vlivu výšky vrstvy na kvalitu dílů by bylo vhodné optimalizovat procesní parametry zejména pro plochy převisů při nižších výškách vrstev. Optimalizace by mohla zabránit vyššímu množství hustoty vnesené energie a tím zamezit přepalování spodních stran prutů a jejich tepelné deformaci při výrobě.

Všechny cíle bakalářské práce byly splněny.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] „Vypečená“ konzola míří z tiskárny do vesmíru - *Nápady a objevy – Zprávy z VUT* [online]. [vid. 2019-05-14]. Dostupné z: https://zvut.cz/napady-objevy/napady-a-objevy-f38103/vypecena-konzola-miri-z-tiskarny-do-vesmiru-d103894?aid_redir=1
- [2] YAP, C. Y., C. K. CHUA, Z. L. DONG, Z. H. LIU, D. Q. ZHANG, L. E. LOH a S. L. SING. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*. 2015, **2**(4), 041101. ISSN 1931-9401. Dostupné z: doi:10.1063/1.4935926
- [3] KESSLER, J., N. BÂLC, A. GEBHARDT a K. ABBAS. Basic research on lattice structures focused on the strut shape and welding beads. *Physics Procedia*. 2016, **83**, 833–838. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2016.08.086
- [4] KESSLER, J., N. BALC, A. GEBHARDT a K. ABBAS. Basic design rules of unit cells for additive manufactured lattice structures. *MATEC Web of Conferences*. 2017, **137**, 02005. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201713702005
- [5] PANTĚLEJEV, L., R. VRÁNA, J. KAISER, T. ZIKMUND, D. PALOUŠEK, J. JAROŠ a D. KOUTNÝ. Selective Laser Melting Strategy for Fabrication of Thin Struts Usable in Lattice Structures. *Materials*. 2018, **11**(9), 1763 [vid. 2019-03-06]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11091763
- [6] QIU, C., S. YUE, N. J.E. ADKINS, M. WARD, H. HASSANIN, P. D. LEE, P. J. WITHERS a M. 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*. 2015, **628**, 188–197 [vid. 2019-03-08]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/J.MSEA.2015.01.031
- [7] LEARY, M., M. MAZUR, J. ELAMBASSERIL, M. MCMILLAN, T. CHIRENT, Y. SUN, M. QIAN, M. EASTON a M. BRANDT. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials and Design*. 2016, **98**, 344–357 [vid. 2019-03-06]. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.02.127
- [8] SANTORINAIOS, M., W. BROOKS, C. J. SUTCLIFFE a R. A. W. MINES. Crush Behaviour Of Open Cellular Lattice Structures Manufactured Using Selective Laser Melting. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2006, **85** [vid. 2019-03-30]. ISSN 1746-4498. Dostupné z: doi:10.2495/HPSM060471
- [9] GÜMRÜK, R. a R. A W MINES. Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013, **68**, 125–139. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2013.01.006
- [10] SHEN, Y., S. MCKOWN, S. TSOPANOS, C. J. SUTCLIFFE, R. A.W. MINES a W. J. CANTWELL. The mechanical properties of sandwich structures based on metal lattice architectures. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2010, **12**(2), 159–180. ISSN 10996362. Dostupné z: doi:10.1177/1099636209104536
- [11] SMITH, M., Z. GUAN a W.J. CANTWELL. Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013, **67**, 28–41 [vid. 2019-03-30]. ISSN 0020-7403. Dostupné z: doi:10.1016/J.IJMECSCI.2012.12.004

- [12] HAO, L, D RAYMONT, C YAN, A HUSSEIN a P YOUNG. Design and additive manufacturing of cellular lattice structures. In: *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*. B.m.: CRC Press, 2011, s. 249–254. ISSN 9780415684187. Dostupné z: doi:10.1201/b11341-40
- [13] YAN, C., L. HAO, A. HUSSEIN a D. RAYMONT. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012, **62**, 32–38 [vid. 2019-03-30]. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:10.1016/J.IJMACHTOOLS.2012.06.002
- [14] YAN, Ch., L. HAO, A. HUSSEIN, P. YOUNG a D. RAYMONT. Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. *Materials & Design*. 2014, **55**, 533–541 [vid. 2019-04-04]. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATDES.2013.10.027
- [15] DELGADO, J., J. CIURANA a C. A. RODRÍGUEZ. Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012, **60**(5–8), 601–610. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-011-3643-5
- [16] NGUYEN, Q.B., D.N. LUU, S.M.L. NAI, Z. ZHU, Z. CHEN a J. WEI. The role of powder layer thickness on the quality of SLM printed parts. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018, **18**(3), 948–955 [vid. 2019-03-30]. ISSN 1644-9665. Dostupné z: doi:10.1016/J.ACME.2018.01.015
- [17] HERZOG, D., V. SEYDA, E. WYCISK a C. EMMELMANN. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 2016, **117**, 371–392 [vid. 2019-03-31]. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2016.07.019
- [18] SUFIAROV, V. Sh, A. A. POPOVICH, E. V. BORISOV, I. A. POLOZOV, D. V. MASAYLO a A. V. ORLOV. The Effect of Layer Thickness at Selective Laser Melting. In: *Procedia Engineering*. B.m.: Elsevier, 2017, s. 126–134 [vid. 2019-03-31]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.01.179
- [19] ČERVINEK, O. Výpočtový model dynamického zatěžování mikro-prutové struktury vyrobené technologií Selective Laser Melting. *Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství*. 2018, 100.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

<i>BCC</i>	kubická prostorově středěná buňka
<i>BCCZ</i>	kubická prostorově středěná buňka s pruty v ose Z
<i>CAD</i>	<i>computer aided design</i>
<i>FBC CZ</i>	kubická plošně i prostorově středěná buňka s pruty v ose Z
<i>FCC</i>	kubická plošně středěná buňka
<i>FCCZ</i>	kubická plošně středěná buňka s pruty v ose Z
<i>SLM</i>	selective laser sintering
<i>STL</i>	formát souboru
<i>E</i>	hustota vnesené energie
<i>h</i>	hatch distance
<i>t</i>	výška vrstvy
<i>v</i>	skenovací rychlost
<i>P</i>	výkon laseru

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 1-1	Konzole satelitu z mikro-prutové struktury. [1].....	12
obr. 2-1	Přehled jednotlivých procesních parametrů pro SLM technologii: výkon laseru (laser power), výška vrstvy (layer thickness), skenovací rychlost (scanning speed), vzdálenost mezi jednotlivými návary (hatch distance). [2].....	13
obr. 2-2	Zkušební vzorky, které použila Kessler a kolegové v jejich výzkumu. [3]	14
obr. 2-3	(a) Prut se stopami po svařování a nalepeným práškem ze spodní strany [4]; (b) schéma tepelného přenosu při tisku. [5].....	15
obr. 2-4	(a) Graf závislost porozity na výkonu laseru při konstantní skenovací rychlosti doplněný o snímky z mikroskopu; (b) graf závislosti průměru prutu na výkonu laseru. [6]	15
obr. 2-5	Rozdílné sklony prutů pro jednotlivé typy krychlových elementárních buněk. Modré 0°, zelené 35,3°, žluté 45°, červené 90°. [7].....	16
obr. 2-6	Typy jednotlivých elementárních buněk: BCC (Kubická prostorově středěná), FCC (Kubická plošně středěná), BCCZ (Kubická prostorově středěná s pruty ve směru osy Z), FCCZ (Kubická plošně středěná s pruty ve směru osy Z), FBCCZ (Kubická plošně i prostorově středěná s pruty ve směru osy Z) [7].....	16
obr. 2-7	Deformační křivky nerezového mikro-prutu o průměru 210 μm vyrobeným (a) výkonem laseru 90 W s expozicí 1000 μm; (b) výkonem laseru 140 W a expozicí 500 μm. [9]	17
obr. 2-8	Porovnání deformací experimentálního a prutového modelu buněk o velikosti (a) 2,5 mm; (b) 1,25 mm.	18
obr. 2-9	BCC buňky s poměrem stran: (a) 1; (b) 0,9; (c) 0,8; (d) 0,7; (e) 0,6. .	18
obr. 2-10	(a) Schoenův Gyroid; (b) Swartz Dimond struktura. [12]	19
obr. 2-11	Snímky z elektronového mikroskopu (a) pruty gyroidní struktury s velikostí buňky 2 mm; (b) prasklina v řezu prutu; (c) nalepený prášek na stěnách prutu; (d) detail nalepené částice na stěně prutu.	20
obr. 4-1	(a) Původní navržené těleso; (b) použité zkušební těleso.	24
obr. 4-2	Výsledné uspořádání zkušebních těles. Žlutě je tisková podložka a šedě zkušební těleso.	25

obr. 4-3	Připravená série vzorků na podporách. Modře jsou podpory, tmavě šedě vzorky, světle šedě tisková platforma a červeně je vyhrazen prostor nutný k odšroubování platformy ze stroje.	25
obr. 4-4	Použité skenovací strategie pro všechny průměry vyráběné pod úhlem 20°. Zeleně jsou upravené oblasti převisů, červeně obrysy a žlutě jsou výplně.	26
obr. 4-5	Proces odstraňování kovového prášku.	26
obr. 4-6	(a) Mikro-prutová struktura vymodelovaná v programu Solidworks. Červeně podpory, šedě je výsledná struktura. (b) Struktury vyrobené s výškou vrstvy 30 μm	27
obr. 4-7	Zkušební vzorek olepený kontrolními body pro 3D skenování.	28
obr. 4-8	Vzorky tištěné s výškou vrstvy 50 μm	28
obr. 4-9	Zabroušené plochy ze spodní strany struktury.	29
obr. 4-10	Rozdílná deformace po impact testu struktury vyráběné s výškou vrstvy (a) 30 μm ; (b) 50 μm	29
obr. 5-1	Porovnání vyrobených těles s CAD modelem.	31
obr. 5-2	Graf srovnání průměrů opsaných, vepsaných a Gausových válců pro prut s nominálním průměrem 1,5 mm.	31
obr. 5-3	Graf srovnání průměrů opsaných, vepsaných a Gausových válců pro prut s nominálním průměrem 1 mm.	32
obr. 5-4	Graf srovnání průměrů opsaných, vepsaných a Gausových válců pro prut s nominálním průměrem 0,6 mm.	32
obr. 5-5	Lokální rozměrová nepřesnost u prutů stavěných s výškou vrstvy 30 μm . (a) Průměr 0,6 mm; (b) 1 mm.	33
obr. 5-6	Prut stavěný pod úhlem 15° stavěný s výškou vrstvy (a) 30 μm , (b) 50 μm	33
obr. 5-7	Prut s průměrem 1,5 mm vyráběný s výškou vrstvy 30 μm (a) začátek prutu; (b) pokračování prutu.	34
obr. 5-8	Prut s průměrem 1,5 mm vyráběný s výškou vrstvy 30 μm	34
obr. 5-9	Rozdílné množství nalepeného prášku ze spodní strany prutů ve struktuře vyráběné s výškou vrstvy (a) 30 μm ; (b) 50 μm	35
obr. 5-10	Rozdíl barvy a spodní (vlevo) a vrchní (vpravo) strany struktury vyráběné s výškou vrstvy 30 μm	35
obr. 5-11	Graf výsledků z impact testu.	36

11 SEZNAM TABULEK

tab. 5-1	Porovnání vyrobitelnosti jednotlivých prutů. Červeně jsou pruty, které musely být při stavbě zastaveny, žlutě pruty, které se vyrobily až do konce, ale byly velice nekvalitní. Zeleně jsou pruty vyrobené bez problémů.	30
-----------------	---	----