



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# VÝVOJ PROCESNÍCH PARAMETRŮ TECHNOLOGIE SELECTIVE LASER MELTING PRO VÝROBU LISOVACÍ FORMY PNEUMATIK

DEVELOPMENT OF SLM PROCESS PARAMETERS FOR MANUFACTURING OF MOLD SEGMENT FOR  
MOLDING TIRES

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Lukáš Měchura**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Martin Rapant**

**BRNO 2018**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Lukáš Měchura**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Konstrukční inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Martin Rapant**  
Akademický rok: 2017/18

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 diplomové práce:

## **Vývoj procesních parametrů technologie Selective Laser Melting pro výrobu lisovací formy pneumatik**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Výroba segmentů forem pneumatik vyžaduje využití technologických procesů (přenesení tvarů přes několik otiskových forem), které jsou značně finančně náročné a limitují tvarovou komplikovanost drážek pneumatiky. Moderní výrobní procesy již využívají lamely pro otisk drážek pneumatiky jenž jsou vyrobené aditivní technologií z kovového prášku. Další technologickou výzvou je výroba celých segmentů formy, které obsahují velmi komplikované tvarové prvky s vysokými nároky na kvalitu povrchu a pevnost celého segmentu.

Typ práce: výzkumná

Projekt: vývojová zakázka (HS)

### **Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem je optimalizovat procesní parametry pro výrobu segmentu formy pomocí aditivní technologie SLM, kde segment bude tvořen kombinací struktur, skořepin, tenkých lamel a objemových částí.

Dílčí cíle diplomové práce:

- identifikovat technologické limity SLM technologie pro výrobu segmentu,
- navrhnout experimentální tělesa, metody testování a vyhodnocení,
- optimalizovat výrobní strategii pro strukturované a objemové části segmentu,
- experimentálně ověřit výrobní strategii na dílčích částech segmentu.

Požadované výstupy: funkční vzorek, průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2018.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf)

### **Seznam doporučené literatury:**

YADROITSEV, I. Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Saarbrücken: LAP Lambert, 2009, 266 s. ISBN 978-3-8383-1794-6.

KEMPEN, K., E. YASA, L. THIJSS, J.-P. KRUTH a J. VAN HUMBEECK. Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel. Physics Procedia [online]. 2011, roč. 12, s. 255–263. ISSN 18753892. Získáno z: doi:10.1016/j.phpro.2011.03.033

SANZ, C. a V. GARCÍA NAVAS. Structural integrity of direct metal laser sintered parts subjected to thermal and finishing treatments. Journal of Materials Processing Technology [online]. 2013, roč. 213, č. 12, s. 2126–2136. ISSN 09240136. Získáno z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2013.06.013

CASATI, R., LEMKE, J., MASNERI, C., VEDANI M. Influence of Heat Treatment Condition on Properties of 1.2709 Maraging Steel Fabricated by Selective Laser Melting. In: World PM2016 Congress Proceedings. [CD]. 2016.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá nalezením vhodných procesních parametrů pro výrobu lisovacího segmentu formy pomocí technologie SLM. Ten je tvořen kombinací struktur, skořepin, tenkých lamel a objemových částí. Zkoumaným materiálem je martenziticky vytvrditelná nástrojová ocel 1.2709. Rešeršní část práce pojednává o problematice volby vhodných procesních parametrů, jako jsou výkon a rychlost laseru, vzdálenost šraf a tloušťka vrstvy. Byly také zkoumány dosažitelné mechanické vlastnosti dílů a volba vhodné struktury. Byly nalezeny vhodné procesní parametry pro tisk objemových a strukturních částí.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Aditivní výroba, lisovací forma, martenzitická ocel 1.2709

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with finding suitable process parameters for the production of molding segment by SLM technology. It consists of a combination of structures, shells, thin slats and bulk parts. The tested material is maraging steel 300. The research part deals with the problem of choice of suitable process parameters, such as laser power and speed, hatch distance and thickness of the built layer. The achievable mechanical properties of the parts and the choice of the suitable structure were also examined. In the thesis were found suitable process parameters for printing of bulk parts and structures.

## **KEYWORDS**

Selective laser melting, molding segment, maraging steel 300



Bibliografická citace: MĚCHURA, L. *Vývoj procesních parametrů technologie Selective Laser Melting pro výrobu lisovací formy pneumatik*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 97 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Rapant.



Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Martinu Rapantovi a garantovi panu doc. Ing. Danielovi Koutnému, Ph.D. za cenné připomínky, rady a čas strávený při konzultacích diplomové práce. Dále patří velké poděkování průmyslovému partnerovi za poskytnutí možnosti aktivně se podílet na vývoji nové technologie SLM. Také bych chtěl poděkovat svojí rodině za podporu.

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci Vývoj procesních parametrů technologie Selective Laser Melting pro výrobu lisovací formy pneumatik jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Martina Rapanta. Současně prohlašuji, že jsem v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 18. května 2018

.....  
Lukáš Měchura



**OSBAH**

<b>1 ÚVOD</b>	<b>12</b>
<b>2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>13</b>
2.1 Technologie SLM	13
2.2 Procesní parametry	13
2.3 Vysokopevnostní ocel 1.2709	14
2.4 Použití oceli 1.2709 v SLM	14
<b>3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>35</b>
3.1 Analýza problému	35
3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše	35
3.3 Podstata a cíle diplomové práce	36
<b>4 MATERIÁL A METODY</b>	<b>37</b>
4.1 Postup řešení	37
4.2 Práškový materiál	37
4.3 Výrobní zařízení	38
4.3.1 Nastavitelné procesní parametry	38
4.4 Výběr procesních parametrů	39
4.5 Proces zpracování vzorků	39
4.6 Optimalizace procesních parametrů struktur	40
4.6.1 Experimentální ověření vhodnosti volby mřížkové struktury	40
4.6.2 Vyladění procesních parametrů pro jeden typ buňky	40
4.6.3 Tisk struktury se skořepinou	41
4.7 Optimalizace procesních parametrů objemových vzorků	43
4.7.1 Tahové vzorky	44
4.8 Tisk lisovacího segmentu	45
<b>5 VÝSLEDKY</b>	<b>48</b>
5.1 Strukturní díly	48
5.1.1 Volba struktury	48
5.1.2 Optimalizace procesních parametrů struktury FCCZ	48
5.1.3 Tisk skořepiny na strukturu	51
5.2 Objemové díly	57
5.2.1 Tvrdost objemových dílů	57
5.2.2 Porozita objemových dílů	58
5.3 Tahové vzorky	61
5.4 Lisovací segment	63
5.4.1 Čtvrtina segmentu	64
5.4.2 Optimalizace objemové části	66
5.4.3 Funkční vzorek	68
<b>6 DISKUZE</b>	<b>70</b>
<b>7 ZÁVĚR</b>	<b>72</b>
<b>8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>73</b>
<b>9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>76</b>
<b>10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>77</b>
<b>11 SEZNAM TABULEK</b>	<b>79</b>
<b>12 SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>80</b>

## 1 ÚVOD

Lisovací forma segmentu pneumatiky je tvarově velmi složitá. Pro její výrobu je tradičně použito technologie odlévání. Výroba formy pro odlití je velmi časově i finančně náročná. V jejím průběhu je použito její přenesení přes několik obtiskových forem. Po samotném odlití jsou boční stěny lisovacího segmentu obráběny a jsou do něj vrtány technologické otvory. Proto bylo rozhodnuto o její výrobě pomocí aditivních technologií.

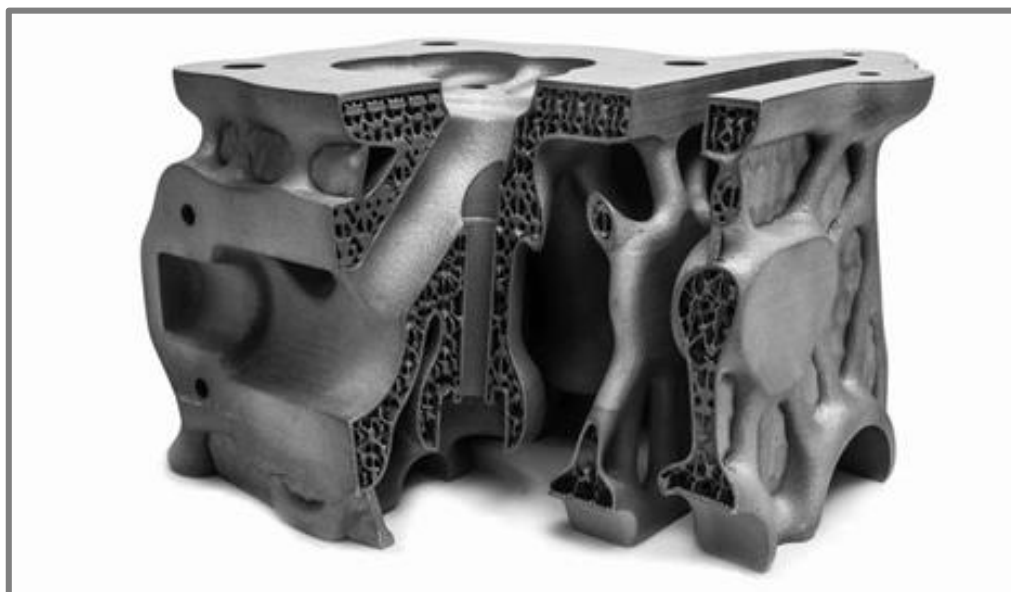
Nejvýznamnější aditivní metoda, kterou lze vyrábět kovové díly je Selective Laser Melting. Vzhledem k tomu, že je součást tisknuta z práškového materiálu s velmi malými částicemi, je možné vyrábět komplexní díly. Ty již není nutné po tisku obvykle složitě opracovávat. Také je možné uvnitř dílu vytvořit struktury, které vyrobený díl odlehčí, přičemž zůstanou zachované požadované mechanické vlastnosti.

V současnosti již probíhá aditivní technologií výroba lamel pro segment. Ty jsou po výrobě zasazeny do silikonové formy [1]. Dalším logickým krokem je proto výroba celého lisovacího segmentu. Forma vyrobená aditivní technologií bude složena z kombinace struktur, skořepiny, tenkých lamel a objemových částí.

Je proto nutné najít optimální kombinaci procesních parametrů, při kterých by byly přesně a s minimální porozitou vyrobeny všechny tyto části. Proměnnými procesními parametry jsou například výkon laseru, rychlost skenování, šrafovací vzdálenost a skenovací strategie. Jejich ideální hodnoty jsou pro každý materiál jiné, a je proto nutné je experimentálně vyhledat. To je také cílem této práce.

Práci jsem si vybral z důvodu aktuálnosti tématu, a protože je mi téma 3D tisku velmi blízké. Významnou měrou k volbě práce přispěl také fakt, že průmyslový partner kde byl výzkum prováděn sídlí v místě mého bydliště.

Souběžně byla vypracována i diplomová práce Konstrukce segmentu formy pro lisování pneumatik vyráběného technologií Selective Laser Melting, kterou zpracoval Bc. Adrián Kvaššay. Tato práce se zabývala MKP výpočty zatěžování struktur a úpravou konstrukce segmentu pro technologii SLM.



Obr. 1.1 Strukturami odlehčený díl vyrobený pomocí SLM technologie [2]

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2

### 2.1 Technologie SLM

2.1

Selective Laser Melting je aditivní metoda výroby součástí. Využívá se při ní energie laserového paprsku, jenž taví jednotlivé vrstvy kovového prášku a ten se poté spojí do požadovaného tvaru. Tyto vrstvy bývají obvykle tlusté 20–60  $\mu\text{m}$ . Před tiskem další vrstvy je nutné snížit platformu o výšku této vrstvy. Proces se pak opakuje až do úspěšného vytisknutí celé součásti.

Využití SLM technologie nalezneme především ve výrobě součástí, které nelze zhotovit konvenčními metodami a ve výrobě prototypů například pro letectví.

### 2.2 Procesní parametry

2.2

Procesních parametrů, na kterých je SLM proces závislý je velmi mnoho, ovšem jen některé z nich je možné efektivně ovlivnit. Těmi jsou:

Výkon laseru – základní parametr zařízení, na kterém závisí mnoho dalších procesních parametrů, jeho obvyklá hodnota je od 100 do 500 W

Rychlost skenování – je to rychlost pohybu laserového paprsku

Vzdálenost šraf – vzdálenost mezi dvěma sousedícími průjezdy laseru

Tloušťka vrstvy – vzdálenost, o kterou poklesne platforma po tisku jedné vrstvy

Skenovací strategie – trajektorie, po které se pohybuje laser při tisku dílu, jejich podrobné rozdělení je popsáno v kapitole 4.3.1

Z těchto parametrů je možné vypočítat plošnou a objemovou hustotu energie, se kterou je materiál taven, což může být nápomocné pro výběr vhodných procesních parametrů.

Plošná hustota energie:

$$E_S = \frac{L_p}{L_s \cdot B_d}$$

kde:

$E_S$	$\text{J/mm}^2$	- plošná hustota energie
$L_p$	W	- výkon laseru
$L_s$	mm/s	- rychlost skenování
$B_d$	mm	- průměr laserového paprsku

Objemová hustota energie:

$$E_V = \frac{L_p}{L_s \cdot H_d \cdot L_t}$$

kde:

$E_V$	$\text{J/mm}^3$	- objemová hustota energie
$L_p$	W	- výkon laseru
$L_s$	mm/s	- rychlost skenování
$H_d$	mm	- vzdálenost šraf
$L_t$	mm	- tloušťka vrstvy

### 2.3 Vysokopevnostní ocel 1.2709

Tato ocel má velmi dobré mechanické vlastnosti. Pro potřeby 3D tisku pomocí SLM technologie je dodáván ve stavu jemnozrnného prášku. Jeho obvyklé chemické složení je v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Chemické složení oceli 1.2709 [3]

(%)	Fe	Ni	Co	Mo	Ti	Cr	Al	Si	Mn	C
<b>minimum</b>	64,6	17	8,5	4,5	0,6	0	0,05	0	0	0
<b>maximum</b>	69,4	19	9,5	5,2	0,8	0,5	0,15	0,1	0,1	0,03

Materiál je snadno tepelně zpracovatelný pomocí procesu stárnutí, čímž lze dosáhnout vysoké pevnosti i tvrdosti. V tabulce 2.2 je porovnání mechanických vlastností po tisku této slitiny pomocí SLM technologie a po následném tepelném zpracování stárnutím při teplotě 490 °C po dobu 6 hodin.

Tab. 2.2 Mechanické vlastnosti oceli 1.2709 [3]

Stav	Tvrdost (HRC)	R <sub>e</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	E (GPa)	A (%)
<b>Po tisku</b>	33–37	900–1100	1000–1200	160–200	5–11
<b>Po tepelném zpracování</b>	50–54	1800–2000	1670–2230	160–200	1–3

Použití této oceli je pro výrobu nástrojů na vstřikování plastů, děrování a tlakové lití lehkých kovových slitin. Její uplatnění je pro namáhané díly letadel a části závodních motorů.

### 2.4 Použití oceli 1.2709 v SLM

Tato slitina byla již mnohokrát k 3D tisku metodou SLM testována.

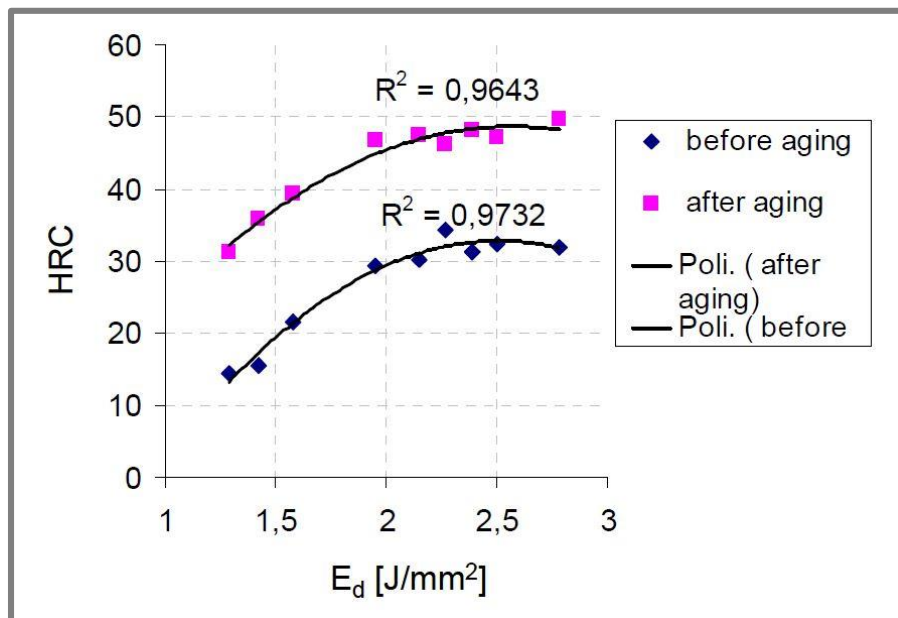
*Campanelli et al.* [4] je nejstarší práce zabývající se problematikou SLM tisku oceli 1.2709. Procesní parametry laseru použité v této práci jsou shrnuty v tabulce 2.3.

Tab. 2.3 Procesní parametry [4]

Výkon laseru	57, 86, 100 W
Rychlost skenování	180, 200, 220 mm/s
Tloušťka vrstvy	30 μm
Vzdálenost šraf	140 μm
Průměr laserového paprsku	200 μm

Práškový materiál použitý při studii měl kulovité částice, jejichž velikost byla menší než 40 μm. Bylo vyrobeno 9 objemových vzorků o velikosti 15x15x10 mm, přičemž každý z nich byl vyráběn s jinou kombinací výkonu laseru a rychlosti skenování. Bylo zjištěno, že při výkonu laseru 100 W a skenovací rychlosti 180 mm/s je možné dosáhnout výroby součástí s hustotou 99,9 %, tvrdosti 35 HRC a mezí pevnosti 1085 MPa. Všechny tři parametry rostou se zvyšující se plošnou hustotou energie. Ta byla v tomto případě 2,78 J/mm<sup>2</sup>.

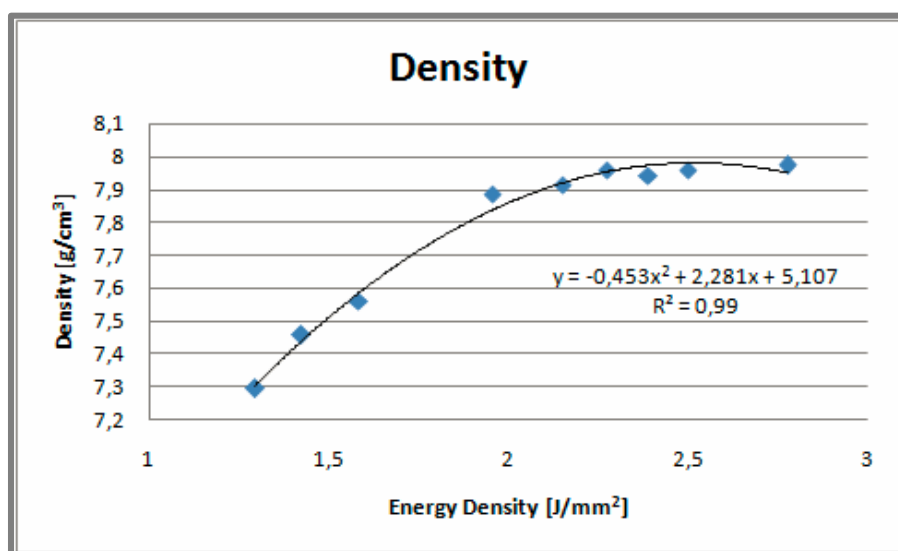
V této práci bylo provedeno také tepelné zpracování vzorků. Ty byly vytvrzené stárnutím, které probíhalo při teplotě 490 °C po dobu 6 hodin a následně vzduchem ochlazený na pokojovou teplotu. Závislost dosažené tvrdosti na plošné hustotě energie je znázorněna na obrázku 2.1. Pro porovnání je možné vidět i hodnoty tepelně nezpracovaných vzorků.



Obr. 2.1 Závislost tvrdosti na plošné hustotě energie [4]

Tvrdość se po stárnutí zvýšila na téměř 50 HRC. Byl také zaznamenán nárůst meze pevnosti na hodnotu 2097 MPa.

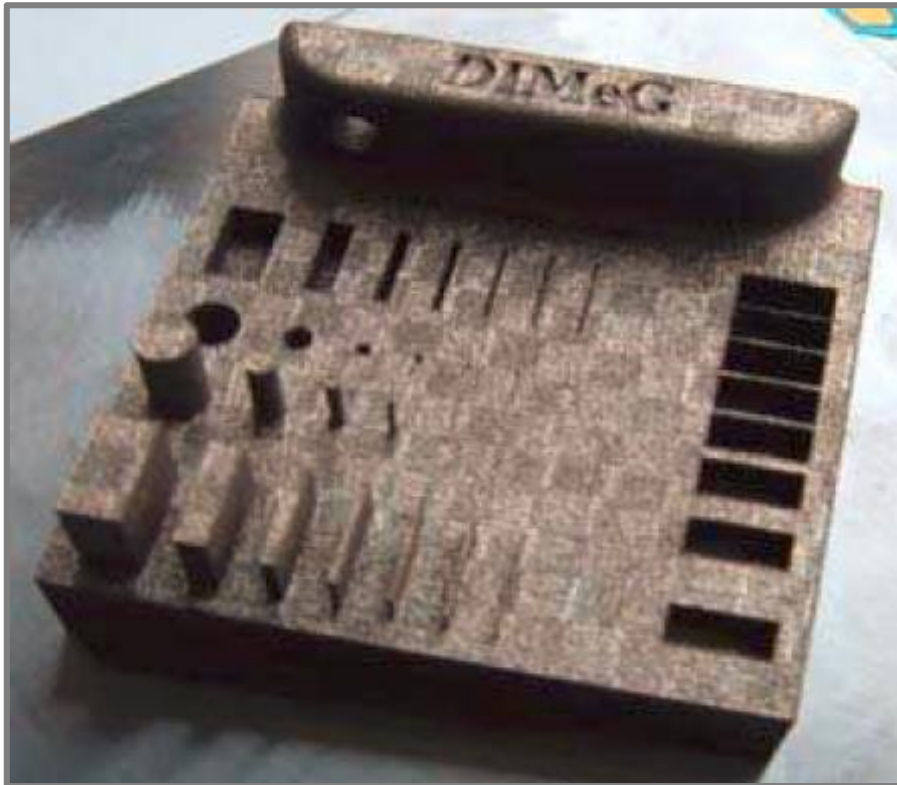
*Campanelli et al.* [5] ve své další práci již zkoumali závislost plošné hustoty energie na hustotě vyrobených dílů. Ta byla měřena Archimedovou metodou, která spočívá v porovnání hmotnosti dílu na vzduchu a v etanolu. Procesní parametry byly zvoleny stejně jako v [4]. Závislost hustoty vyrobených dílů na plošné hustotě energie je na obrázku 2.2.



Obr. 2.2 Závislost hustoty vyrobených dílů na hustotě energie [5]

Maximální hustota vyrobených dílů byla  $8 \text{ g/cm}^3$ , přičemž minimální porozita byla přibližně 0,01 %. Další částí studie této práce bylo ověření rozměrové přesnosti dílů postavených vhodnými procesními parametry, které byly nalezeny v předchozí studii [3].

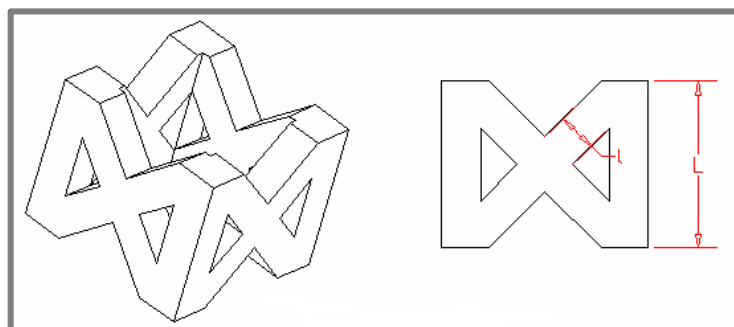
Druhým cílem tohoto testu bylo zjištění minimální možné velikosti rozměrových prvků, které je možné touto metodou vyrobit. Testovací součást o rozměrech  $70 \times 70 \times 25 \text{ mm}$  obsahující válcové, kvádrové a tenkostěnné prvky je na obrázku 2.3.



Obr. 2.3 Test vyrobitelnosti rozměrových dílů [5]

Bylo zjištěno, že SLM proces je vhodný pro stavbu dílů o nominálních rozměrech větších než 0,4 mm. V případě menších rozměrů totiž narůstají rozměrové odchylky z důvodu, že se nominální velikost dílu přibližuje k hodnotě průměru paprsku laseru. Odchylka nominální a změřené hodnoty prvku byla proto větší než 10 %.

Obsahem práce byl také tisk mřížkových struktur. Pro studii byla zvolena struktura FCCZ viz. obrázek 2.4.



Obr. 2.4 Struktura FCCZ [5]

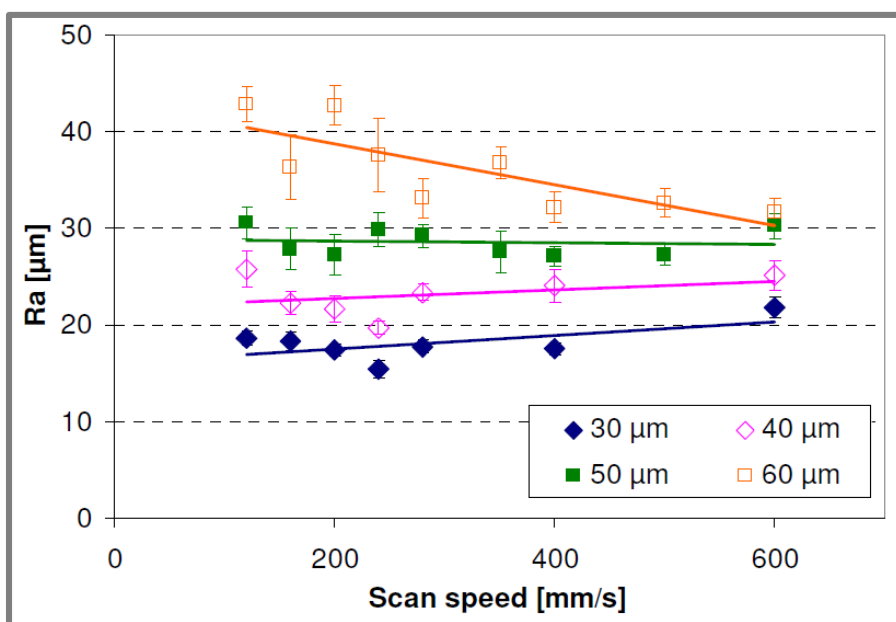
Byly zvoleny dvě velikosti buněk L a to sice 2 a 3 mm. V prvním případě byla tloušťka stěny 1 0,5 mm, zatímco pro větší buňku 0,7 mm. Pro obě dvě konfigurace byly vytisknuty vzorky o velikosti 8x8 buněk a provedeny tlakové zkoušky. Mez kluzu vzorku s menšími buňkami byla 1250 MPa, zatímco s buňkami většími 590 MPa.

*Yasa et al.* [6] studovali vliv změny skenovací rychlosti a tloušťky vrstvy na drsnost povrchu, mikro a makro tvrdost. Procesní parametry zvolené při této studii jsou zobrazeny v tabulce 2.4.

Tab. 2.4 Procesní parametry [6]

Výkon laseru	105 W
Rychlost skenování	120–600 mm/s
Tloušťka vrstvy	30–60 $\mu\text{m}$
Vzdálenost šraf	125 $\mu\text{m}$
Průměr laserového paprsku	180 $\mu\text{m}$

Velikost částic prášku byla 25–63  $\mu\text{m}$ . Byla použita ostrůvková skenovací strategie, kdy byly jednotlivé vrstvy rozděleny do oblastí 5x5 mm. Každý z ostrůvků je skenován v náhodném pořadí, přičemž směr skenování sousedících ostrůvků svírá vždy pravý úhel. Drsnost povrchu byla měřena na horní straně postavených dílů. Její závislost na skenovací rychlosti je na obrázku 2.5.



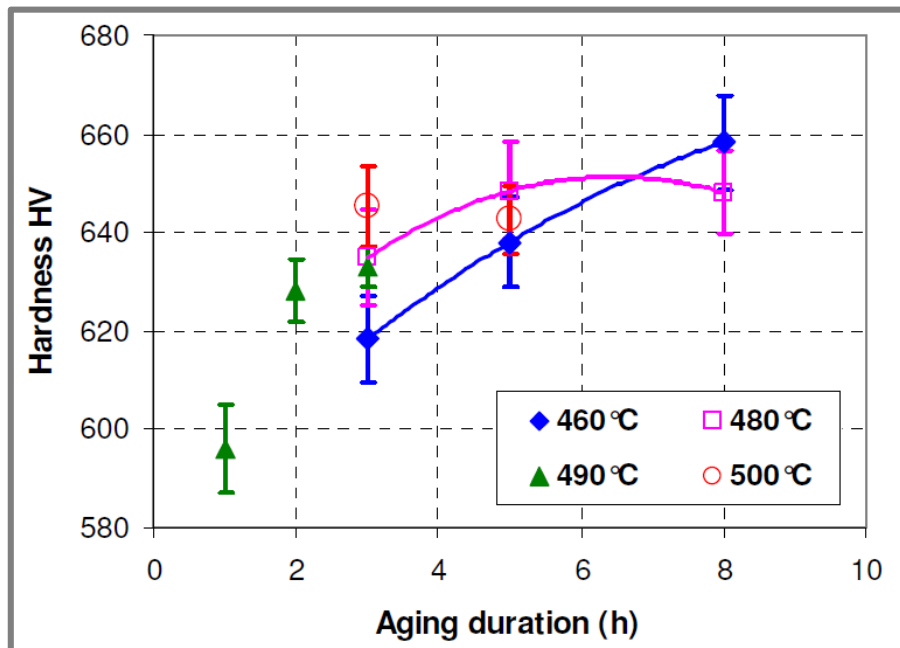
Obr. 2.5 Závislost drsnosti povrchu na rychlosti skenování [6]

Je možné vidět, že nižší drsnosti povrchu je možné dosáhnout v případě nižší tloušťky vrstvy a je téměř nezávislá na skenovací rychlosti. Nejmenší drsnosti povrchu 16  $\mu\text{m}$  bylo dosaženo při rychlosti skenování 250  $\text{mm/s}$  a tloušťce vrstvy 30  $\mu\text{m}$ .

Makro tvrdost byla měřena na vertikálním řezu vzorků. Pro nízké rychlosti 100–300  $\text{mm/s}$  bylo v případě nejmenší tloušťky vrstvy dosaženo tvrdosti více než 238 HV. Pro vyšší rychlosti skenování již změřená tvrdost zřetelně klesá. V případě mikro tvrdosti bylo složité najít v případě vzorků s vyšší porozitou vhodné oblasti

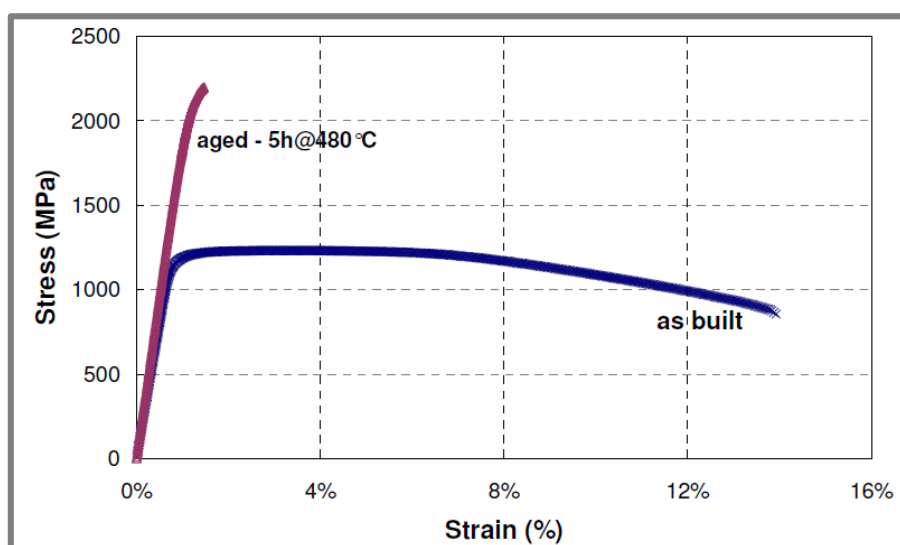
k provedení spolehlivé zkoušky. Naměřená tvrdost se pro všechny vzorky pohybovala mezi hodnotami 400–425 HV.

Byl také zkoumán vliv opětovného přetavování na porozitu i tvrdost. Bylo zjištěno, že v případě přetavení je možné zvýšit relativní hustotu o 0,1 %, přičemž se ovšem 1,5x zvýší čas výroby. Posledním zkoumaným jevem byl vliv tepelného zpracování na tvrdost vzorků. Výsledek tohoto experimentu je na obrázku 2.6.



Obr. 2.6 Závislost tvrdosti na době tepelného zpracování [6]

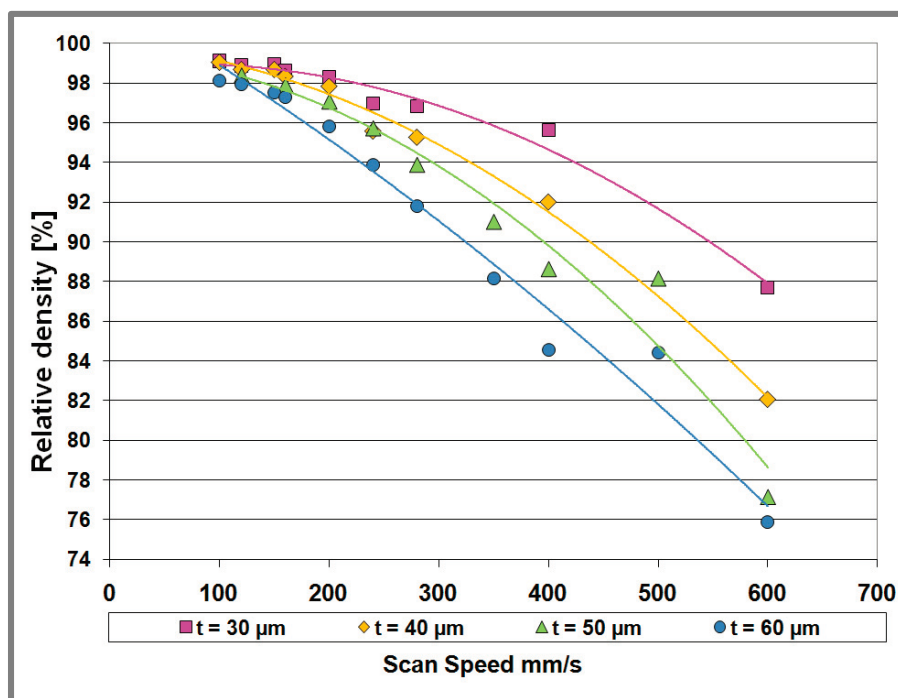
Nejvyšší tvrdosti 660 HV bylo dosaženo v případě doby stárnutí 8 hodin a teploty 460 °C. Daleko lepší z hlediska časové úspory by bylo ovšem tepelné zpracování při teplotě 480 °C a době 5 hodin, přičemž dosažená tvrdost byla 650 HV. Vzorky po tomto tepelném zpracování byly také podrobeny tahové zkoušce viz. obrázek 2.7.



Obr. 2.7 Tahová zkouška [6]

Mez pevnosti vzorku před tepelným zpracováním byla 1290 MPa a po stárnutí dokonce 2217 MPa. Ovšem velkým nedostatkem tepelného zpracování dílů vyrobených SLM technologií je jejich velmi nízká tažnost, která byla v tomto případě pouze 1,6 %.

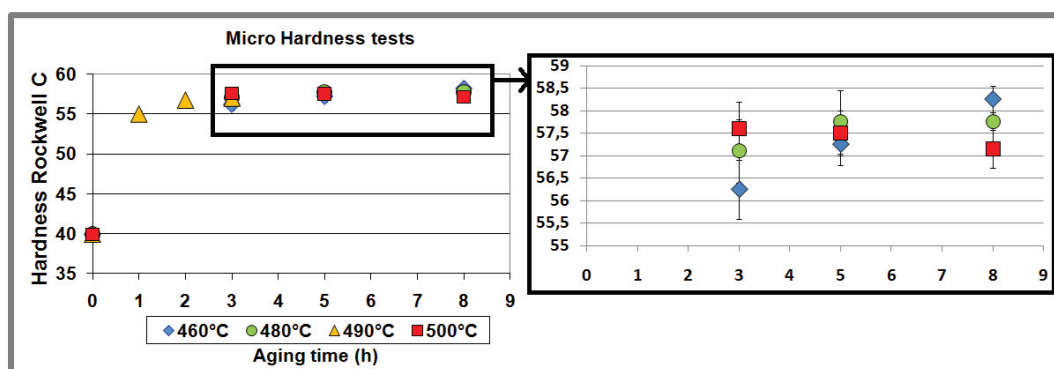
*Kempen et al.* [7] využili ve své práci totožné procesní parametry jako ve studii [3]. Práce byla zaměřena na zjištění vlivu změny procesních parametrů na relativní hustotu a optimalizaci tepelného zpracování. Výkon laserového paprsku byl 100 W. Závislost relativní hustoty na skenovací rychlosti pro jednotlivé tloušťky vrstvy je znázorněna na obrázku 2.8.



Obr. 2.8 Závislost relativní hustoty na rychlosti skenování a tloušťce vrstvy [7]

Je zřejmé, že s rostoucí rychlostí skenování i tloušťkou vrstvy relativní hustota klesá. Nejvyšší hodnoty relativní hustoty bylo dosaženo při skenovací rychlosti 100 mm/s a tloušťce vrstvy 30 μm.

Tepelné zpracování stárnutím bylo prováděno po dobu 1–8 hodin při teplotách 460–500 °C. Závislost výsledné tvrdosti na těchto proměnných hodnotách je na obrázku 2.9.

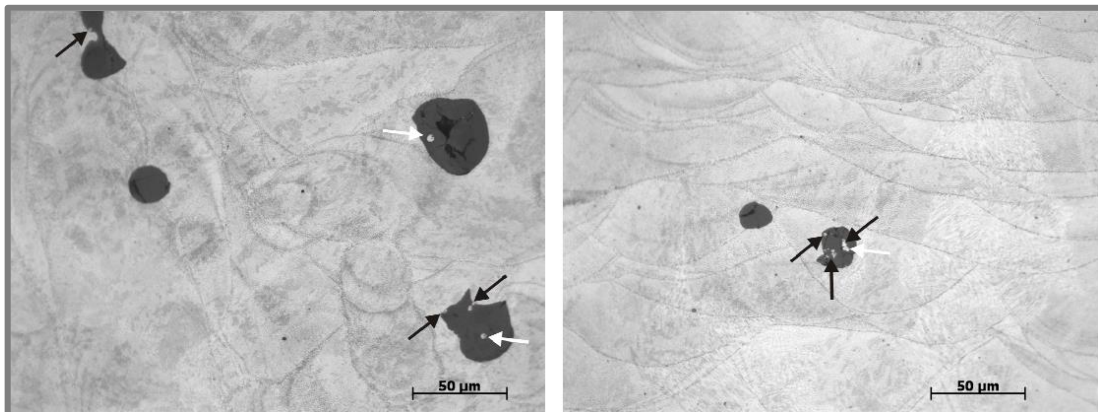


Obr. 2.9 Závislost tvrdosti na teplotě a době stárnutí [7]

Optimální tepelné zpracování s ohledem na dosaženou tvrdost i čas stárnutí je při teplotě 480 °C po dobu 5 hodin. Dosažená tvrdost v tomto případě byla 58 HRC. Také je možné pozorovat lineární nárůst tvrdosti v závislosti na čase při teplotě stárnutí 460 °C. Pomocí rentgenové strukturní analýzy byl také zjištěn nárůst podílu austenitu ve vzorku na 9,4 % oproti 5,8 % v případě tepelně nezpracovaného vzorku. To je způsobeno nestabilitou metastabilního martenzitu, který se při tepelném zpracování na austenit přeměňuje.

*Thijs et al.* [8] zjišťovali složení příměsí přítomných ve vzorcích vyrobených SLM technologií. Zvolené procesní parametry laseru byly velmi obdobné jako v předchozích studiích, přičemž rychlost skenování byla 150 mm/s a vzdálenost šraf 112 μm. Byly použity dva druhy inertní atmosféry. Technicky čistý dusík, kdy byla hladina kyslíku v komoře menší než 0,5 %. V druhém případě byl z komory odčerpáván vzduch, dokud nedosáhla hladina kyslíku 1–2 %. Potom vznikla kyslíkem obohacená inertní atmosféra.

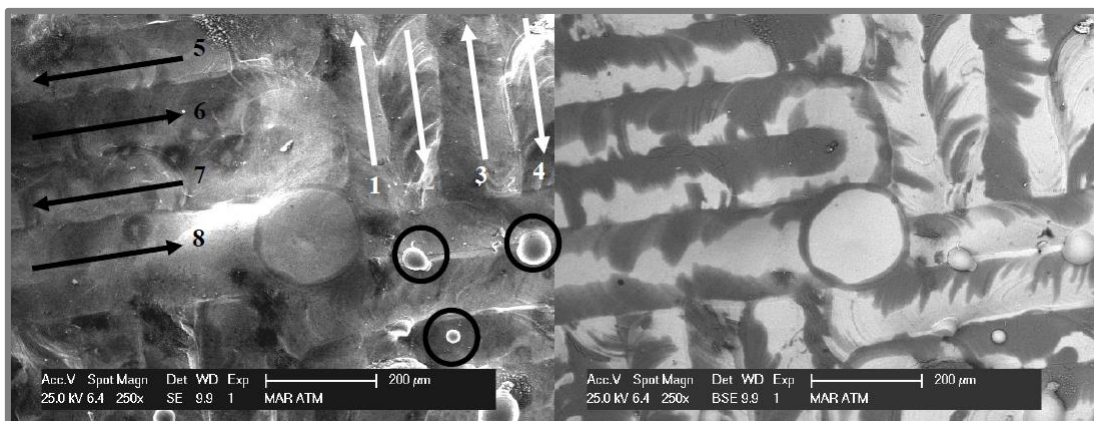
V průběhu každé stavby byly vyráběny stejné díly pomocí dvou strategií skenování. Pomocí jednoduchého skenování a s přetavováním. Vzorky byly následně vyhodnocovány na optickém a elektronovém mikroskopu. Na obrázku 2.10 je možné vidět mikrofotografie horní a boční stěny vzorku postavené při použití čisté dusíkové inertní atmosféry s přetavováním.



Obr. 2.10 Mikrofotografie horní a boční stěny vzorku [8]

Tmavě šedé oblasti jsou nežádoucí oxidy. Bílé šipky označují původní neroztavené částice prášku, zatímco šipky černé značí příměsí nitridu titanu. Příměsí jsou velké 10 až 100 μm. Bylo zjištěno, že příměsí obsahují trhliny a někdy také vzduchové bubliny. Pro zjištění přesného složení příměsí byla provedena elektronová mikroanalýza. Bylo zjištěno, že příměsí obsahují 34,3 % titanu, 3,1 % hliníku a 62,6 % kyslíku.

Oxidy se nacházely i na horní straně vzorků. Byly provedeny jejich snímky pomocí elektronového mikroskopu viditelné na obrázku 2.11. Více kyslíku obsaženého v inertní atmosféře vedlo k většímu pokrytí vrstvou oxidů, ale také k její tenčí vrstvě. V důsledku rozdílných mechanických vlastností mezi kovovou a oxidickou fází došlo k jejímu popraskání v horní vrstvě vzorků. Bylo zjištěno, že uvedené oxidy jsou oxid hlinitý a oxid titaničitý. Použitím přetavování je možné vytvořit více rovnoměrnou šířku vrstvy oxidů.



Obr. 2.11 Oxidy na horní straně vzorků [8]

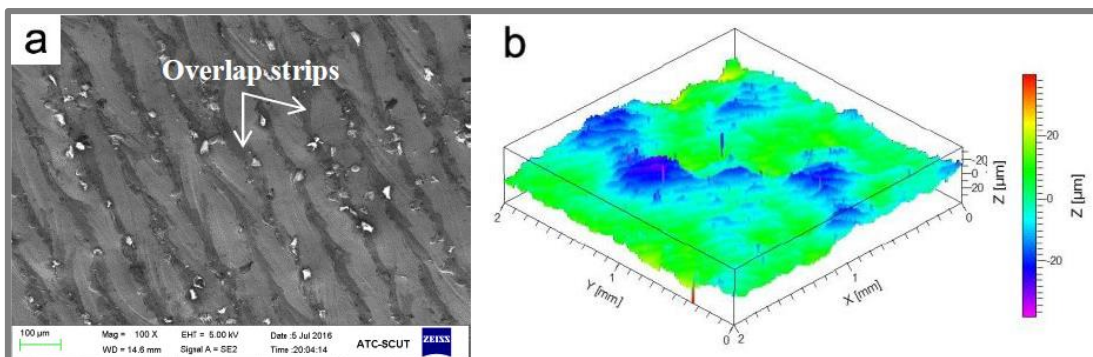
Fotografie byly pořízeny na hranicích čtyř ostrůvků. Je možné rozeznat jednotlivé stopy skenování, přičemž šipky ukazují jejich směr. V kroužcích je možné vidět samostatné nenatavené částice prášku. Na obrázku vpravo je možné vidět matici oceli zobrazenou bílou barvou. Naopak šedá barva indikuje vrstvu oxidů.

*Tan et al.* [9] studovali povrchovou morfologii, mikrostrukturu, tvrdost a tahové zkoušky vyrobených dílů. Procesní parametry použité pro výrobu dílů jsou shrnuty v tabulce 2.5.

Tab. 2.5 Procesní parametry [9]

Výkon laseru	370–400 W
Rychlost skenování	-
Tloušťka vrstvy	40 µm
Vzdálenost šraf	-
Průměr laserového paprsku	100 µm

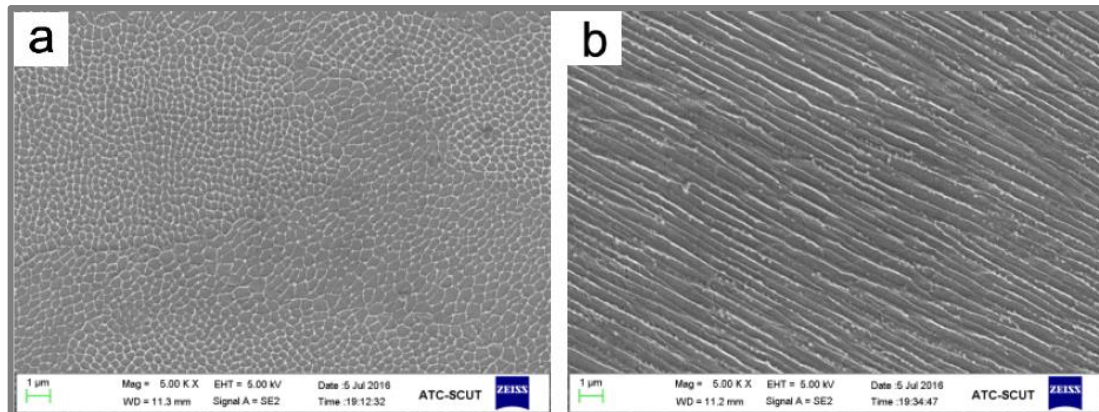
Maximální velikost částic práškového materiálu byla 40–50 µm. Vyrobené díly byly tepelně zpracovány stárnutím při teplotě 490 °C po dobu 6 hodin. Drsnost povrchu byla vyhodnocována na horní a boční straně vzorku. První případ je možné vidět na obrázku 2.12.



Obr. 2.12 Morfologie a drsnost povrchu horní strany vzorku [9]

Na obrázku vlevo jsou viditelné jednotlivé dráhy laseru a také jejich překrytí označené bílými šipkami. Vlastní plošná drsnost povrchu  $S_a$  vyhodnocená z oblasti o velikosti  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  byla  $4,16 \text{ } \mu\text{m}$ . Obdobně byla drsnost povrchu vyhodnocena i na boční straně vzorku, kde dosahovala hodnoty  $4,79 \text{ } \mu\text{m}$ .

Vzorky byly následně rozříznuty ve vertikálním a horizontálním směru a byly z nich vytvořeny metalografické výbrusy pro analýzu mikrostruktury. Optickým mikroskopem bylo zjištěno, že vyrobené vzorky obsahují jen velmi vzácně mikropóry a jedná se téměř o materiál s maximální možnou hustotou. Na obrázku 2.13 jsou snímky z rastrovacího elektronového mikroskopu.



Obr. 2.13 SEM snímky horizontálního a vertikálního řezu vzorku [9]

Na obrázku 2.13a, což je řez vzorku v horizontálním směru, je možné vidět jemnou dendritickou mikrostrukturu s velikostmi částic  $0,2\text{--}0,4 \text{ } \mu\text{m}$ . Obrázek 2.14b zobrazuje snímek vertikálního řezu vzorku a na něm viditelné protáhlé jehlicovité mikrostruktury dosažitelné jen pomocí SLM technologie.

Na vzorcích byla také vyhodnocena tvrdost. Ta dosahovala hodnot 35 HRC před tepelným zpracováním a 55 HRC po jeho provedení. Jemná mikrostruktura zaručuje dobrou distribuci intermetalických precipitátů bohatých na nikl, kobalt a chrom do nízkouhlíkové martenzitické struktury, což vede k jejímu zpevnění. Mezi pevností vzorků byla tepelným zpracováním zvýšena z  $1165 \text{ MPa}$  na  $2014 \text{ MPa}$ . Došlo ovšem k razantnímu poklesu tažnosti vzorku na  $3,28 \%$ .

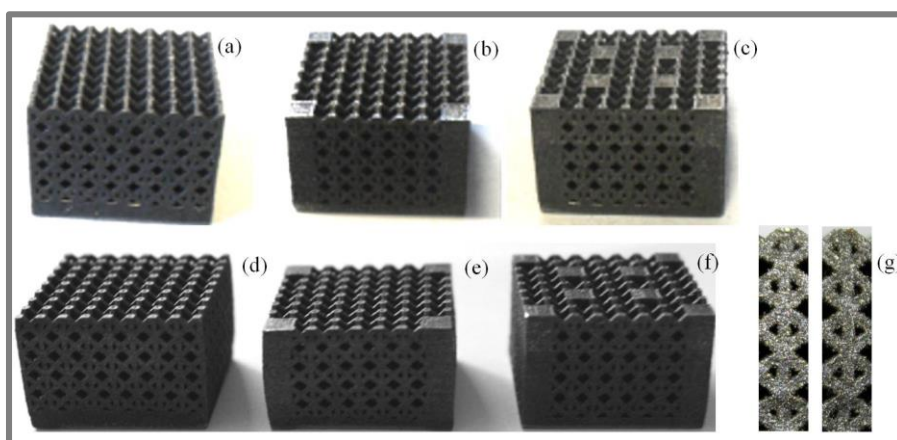
V následující práci se *Contuzzi et al.* [10] zabývali výrobou struktur, kterými je možné vyplnit a odlehčit tisknutý díl. Porovnávali jednotlivé struktury z hlediska poměru objemu zaujímaného vyplněnou strukturou a celkovým objemem buňky. Dalším parametrem byl poměr plochy zaplněné buňkou a opět objemu vyplněné buňky. Bylo zahrnuto také maximální dovolené napětí a kompresní faktor zatížení. Nejlepší kombinací těchto parametrů disponuje struktura FCCZ. Ta je stejná jako ve studii [4] a je možné ji vidět na obrázku 2.4. Zvolené procesní parametry tisku struktur jsou v tabulce 2.6.

Tab. 2.6 Procesní parametry [10]

Výkon laseru	100 W
Rychlost skenování	180 mm/s
Tloušťka vrstvy	30 $\mu\text{m}$
Vzdálenost šraf	-
Průměr laserového paprsku	200 $\mu\text{m}$

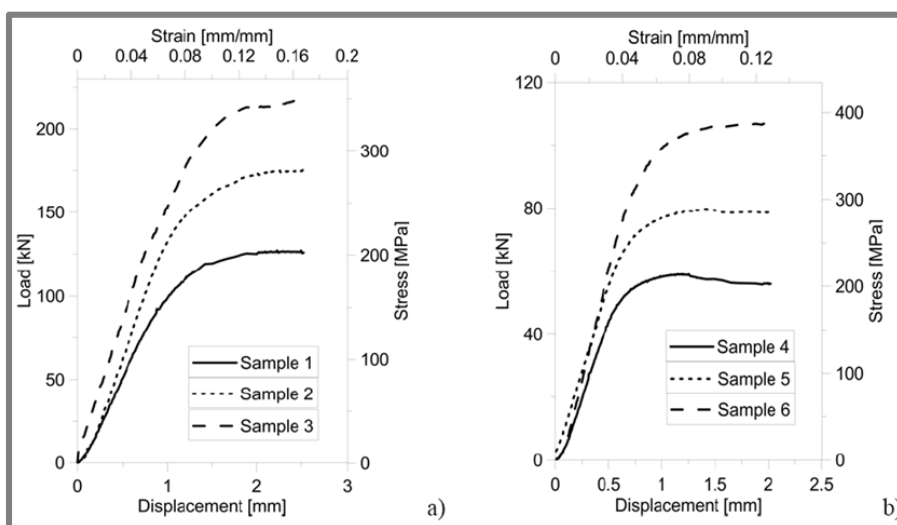
S těmito procesními parametry bylo možné vyrobit díly o relativní hustotě větší než 99 %. Práškový materiál měl průměrnou velikost kulovitých částic 40  $\mu\text{m}$ . Nejdříve byla zjištěna nejmenší možná velikost prutů buněk. Ta je 0,5 mm pro velikost buňky 2 mm a 0,7 mm v případě 3 mm. Z buněk byly poté vytvořeny mřížkové struktury o velikostech 24x24x15 mm, respektive 16x16x16 mm. Tyto buňky byly dále rozšířeny o svislé výztuhy v rozích struktur a středech diagonál.

Celkem bylo tedy vytisknuto 6 vzorků, které měly různý poměr zaplněný vyplněnou strukturou k poměru buňky. Konkrétně od 24,6 % v případě vzorku bez výztuh o hraně buňky 3 mm až do 43,7 % pro vzorek se všemi výztuhami a hranou buňky 2 mm. Na obrázku 2.14 jsou pouze vzorky 1-3 se základní buňkou 3 mm v nedeformovaném (nahore) a deformovaném (dole) stavu.



Obr. 2.14 Mřížkové struktury [10]

Ve spodní části obrázku jsou viditelné typické příklady ztráty vzpěrné stability, zejména na detailním pohledu 2.14g, který byl vyfocen v blízkosti výztuh. Tlakové testy byly zastaveny po dosažení deformace 2,5 mm. Na obrázku 2.15 je možné vidět tlakové diagramy všech typů vzorků.



Obr. 2.15 Tlakové diagramy mřížkových struktur vzorků 1 až 6 [10]

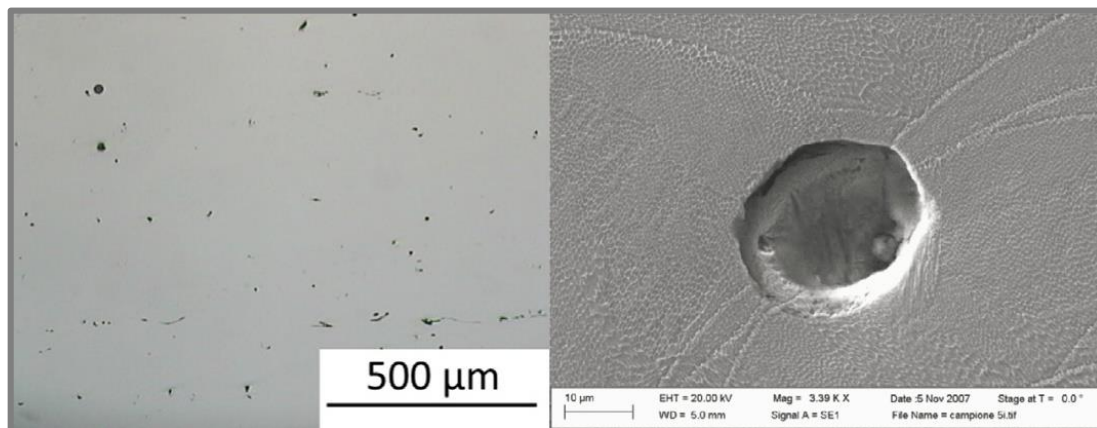
Napětí bylo vypočteno jako poměr mezi změřenou silou a nominálním průřezem vzorku. Obdobně byla vypočtena deformace poměrem mezi změřeným stlačením vzorku a nominální výškou vzorku. Bylo zjištěno, že je možné vložním výtuh dvojnásobně zvýšit únosnost obou typů struktur. Maximální hodnoty napětí jsou téměř lineárně závislé na relativní hustotě buňky. Vzorky o hraně buňky 3 mm snesly stejnou hodnotu napětí jako ty se 2 mm buňkou, nicméně měly o 30 % menší relativní hustotu. Je to způsobeno rychlejší ztrátou vzpěrné stability.

*Casalino et al.* [11] ve své práci zkoumali relativní hustotu, mikrostrukturu, mechanické vlastnosti a drsnost povrchu dílů vyrobených pomocí SLM technologie. Procesní parametry zvolené v práci jsou v tabulce 2.7.

Tab. 2.7 Procesní parametry [11]

Výkon laseru	57, 86, 100 W
Rychlost skenování	180, 200, 220 mm/s
Tloušťka vrstvy	30 $\mu\text{m}$
Vzdálenost šraf	140 $\mu\text{m}$
Průměr laserového paprsku	200 $\mu\text{m}$

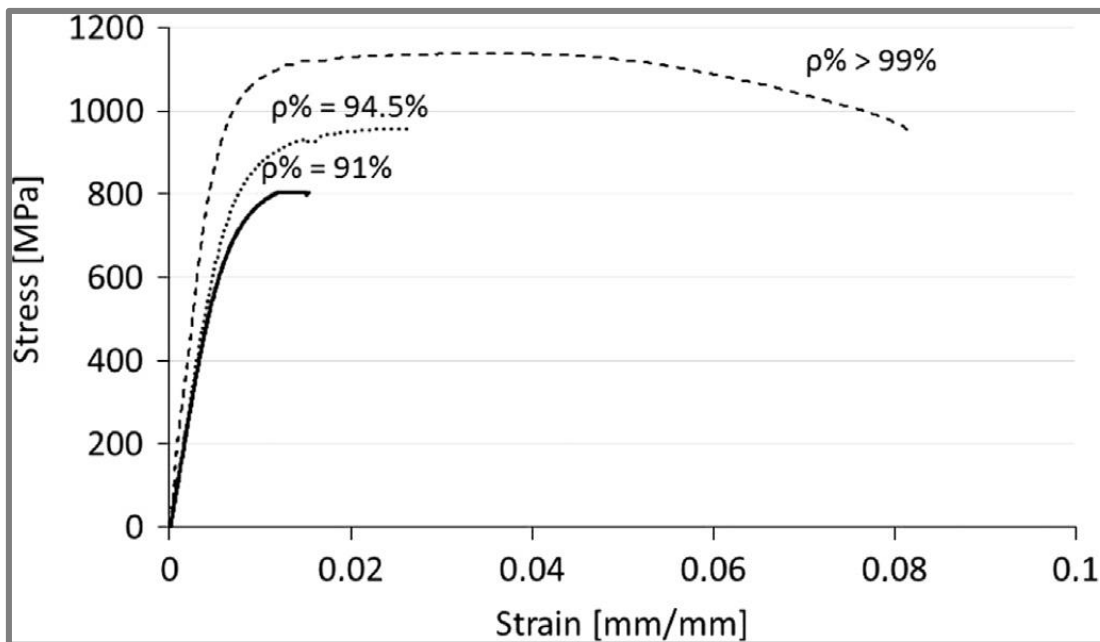
Vzorky pro všechny testy s výjimkou tahových měly velikost 15x15x10 mm<sup>3</sup>. Pro tahovou zkoušku byly vytisknuty vzorky o délce 90 mm a tloušťce 5 mm. U většiny vzorků bylo dosaženo vyšší hustoty než 99 %. Na obrázku 2.16 je možné vidět metalografický výbrus vzorku vyrobeného při výkonu laseru 100 W a rychlosti skenování 220 mm/s nasnímaný optickým a elektronovým mikroskopem.



Obr. 2.16 Metalografický výbrus vzorku [11]

Na výbrusu je možné vidět nízkou koncentraci pórů ve vzorku. Ty mají téměř kruhový tvar a jejich velikost je menší než 30  $\mu\text{m}$ . V pravé části obrázku je jeden z pórů zachycen rastrovým elektronovým mikroskopem. Byla vytvořena velmi jemná dendritická struktura, která měla mezery mezi buňkami menší než 1  $\mu\text{m}$ .

Tvrdość vzorků byla 34 HRC. Hodnoty drsnosti povrchu byly nelineárně závislé na plošné hustotě energie a dosahovaly hodnot od 15 do 22  $\mu\text{m}$ . Samotné výsledky tahových zkoušek pro různé hodnoty relativní hustoty je možné vidět na obrázku 2.17.



Obr. 2.17 Tahové zkoušky vzorků s rozdílnou relativní hustotou [11]

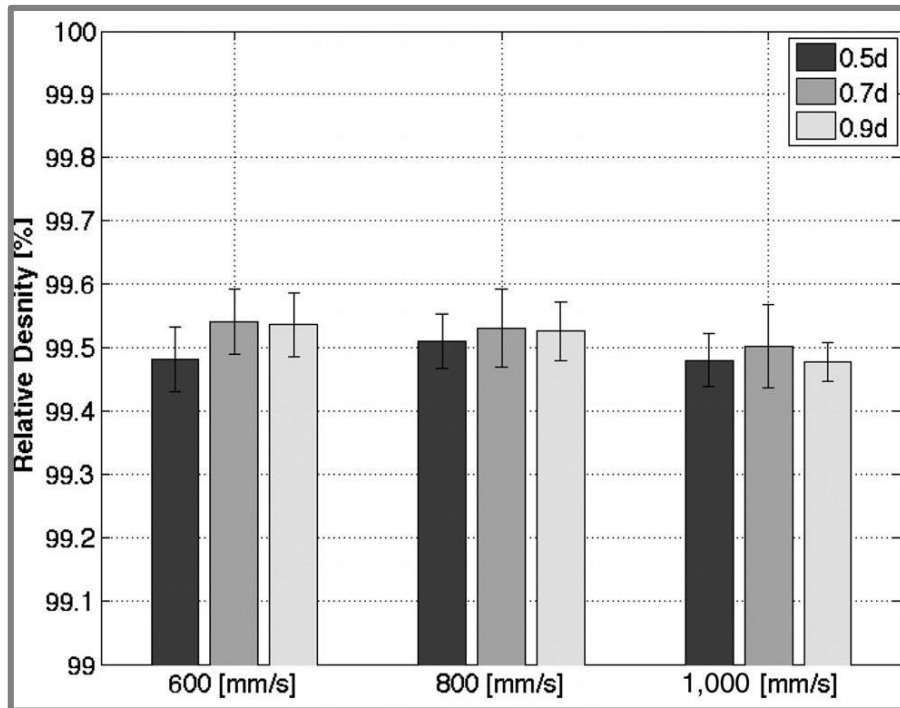
Maximální dosažená mez pevnosti byla 1170 MPa a v případě poklesu relativní hustoty se dle očekávání její hodnota také snižuje.

*Becker et al.* [12] zkoumali tepelné zpracování, porozitu, tahové zkoušky, zbytkové napětí, mikrostrukturu a tvrdost na objemových válcových vzorcích o průměru 12 mm a výšce 30 mm. Použité procesní parametry studie jsou shrnuty v tabulce 2.8. Vzdálenost šraf byla v této studii značena jako násobek průměru laserového paprsku. Pro studii bylo použito prášku se střední velikostí částic 43,7  $\mu\text{m}$ .

Tab. 2.8 Procesní parametry [12]

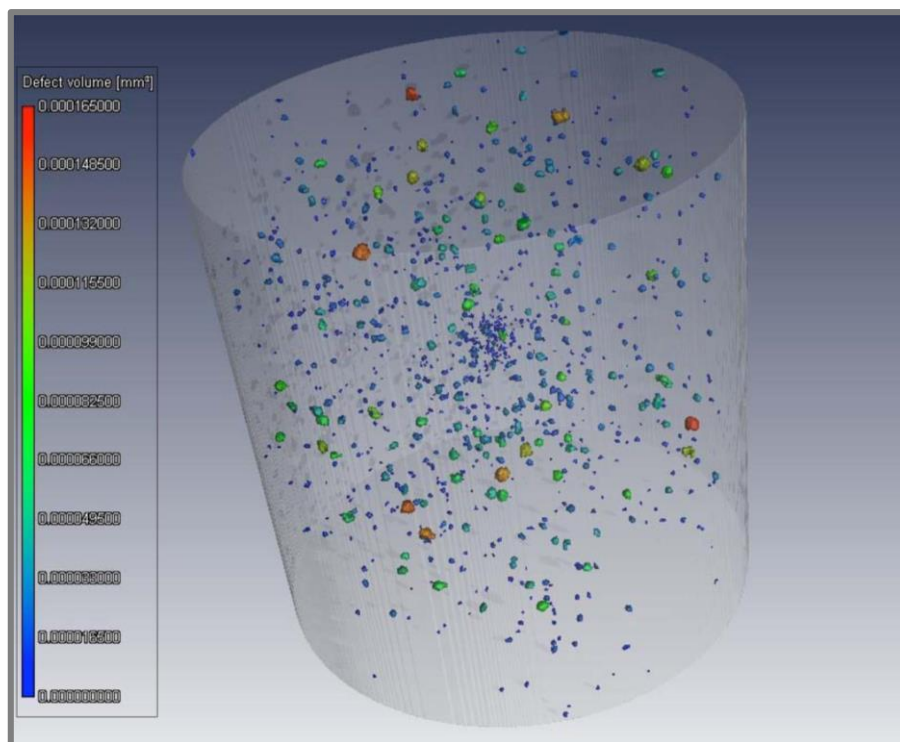
Výkon laseru	200 W
Rychlost skenování	600, 800, 1000 mm/s
Tloušťka vrstvy	30 $\mu\text{m}$
Vzdálenost šraf	75, 105, 135 $\mu\text{m}$
Průměr laserového paprsku	150 $\mu\text{m}$

Vzorky byly vyráběny dvěma skenovacími strategiemi. Jednoduchým skenováním a s přetavováním. Dosažená hustota pomocí první jmenované strategie je na obrázku 2.18.



Obr. 2.18 Závislost relativní hustoty na rychlosti skenování a vzdálenosti šraf [12]

V případě přetavování bylo možné v průměru dosáhnout ještě o 0,1 % vyšších hodnot relativní hustoty, ovšem na úkor dvojnásobné doby výroby. Je také možné pozorovat, že změna vzdálenosti šraf nemá výrazný vliv na dosaženou hustotu. Aby bylo možné určit rozložení pórů ve vzorku, byl vytvořen jeho obraz pomocí počítačové tomografie. Na obrázku 2.19. je tento obraz pro díl postavený při rychlosti skenování 600 mm/s a vzdálenosti šraf 105  $\mu\text{m}$ .



Obr. 2.19 Micro CT obraz vzorku [12]

Bylo zjištěno, že rozložení pórů ve vzorku není náhodné. Vzdálenost mezi póry se shoduje se vzdáleností šraf a ostrůvkovitým šrafováním. Menší póry se objevují na hranicích šraf, zatímco ty větší na hranicích ostrůvků, které jsou od sebe vzdáleny 5 mm. Byly zaznamenány i póry o průměru větším než 130  $\mu\text{m}$ .

Vzorky byly tepelně zpracovány nejprve rozpouštěcím žíháním při teplotě 830  $^{\circ}\text{C}$  po dobu 1 hodiny a poté vzduchem ochlazené na pokojovou teplotu. Následně byly uměle stárnuty po dobu 6 hodin při teplotě 490  $^{\circ}\text{C}$ . Před i po každé části teplého zpracování byly provedeny tahové zkoušky. Jejich vyhodnocení v případě jednoduché strategie šrafování je možné vidět v tabulce 2.9.

Tab. 2.9 Výsledky tahových zkoušek po tepelném zpracování [12]

Fáze měření	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	A (%)
<b>Po tisku</b>	1080	1205	12
<b>Po rozpouštěcím žíhání</b>	800	950	13,5
<b>Po umělém stárnutí</b>	1750	1850	5,1

Bylo zjištěno, že rozpouštěcí žíhání snižuje pevnost nezávisle na strategii šrafování i orientaci stavby vzorku. Uměle stárnuté vzorky dosahují mechanických vlastností srovnatelných s tvářeným materiálem. Byl prokázán pozitivní vliv rozpouštěcího žíhání na zbytkové pnutí. Jeho hodnota poklesla ze 720 MPa na 121 MPa v případě jednoduché strategie.

*Casati et al.* [13] se zaměřili na problematiku tepelného zpracování stárnutím. Použili práškového materiálu s průměrnou velikostí částic 35  $\mu\text{m}$ . Procesní parametry zvolené pro tisk jsou shrnuty v tabulce 2.10.

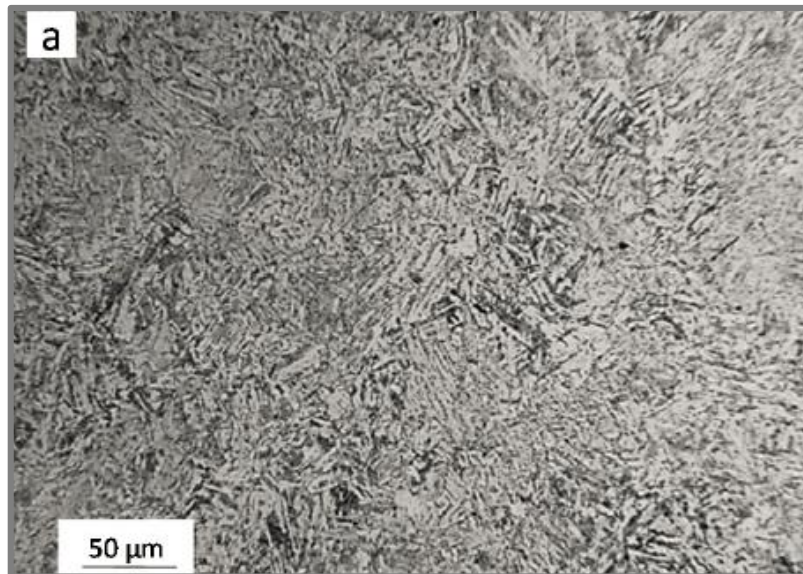
Tab. 2.10 Procesní parametry [13]

Výkon laseru	200 W
Rychlost skenování	812 mm/s
Tloušťka vrstvy	40 $\mu\text{m}$
Vzdálenost šraf	80 $\mu\text{m}$
Průměr laserového paprsku	75 $\mu\text{m}$

Byly vyrobeny kvádřové vzorky o velikosti 10x10x75 mm. Zvolená skenovací strategie byla meandrovitá s rotací skenovacího vektoru o úhel 67 $^{\circ}$  pro každou další vrstvu.

Stárnutí bylo provedeno hned po stavbě a také po rozpouštěcím žíhání při teplotě 815  $^{\circ}\text{C}$  po dobu 30 minut. Umělé stárnutí bylo prováděno při teplotách 490, 540 a 600  $^{\circ}\text{C}$  po dobu 10 minut až 14 dní.

Z vodorovně postavených dílů byly následně vyrobeny tahové vzorky o délce 20 mm a průměru 4 mm. Na obrázku 2.20 je možné vidět mikrofotografii reprezentativního tepelně zpracovaného vzorku. Je možné vidět, že po tepelném zpracování zcela zmizely všechny stopy po SLM procesu a místo buněčné byla vytvořena hrubá martenzitická struktura. Bylo zjištěno, že dosažená tvrdost tepelným zpracováním má vždy pro každou teplotu po určité době své maximum.



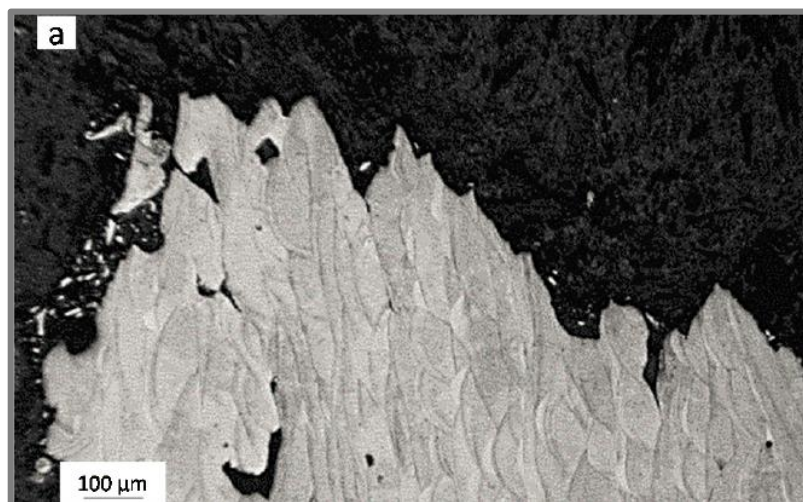
Obr. 2.20 Mikrofotografie tepelně zpracovaného vzorku [10]

V případě, že je překročeno tak již dále klesá a jedná se o nežádoucí přestárnutí. Tyto maxima i s dosaženými vlastnostmi jsou shrnuty v tabulce 2.11.

Tab. 2.11 Mechanické vlastnosti dosažené tepelným zpracováním [13]

Tepelné zpracování	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	A (%)
Po tisku	915	1188	6,1
460 °C, 8 hodin	1957	2017	1,5
490 °C, 4 hodiny	1793	1815	1,2
540 °C, 1 hodina	1870	1957	2,1
600 °C, 10 minut	1557	1659	1,6

Stárnutí při nízkých teplotách vede ke dvojnásobnému nárůstu meze kluzu, ovšem tažnost razantně poklesne. Také bylo zjištěno, že stárnutím se zvyšuje obsah austenitu ve vzorku přibližně o 5 %. Na obrázku 2.21 je vertikální řez roztrženého tahového vzorku. Je možné vidět růst relativně velkých trhlin, které začínají na hranicích jednotlivých šrafů laseru.



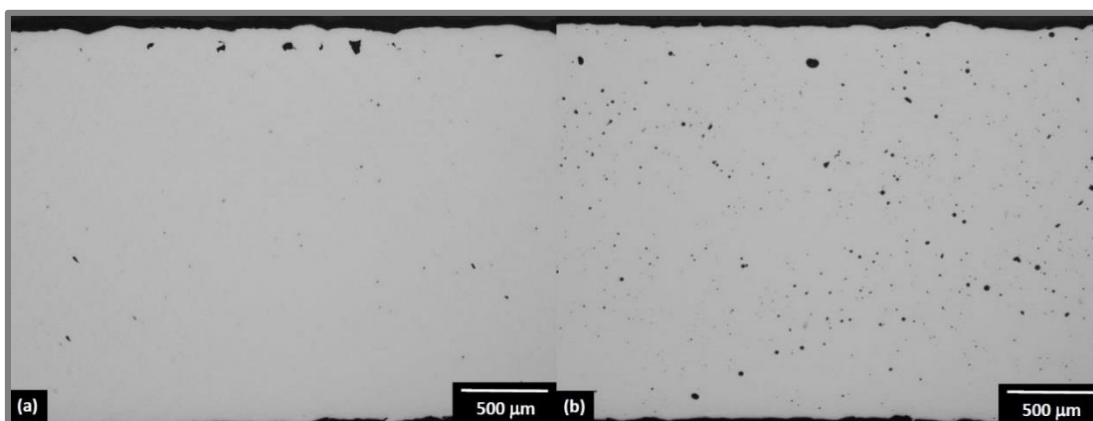
Obr. 2.21 Řez roztrženého tahového vzorku [13]

Koutný *et al.* [14] porovnávali tisk oceli 1.2709 na zařízeních od firem PXL a M2 Cusing. Obě tiskárny měly podobné procesní parametry použité ke stavbě. Jejich shrnutí a porovnání je v tabulce 2.12.

Tab. 2.12 Porovnání procesních parametrů tiskáren [14]

Parametr	M2 Cusing	PXL
Výkon laseru	180 W	220 W
Rychlost skenování	800 mm/s	1200 mm/s
Tloušťka vrstvy	40 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$
Vzdálenost šraf	105 $\mu\text{m}$	70 $\mu\text{m}$
Průměr laserového paprsku	50 $\mu\text{m}$	70–80 $\mu\text{m}$

Skenovací strategie použitá pro stavbu byla založena na střídání směru vektorů skenování, přičemž byly pro dvě následující vrstvy otočené o 90°. Byly použity prášky s velmi rozdílnou distribucí částic. Pro stroj M2 Cusing měl prášek průměrnou velikost částic 28  $\mu\text{m}$  a v případě PXL to bylo pouze 10,8  $\mu\text{m}$ . Je to způsobeno tím, že tento prášek je možné použít pro tisk již od tloušťky vrstvy 15  $\mu\text{m}$ . Byly vyrobeny objemové vzorky o tloušťce stěny 2,5 mm, které byly následně rozříznuty a byly vytvořeny metalografické výbrusy na obrázku 2.22.



Obr. 2.22 Porovnání metalografických výbrusů [14]

Vlevo je vzorek vyrobený na zařízení M2 Cusing. Hodnota jeho porozity dosáhla 0,17 %. Póry jsou rozloženy blízko povrchu, přičemž jejich velikost je kolem 100  $\mu\text{m}$ . Naopak porozita dílu vpravo vyrobeného na zařízení PXL je rozložena rovnoměrně a má hodnotu 0,85 %. Pomocí rastrového elektronového mikroskopu byla odhalena jemnozrnná buněčná mikrostruktura s tenkými hranicemi zrn a jejich protáhlým tvarem.

Tepelné zpracování tahových vzorků bylo prováděno po dobu 30 minut při teplotě 830 °C, přičemž doba zahřívání byla 5 hodin. Poté byly na vzorcích provedeny tahové zkoušky, jejichž výsledek je možné vidět v tabulce 2.13.

Tab. 2.13 Porovnání mechanických vlastností tahových vzorků [14]

Zařízení	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	A (%)	Tvrдость (HRC)
<b>PXL</b>	821	1175	9,3	36
<b>M2 Cusing</b>	800	1116	6,9	33

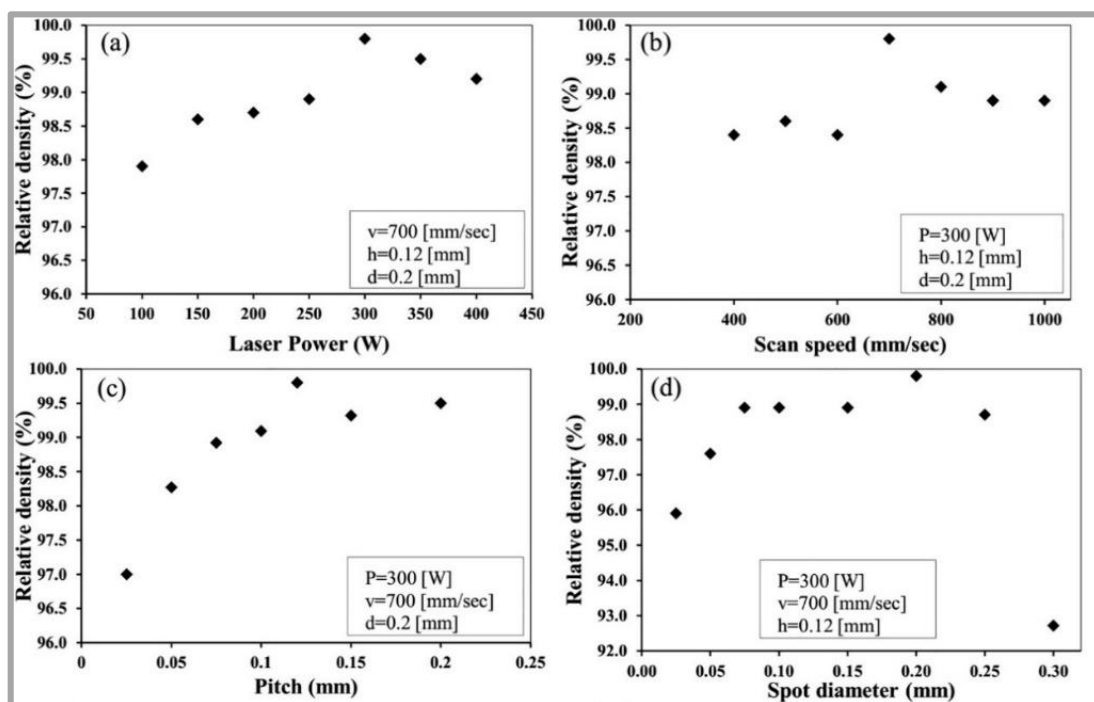
Bylo zjištěno, že vzhledem ke [2] má zvolené tepelné zpracování spíše negativní vliv na pevnost i tvrdost dílů. Obdobných mechanických vlastností je totiž možné dosáhnout i bez tepelného zpracování.

Práce autorů *Mutua et al.* [15] se zabývá vlivem změny výkonu laseru, rychlosti skenování, vzdálenosti šraf a průměru laserového paprsku na relativní hustotu, drsnost povrchu, mikrostrukturu a mechanické vlastnosti. Procesní parametry tisku jsou shrnuty v tabulce 2.14.

Tab. 2.14 Procesní parametry [15]

Výkon laseru	100–400 W
Rychlost skenování	400–1000 mm/s
Tloušťka vrstvy	50 $\mu\text{m}$
Vzdálenost šraf	25–200 $\mu\text{m}$
Průměr laserového paprsku	50–300 $\mu\text{m}$

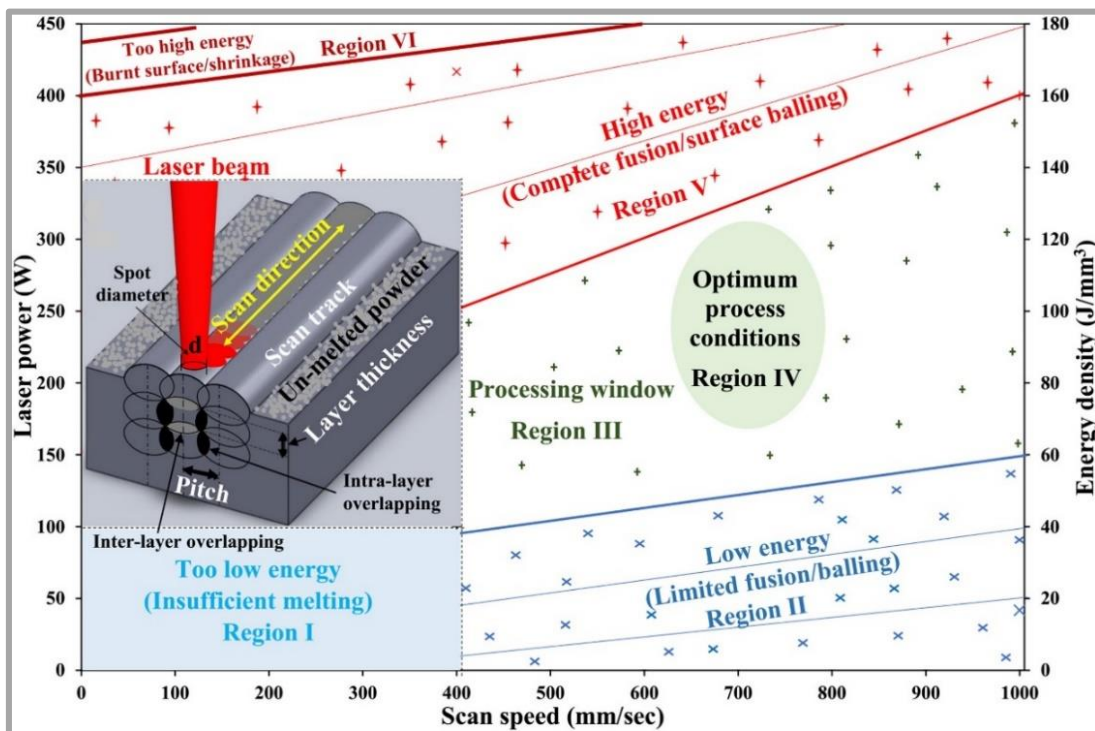
Jedním z nejdůležitějších výsledků byla závislost relativní hustoty na jednotlivých procesních parametrech, přičemž ostatní proměnné parametry byly vždy zvoleny konstantní (obrázek 2.23).



Obr. 2.23 Závislost relativní hustoty na procesních parametrech [15]

Byla zjištěna nejvyšší relativní hustota 99,8 %, která byla změřena pomocí Archimedovy metody. Tento vzorek byl stavěn při výkonu laseru 300 W, rychlosti skenování 700 mm/s, vzdálenosti šraf 120  $\mu\text{m}$  a průměru laserového paprsku 200  $\mu\text{m}$ . Objemová hustota energie byla v tomto případě 71,43 J/mm<sup>3</sup>. Drsnost povrchu vyrobeného dílu byla 35  $\mu\text{m}$ .

Nejdůležitějším výsledkem této práce bylo ovšem sestavení mapy procesních parametrů. Ta je na obrázku 2.24 a představuje závislost výkonu laseru a objemové hustoty energie na rychlosti skenování. Procesní mapu lze rozdělit na oblasti s nízkou, vhodnou a vysokou energií stavby. Byla nalezena oblast optimálních procesních parametrů, která je pro výkon laseru 200–300 W a rychlost skenování 600–800 mm/s. Objemová hustota energie je v tomto případě 70–120 J/mm<sup>3</sup>.



Obr. 2.24 Mapa procesních parametrů [15]

Demir *et al.* [16] ve své práci zkoumali vliv preventivních a korekčních metod předehřevu a přetavování na drsnost, hustotu, geometrickou odchylku a tvrdost vyrobených dílů. Použité procesní parametry tisku jsou v tabulce 2.15.

Tab. 2.15 Procesní parametry [16]

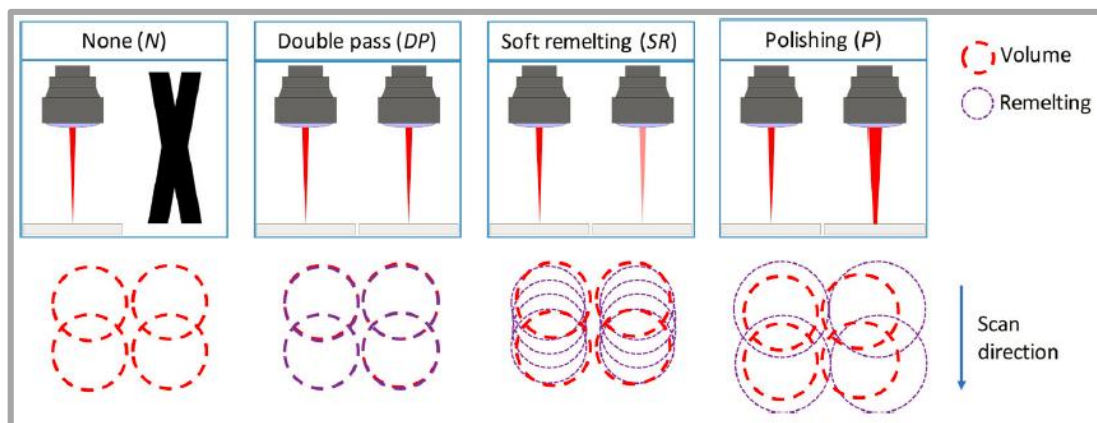
Výkon laseru	200 W
Rychlost skenování	722, 812, 928 mm/s
Tloušťka vrstvy	40 μm
Vzdálenost šraf	90 μm
Průměr laserového paprsku	75 μm

Použitý prášek měl průměrnou velikost částic 32,8 μm. Rychlost skenování byla v této práci definována jako doba, po kterou se taví jednotlivé body vzdálené od sebe 65 μm. Její hodnoty byly 70, 80 a 90 μs. Testované válcové vzorky měly průměr 10 mm a výšku 20 mm. Jako preventivní metoda byl zvolen předehřev platformy na teplotu 170 °C. Korekce spočívala v přetavování vrstvy s detekovanými póry. Použité strategie byly jednoduché přetavování, měkké přetavování a leštění. V případě jednoduchého přetavování byly použity stejné parametry jako při prvním skenování. Změna parametrů pro další jmenované strategie je v tabulce 2.16.

Tab. 2.16 Korekční strategie [16]

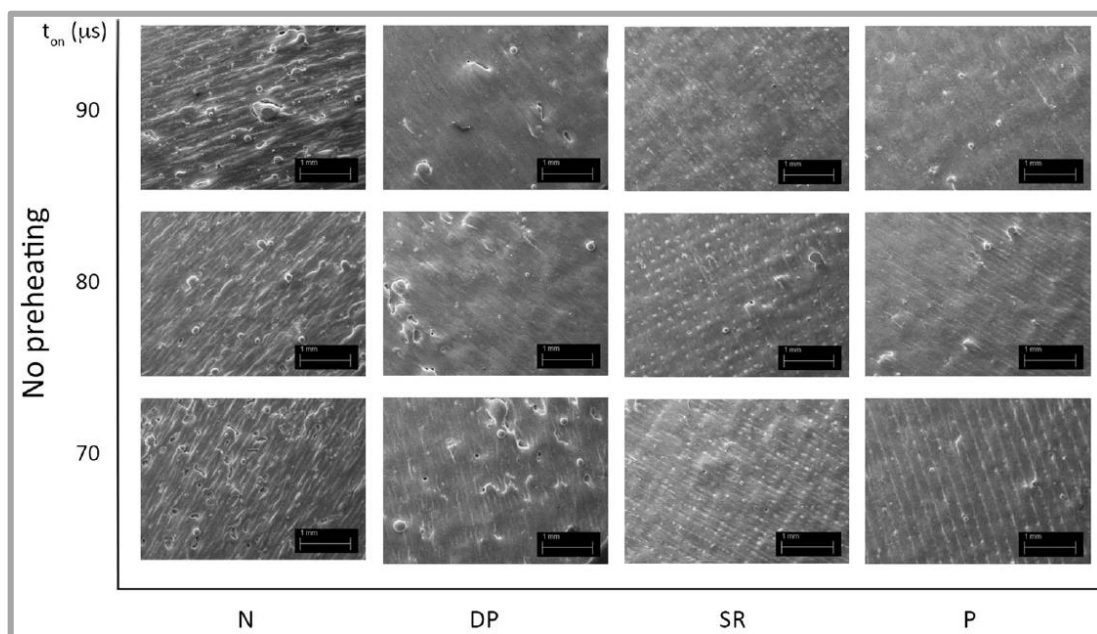
Strategie	Výkon laseru (W)	Rychlost skenování (mm/s)	Vzdálenost šraf ( $\mu\text{m}$ )	Posun zaostření (mm)
Měkké přetavování	150	700	100	0
Leštění	200	941	100	-2

Účelem měkkého přetavování by mělo být opravení oblastí s nedostatečným natavením. Při leštění se díky posunu zaostření zvětší průměr paprsku přibližně na  $100\ \mu\text{m}$ , čímž je docíleno větší a mělčí tavicí lázně. Schéma všech použitých korekčních strategií je na obrázku 2.25.



Obr. 2.25 Přehled korekčních strategií [16]

Snímky z rastrovacího elektronového mikroskopu pro jednotlivé korekční strategie a doby tavení jednotlivých bodů bez předehřevu desky jsou na obrázku 2.26.



Obr. 2.26 SEM snímky porovnání korekčních strategií [16]

Obdobné povrchy byly dosaženy i v případě předeřevu desky. V případě jednoho skenování byl vytvořen velmi nepravidelný povrch s póry a výčnělky. Použitím jednoduchého přetavování bylo dosaženo více homogenního povrchu s méně póry. Výčnělky se zmenšují v případě použití větší doby tavení jednoho bodu. Pomocí měkkého přetavování je možné vytvořit vyhlazené návary, ovšem vznikají mikropóry na jejich hranici z důvodu jejich nedostatečného přesahu. Leštící strategie zaručuje rovný povrch s nízkou porozitou zejména při použití nejvyšší doby tavení.

Všechny korekční strategie mají pozitivní vliv na hustotu dílu. Její nejvyšší hodnoty  $8,005 \text{ g/cm}^3$  bylo dosaženo v případě leštění. Pomocí jednoduchého přetavování a leštění bylo dosaženo plošné drsnosti povrchu přibližně  $4 \text{ } \mu\text{m}$  v případě doby tavení bodu  $90 \text{ } \mu\text{s}$ .

Předeřev platformy má negativní vliv na geometrickou odchylku poloměru válcových vzorků. Může to být způsobeno zvětšením šířky návaru z důvodu přidané tepelné energie. Případně se mohla zvětšit velikost natavených částic prášku, jelikož zvětšení odchylky bylo průměrně o  $30 \text{ } \mu\text{m}$ , což je právě jejich průměrná hodnota. Nejnižší odchylka poloměru dílů byla  $0,1 \text{ mm}$ . Předeřev platformy měl negativní vliv i na mikrotvrdot, kdy poklesla její hodnota z  $370$  na  $330 \text{ HV}$ .

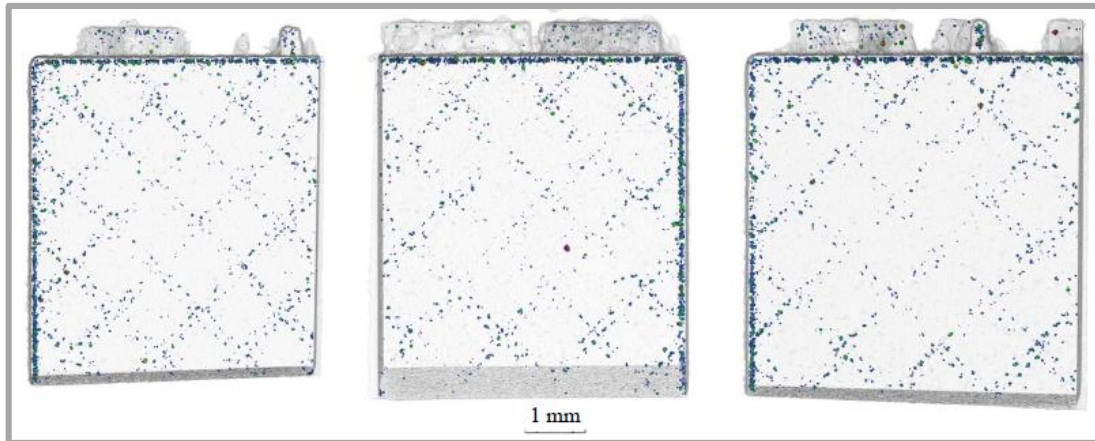
*Sůkal* [17] ve své diplomové práci zkoumal vliv recyklace prášku na porozitu vyrobených dílů, jejich charakter a také drsnost vyrobených dílů. Ve své práci využil SLM zařízení M1 Cusing od výrobce Concept Laser. Standartní procesní parametry tisku doporučené výrobcem zařízení jsou v tabulce 2.17.

Tab. 2.17 Procesní parametry [17]

Výkon laseru	180 W
Rychlost skenování	600 mm/s
Tloušťka vrstvy	$30 \text{ } \mu\text{m}$
Vzdálenost šraf	$105 \text{ } \mu\text{m}$
Průměr laserového paprsku	$50 \text{ } \mu\text{m}$

Pro tisk kvádrových dílů o velikosti  $10 \times 10 \text{ mm}$  se šikmou stěnou zkosenou o  $2 \times 45^\circ$  bylo použito ostrůvkovité strategie šrafování s velikostí ostrůvků  $5 \times 5 \text{ mm}$ . Ty byly mezi jednotlivými vrstvami posunuty o  $1 \text{ mm}$  a jejich překryv byl  $22,5 \text{ } \mu\text{m}$ . Změřená šířka jednoho návaru byla  $150 \text{ } \mu\text{m}$ . Bylo zjištěno, že do deklarované velikosti částic  $10\text{--}43 \text{ } \mu\text{m}$  spadá  $96 \%$  prášku a až 10násobná recyklace prášku nemá na jeho distribuci významný vliv. Zbylé  $4 \%$  prášku byly větší částice.

Pomocí micro CT analýzy byly zjišťovány póry v celém objemu součásti a v objemu vytvořeného nejméně  $300 \text{ } \mu\text{m}$  pod povrchem. V prvním případě byla její průměrná hodnota  $0,032 \%$ , bez započítání podpovrchové porozity  $0,0085 \%$ . Největší výskyt pórů byl tudíž lokalizován pod konturou a také byly pravidelně rozmístěny v objemu na přechodu mezi jednotlivými políčky ostrůvků viz obrázek 2.27.



Obr. 2.27 Rozložení porozity určené pomocí  $\mu$ CT analýzy [17]

Více než 90 % nalezených pórů má průměr menší než 58  $\mu\text{m}$ . Výskyt největší porozity 100-150  $\mu\text{m}$  pod povrchem dílu značí nedokonalé napojení ostrůvkovité strategie a kontury.

Změřená drsnost na vodorovných plochách dílu byla 10-12  $\mu\text{m}$ . V případě svislé a skloněné plochy o 45° to bylo již 8  $\mu\text{m}$  což značí, že schodovitý efekt je při použití tloušťky vrstvy 30  $\mu\text{m}$  potlačen. Nejmenší změřená porozita na metalografických výbrusech byla 0,087 %, největší 0,19 %.

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3

### 3.1 Analýza problému

3.1

Lisovací segment vyrobený technologií SLM se skládá z objemových částí, tenkých lamel, skořepiny a mřížkových struktur. Pro výrobu každého typu dílu jsou vhodné jiné procesní parametry, jako je výkon laseru, rychlost skenování, šrafovací vzdálenost a strategie skenování. Vzhledem k tomu, že se jedná o cyklicky tepelně namáhanou součást, je nutné, aby byla zaručena její dostatečná pevnost a tvrdost. Tyto vlastnosti jsou velmi závislé na porozitě dílu, která je zhoršuje. Bude proto nutné najít takovou kombinaci procesních parametrů, při které bude porozita minimální.

Lisovací segment by měl mít také plošnou drsnost povrchu menší než 10  $\mu\text{m}$ , aby jej bylo možné od vylisovaného dílu dobře oddělit.

Pro odlehčení dílu je vhodné použití mřížkových struktur. Je potřeba nejprve vybrat vhodnou strukturu, a poté zoptimalizovat její procesní parametry tisku a velikost její buňky.

### 3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

3.2

Ve většině prostudované literatury byl použit laser pouze o výkonu 100 W. Pouze v pracích [6, 9, 10, 11, 15] byly prováděny experimenty s výkonem laseru 200 W a 400 W. Pro výrobu dílů bude použito zařízení s laserem o výkonu 400 W, takže by bylo vhodné zaměřit se spíše na novější zdroje, kde byl tento typ laseru využit.

S výkonem laseru souvisí i zvolená rychlost skenování, která je pro výkon laseru 100 W vhodná 200 mm/s a v případě výkonu laseru 200 W kolem 800 mm/s. Předpokladem je, že pro výkon laseru 400 W bude vhodná rychlost ještě vyšší. Její vypočtená hodnota pro maximální dosažitelnou hustotu materiálu je 1600 mm/s.

Vzdálenost šraf je vždy závislá na šířce návaru. Její hodnota je obvykle 0,7 – 0,9krát menší, aby bylo dosaženo přesahu tavící lázně a natavení všech částic prášku. Nicméně v pracích [10, 11] byla vzdálenost šraf dokonce 1,1 – 1,3krát větší a proces byl stále funkční.

Tvrdost postavených dílů před tepelným zpracováním dosahuje průměrně hodnoty 34 HRC a po tepelném zpracování ji lze zvýšit až na 55 HRC. Obvyklá doba tepelného zpracování je 5–6 hodin při teplotě 480–490 °C. Tímto vhodným tepelným zpracováním lze dosáhnout meze pevnosti materiálu vyšší než 2000 MPa. Tažnost vzorku ovšem poklesla až na hodnotu 1,5 %. Tyto dosažené mechanické vlastnosti korespondují i s prací [2]. Z rešerše vyplývá, že pomocí SLM technologie lze kombinací vhodných procesních parametrů vyrobit díly s relativní hustotou vyšší než 99 %. V práci [13] bylo použito tepelného zpracování pouze po dobu 30 minut při teplotě 830 °C. Proto nedošlo k nárůstu mechanických vlastností, ale pouze k rozpouštěcímu žíhání.

Podle [8] je možné při výkonu laseru 400 W vyrobit díly s plošnou drsností horní i boční stěny vzorku menší než 6  $\mu\text{m}$ , ovšem v této práci nebyly uvedeny parametry rychlosti skenování a šrafovací vzdálenosti, při kterých jich bylo dosaženo. Obdobné drsnosti bylo dosaženo i v práci [17] při výkonu laseru 180 W, rychlosti skenování 600 mm/s, tloušťce vrstvy 30  $\mu\text{m}$  a vzdálenosti šraf 105  $\mu\text{m}$ .

V [4,9] byly zkoumány mřížkové struktury a byla zjištěna vhodnost FCCZ struktury pro její dobrou kombinaci mechanických vlastností a vyplněného prostoru buňkou. Byly ovšem testovány pouze vzorky s velikostí buňky 2 a 3 mm, které měly tloušťku prutů 0,5 a 0,7 mm. Bylo by vhodné prozkoumat větší škálu těchto parametrů.

Z práce [5] vyplývá, že největším technologickým limitem pro stavbu lamel i struktur bude jejich nominální velikost, která by neměla být menší než 0,4 mm, jelikož poté velmi vzrůstá rozměrová odchylka vyrobeného dílu.

---

### **3.3 Podstata a cíle diplomové práce**

Hlavním cílem je optimalizovat procesní parametry pro výrobu segmentu formy pomocí aditivní technologie SLM, kde segment bude tvořen kombinací struktur, skořepin, tenkých lamel a objemových částí.

Dílčím cílem práce je identifikovat technologické limity SLM technologie pro výrobu segmentu. Tento cíl byl splněn na základě zhodnocení a interpretace rešeršní části.

Dále je nutné navrhnout vhodná experimentální tělesa, metody testování a jejich vyhodnocení, aby bylo možné naměřené údaje porovnat se články v prostudované literatuře a zároveň měly vypovídající hodnotu.

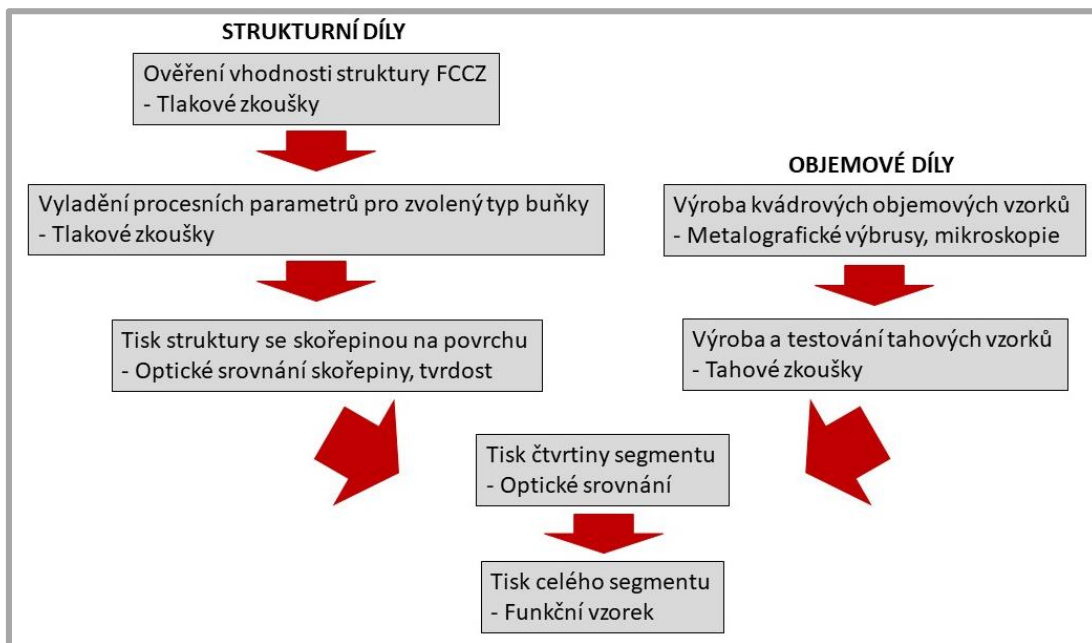
Důležitým dílčím cílem je optimalizovat vlastní výrobní strategii pro objemové a strukturální části segmentu. Zejména je kladen důraz na výběr vhodných procesních parametrů.

Na závěr je nutné experimentálně ověřit výrobní strategii na dílčích částech segmentu a vytisknout funkční vzorek (lisovací segment).

## 4 MATERIÁL A METODY

### 4.1 Postup řešení

Řešení diplomové práce je rozděleno na optimalizaci procesních parametrů strukturních a objemových dílů, které jsou na sobě nezávislé, a proto byly řešeny paralelně. Optimalizace procesních parametrů tenkých stěn (lamely) již není nutná, jelikož se s vhodnými parametry již vyrábějí. Se stejnými procesními parametry bude tisknuta i struktura, jelikož se jedná o obdobný typ dílu. Celý postup řešení práce je znázorněn na obrázku 4.1.



Obr. 4.1 Schéma postupu řešení

### 4.2 Práškový materiál

K vlastní výrobě bylo použito práškového materiálu CL 50WS, který je dodáván firmou Concept Laser pro výrobu na vlastních zařízeních. Tento prášek může být použit k aditivní výrobě nástrojů pro vstřikování, lití a také funkčních součástí. Jeho definované chemické složení je v tabulce 4.1.

Tab. 4.1 Chemické složení materiálu CL 50WS [18]

(%)	Fe	Ni	Co	Mo	Ti	Cr	Si	Mn	C
<b>minimum</b>	69,2	17	8,5	4,5	0,8	0	0	0	0
<b>maximum</b>	64,1	19	10	5,2	1,2	0,25	0,1	0,15	0,03

Výrobce je dáno i doporučené tepelné zpracování dílů po dobu 6–10 hodin při teplotě 540 °C. Zahřívací i ochlazovací rychlost je 100 °C/h. Po tomto tepelném zpracování je možné zaručit mechanické vlastnosti shrnuté v tabulce 4.2.

Tab. 4.2 Mechanické vlastnosti materiálu CL 50WS [18]

Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	E (MPa)	$\lambda$ (W/m·K)	Tvrdost (HRC)
1550	1650	2–3	200 000	20	52

Pro nanášení prášku je možné využít ocelový nebo pryžový břit. Pro tisk dílů v této práci bylo použito druhé varianty, jelikož pomocí ocelového břitu by nebylo možné některé vzorky postavit.

### 4.3 Výrobní zařízení

Zařízení použité pro výrobu dílů byla 3D tiskárna M2 Cusing viz obrázek 4.2, která používá vláknového laseru s vlnovou délkou 1070 nm.



Obr. 4.2 3D tiskárna M2 Cusing [19]

Její důležité technické parametry jsou shrnuty v tabulce 4.3.

Tab. 4.3 Technické parametry zařízení M2 cusing [19]

Velikost stavebního prostoru	250 x 250 x 280 mm <sup>3</sup>
Tloušťka vrstvy	20–80 μm
Maximální skenovací rychlost	7 m/s
Maximální výkon laseru	400 W
Průměr laserového paprsku	50 μm

Na zařízení lze zpracovávat rozličné kovové práškové materiály jako jsou ocel, slitiny hliníku, titanu, niklu, kobaltu a chromu.

#### 4.3.1 Nastavitelné procesní parametry

Pro každý tisknutý díl je možné na tiskárně nastavit originální procesní parametry. Jsou to výkon a rychlost skenování laseru a jeho posuv jeho zaostření ve vertikální ose. V případě jeho záporné hodnoty je stavěcí platforma posunuta nahoru, pro kladnou hodnotu je to opačně. Nastavitelným procesním parametrem je i vzdálenost sousedících šraf laseru.

**Skenovací strategie**

Velký vliv na stavbu dílu má zvolená skenovací strategie. Na stroji M2 Cusing je možné nastavit dvě základní strategie, a to sice kontinuální a ostrůvkovitou. V případě kontinuální strategie jsou dráhy laseru nepřetržité, ostrůvkovitá naopak zaručí rozdělení dílu na čtvercové oblasti, které jsou skenovány v náhodném pořadí. Dále je možno zvolit následující upřesnění strategie:

Otáčející se ostrůvky – skenovací vektor sousedících ostrůvků bude otočen o 90°

Střídavé – skenovací vektor každé následující vrstvy bude otočen o 90°

Obousměrné – skenování bude prováděno ve dvou směrech

Meandr – dva vedlejší skenovací vektory jsou při změně směru spojeny

**4.4 Výběr procesních parametrů**

4.4

Vzhledem k charakteru práce bylo nutné stanovit rozsah studovaných procesních parametrů. V rešeršní části bylo zjištěno, že je vhodné využít vyššího výkonu laseru, s čímž souvisí i vyšší rychlost skenování. Je to z důvodu toho, že by v případě využití stále stejné skenovací rychlosti neúměrně rostla objemová hustota energie a vznikaly by přepálené díly. Tloušťka vrstvy byla zvolena obvyklá pro daný materiál. Byly zvoleny tři různé vzdálenosti šraf.

Tab. 4.4 Zvolené procesní parametry stavby

Výkon laseru	200, 250, 300, 350, 400 W
Rychlost skenování	800, 1000, 1200, 1400, 1600 mm/s
Vzdálenost šraf	70, 90, 110 $\mu\text{m}$
Tloušťka vrstvy	40 $\mu\text{m}$

Skenovací strategie byla zvolena kontinuální s využitím střídání skenovacího vektoru, obousměrného skenování i meandrů. Pro tahové vzorky byla z důvodu velikosti dílu použita ostrůvkovitá strategie s otáčejícími se ostrůvky.

**4.5 Proces zpracování vzorků**

4.5

Vzorky byly s výjimkou tahových na platformě vždy natočeny o 2° z důvodu eliminace poškození pryžového břitu. Po samotném tisku byly všechny vzorky s výjimkou segmentu tepelně zpracovány pod oxidační atmosférou v komorové kalici peci firmy LAC typu PK. Po 5 hodinovém ohřevu následovalo rozpouštěcí žhání při teplotě 830 °C po dobu 30 minut a pozvolné chladnutí v uzavřené peci.

Následně byly vzorky kromě segmentu odřezány elektrojiskrovou drátovou řezačkou C600iA od firmy Fanuc. Proces probíhá pod hladinou vody po celou dobu řezání, což je dle velikosti dílu přibližně 6 hodin. Výhoda řezačky je ta, že je možné nastavit vlastní křivku řezu, což je vhodné například pro odřezávání tahových vzorků. Další postup řešení se lišil dle typu vzorku.

## 4.6 Optimalizace procesních parametrů struktur

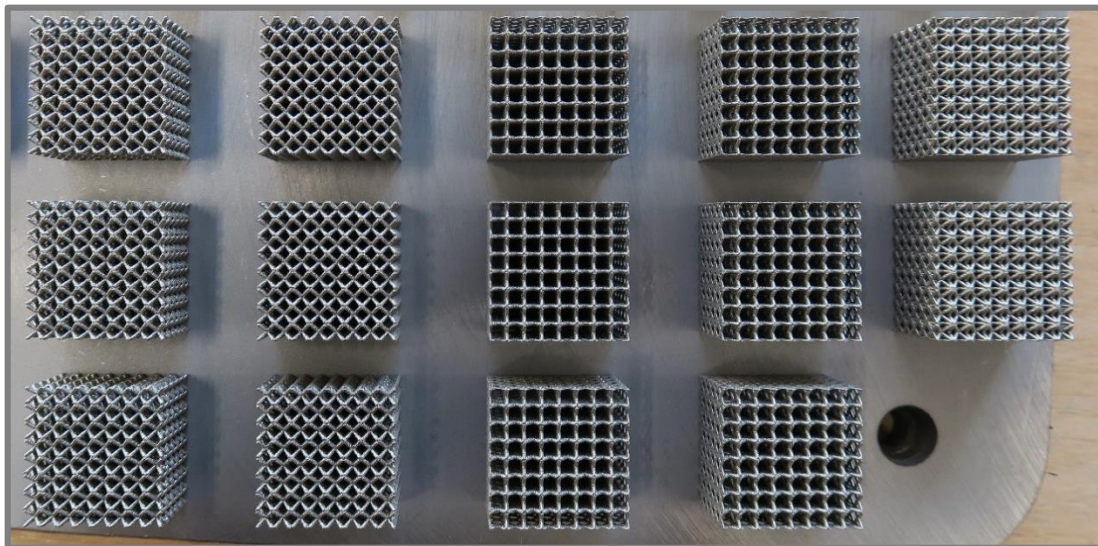
Řešení optimalizace struktur bylo rozděleno do tří fází. První dvě z nich jsou zaměřeny na nalezení a odladění vhodné mřížkové struktury. Třetí se zabývá výrobou a testováním skořepiny postavené na odladěných strukturách.

### 4.6.1 Experimentální ověření vhodnosti volby mřížkové struktury

Pomocí procesních parametrů odladěných pro tenkostěnné prvky (lamely) byly postaveny struktury BCC, BCCZ, FCC, FCCZ a F2BCC. Vzorky po tisku v tomto pořadí zleva doprava je možné vidět na obrázku 4.3. Jeden vzorek struktury F2BC je z důvodu upínacího otvoru platformy umístěn mimo fotografii.

Velikost buňky byla zvolena 3 mm a tloušťka prutů 0,7 mm. Vzorky tedy mají stejné parametry jako ve studii [10], aby bylo možné výsledky s touto prací porovnat. Celkem bylo vyrobeno 15 strukturálních vzorků o velikosti 24x24x15 mm.

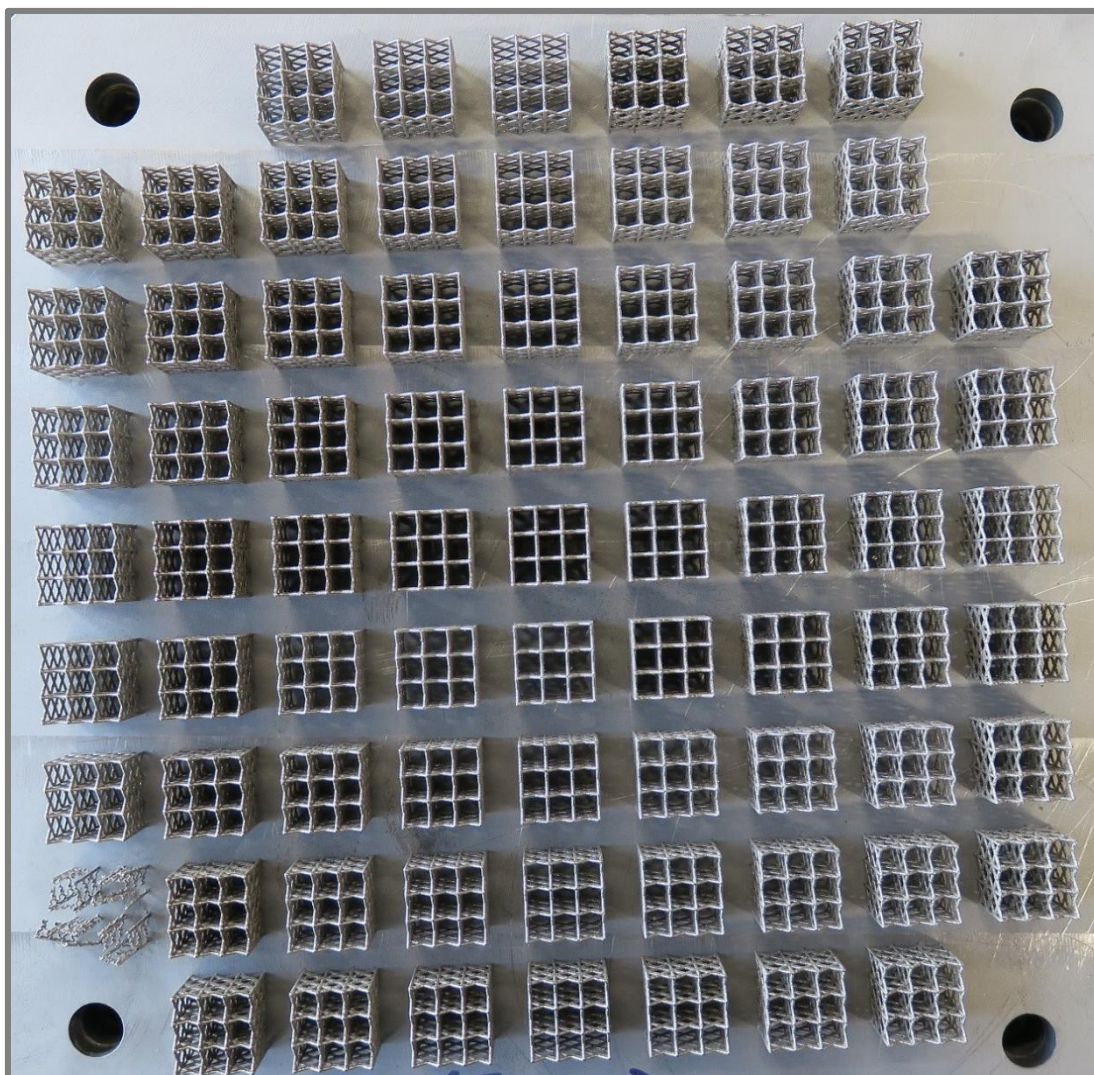
Ty byly následně podrobeny tlakovým zkouškám na zařízení Zwick Z250, které je schopna vyvinout tlakovou sílu 250 kN. Poté byla vypočtena specifická tlaková pevnost struktur a ověřena vhodnost volby mřížkové struktury FCCZ. V případě nepotvrzení domněnky bylo nutné vybrat jinou vhodnou strukturu.



Obr. 4.3 Vzorky pro porovnání vhodnosti struktury

### 4.6.2 Vyladění procesních parametrů pro jeden typ buňky

Ve druhé fázi bylo nutné nalézt vhodné procesní parametry pro tisk vybraného typu mřížkové struktury. Kombinací procesních parametrů v tabulce 4.4 bylo vyrobeno 75 strukturálních vzorků o rozměrech 15x15x15 mm, přičemž velikost jedné buňky byla 5 mm. Tloušťka prutů 0,7 mm byla zvolena z hlediska povolené deformace dle MKP analýzy kolegy Kvaššaye. Vzorky po stavbě jsou na obrázku 4.4. Odřezané vzorky byly opět podrobeny tlakovým zkouškám a dle nejvyšší tuhosti byly vybrány nejvhodnější procesní parametry pro stavbu struktur.



Obr. 4.4 Vzorčky pro optimalizaci procesních parametrů struktur

#### 4.6.3 Tisk struktury se skořepinou

4.6.3

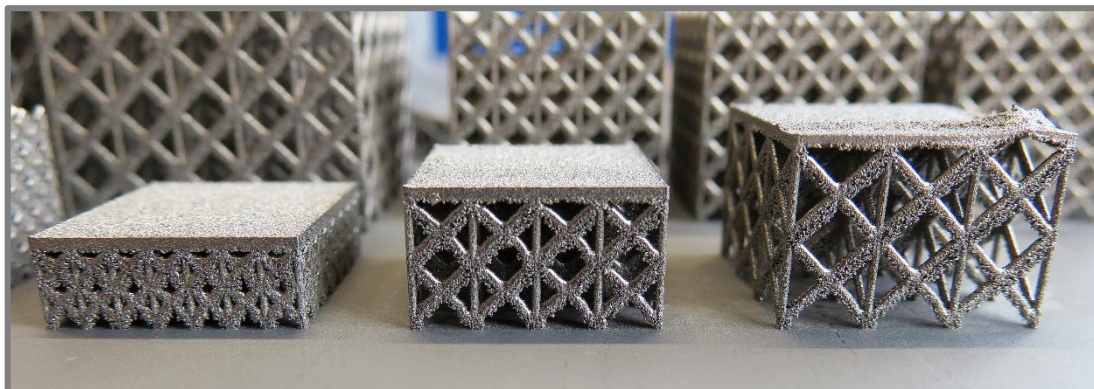
V následující fázi optimalizace struktur již byly na zvoleném typu mřížkových struktur s odladěnými procesními parametry stavěny skořepiny.

##### Tisk vodorovné skořepiny na struktuře

Nejprve byla na strukturách s odladěnými parametry a velikostí buněk 3, 5 a 7 mm postavena vodorovná skořepina o velikosti 20 x 20 mm a tloušťce 1 mm. Skořepiny byly vyfoceny na optickém mikroskopu a vzorky byly opticky zdigitalizovány. Také byla vyhodnocena plošná drsnost povrchu skořepiny na optickém profilometru Contour GT X8.

Pro samotné měření byl použit objektiv se zvětšením 5x a předsádkou 0,55x. Celkové zvětšení aparatury je tedy 2,75x. Měřitelná oblast je v tomto případě 2,2x1,6 mm s laterálním rozlišením 3,4  $\mu\text{m}$ . Pro interferenci bylo použito zelené světlo. Pro dopočítání chybějících dat byla použita funkce *Data restore* s nastavením *Legacy* a počtem iterací 15. Poté byla použita funkce *Terms removal* pro kompenzaci naklonění a obvykle i křivosti vzorků. Poslední korekční funkcí byl *Gaussian regression filter* pro odstranění vlivu vlnitosti s větší vlnovou délkou než 2,5 mm.

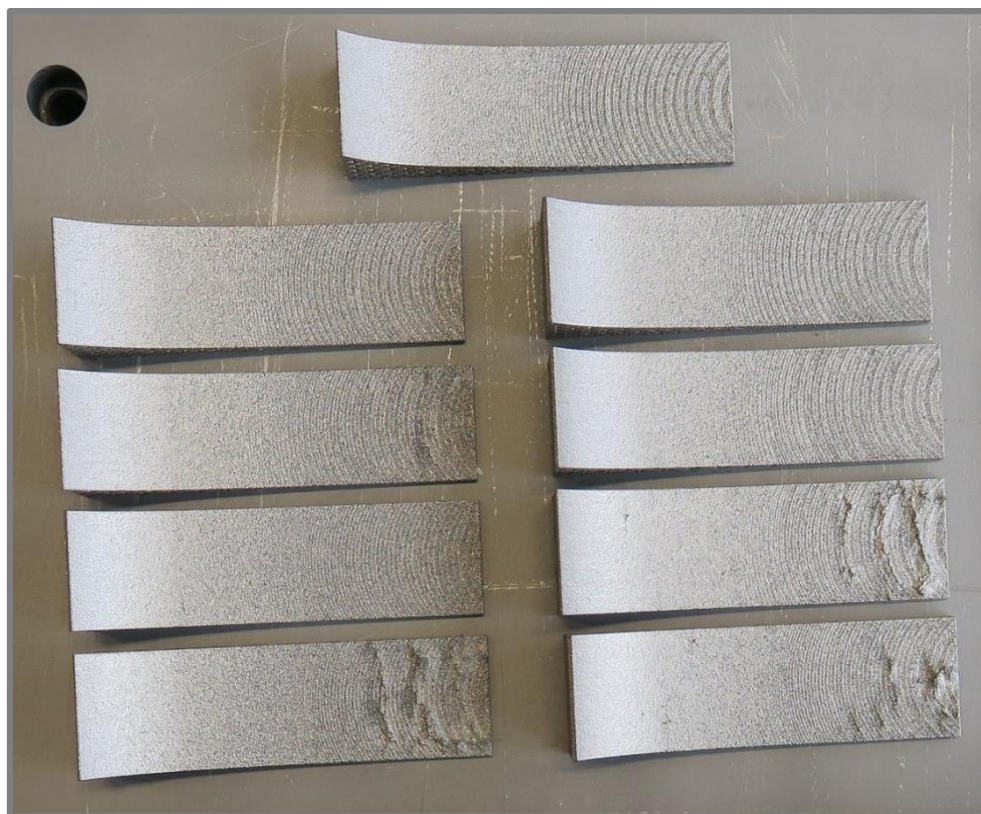
Následně byly vytvořeny metalografické výbrusy a změřena tvrdost skořepiny HV 0,3 pomocí mikrotvrdoměru LECO LM 274 AT. Na obrázku 4.5 vpravo je možné vidět kolaps tisku skořepiny na struktuře s velikostí buňky 7 mm.



Obr. 4.5 Porovnání tisku vodorovné skořepiny na struktuře

### Tisk tvarové skořepiny na struktuře

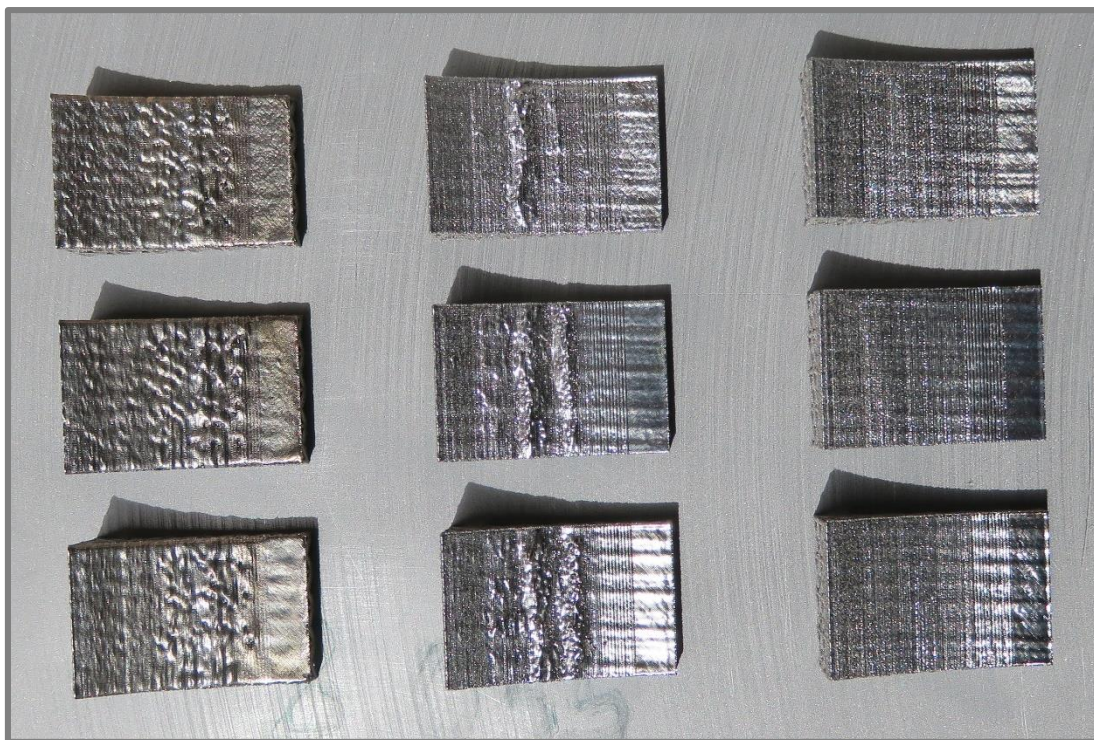
Dále byl již vytisknut reálný tvar skořepiny, který se vyskytuje v části segmentu o šířce 20 mm. Velikost buňky struktury byla opět zvolena 3, 5 a 7 mm. Tloušťka skořepiny byla 0,5; 0,7 a 1 mm. Celkem tedy bylo vyrobeno 9 vzorků. Ty byly naskenovány pomocí 3D skeneru ATOS Triple Scan a byla změřena jejich odchylka od modelu. Díly po tisku je možné vidět na obrázku 4.6. Opět je v dolní části snímku zřetelný kolaps tisku skořepiny na její nejrovnější části v případě struktury o velikosti 7 mm. Tento jev je patrný v případě všech zvolených tlouštěk skořepiny.



Obr. 4.6 Vzorky pro testování tisku tvarové skořepiny na struktuře

### Tisk úhlové skořepiny na strukturu

Jelikož na předchozích vzorcích nebylo dosaženo dostatečně nízké drsnosti skořepiny, bylo následně přistoupeno k tisku skořepiny s odstupňovaným úhlem ploch od  $0^\circ$  do  $25^\circ$ , které měly nejvyšší drsnost povrchu. K tisku již byla použita pouze struktura o velikosti buňky 5 mm. Tloušťka skořepiny byla opět testována 0,5; 0,7 a 1 mm. Dalším proměnným parametrem byl počet přetavování posledních tří vrstev dílu. Ten byl zvolen 2x, 3x a 4x. Drsnost skořepiny vzorků na obrázku 4.7 byla opět změřena na profilometru.



Obr. 4.7 Vzorky pro testování zlepšení drsnosti přetavováním

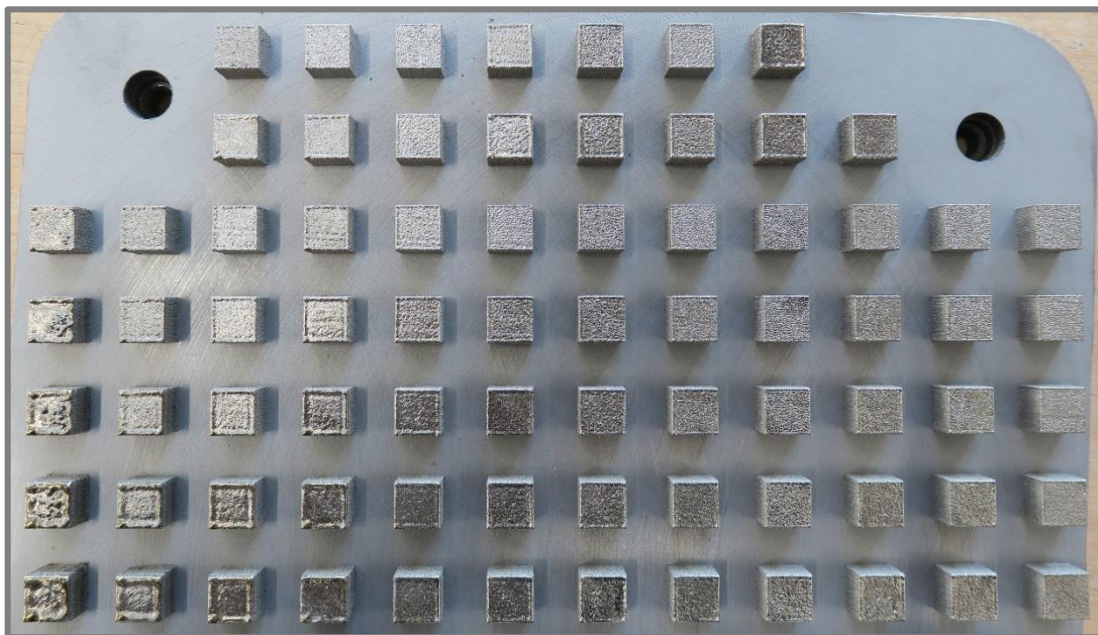
Vlevo jsou vzorky s tloušťkou skořepiny 0,5 mm, na kterých je patrná vysoká drsnost zejména v oblasti sklonu  $5^\circ$  až  $15^\circ$ . V obdobné oblasti je zřetelná i deformace vzorků v prostřední části, které měly skořepinu tlustou 0,7 mm. Na všech postavených vzorcích je zřetelná vlnitost viditelná zejména v oblastech nižšího sklonu skořepin. Vzniklá vlnitost je pravidelná s rozstupem vln 5 mm, a tudíž je pravděpodobně její vznik způsoben přílišným nánosem prášku poškozeným pryžovým břitem po stavbě struktur, které měly tuto rozteč.

### 4.7 Optimalizace procesních parametrů objemových vzorků

V této fázi bylo opět kombinací vybraných procesních parametrů v tabulce 4.4 vyrobeno 75 objemových vzorků o rozměrech 10x10x8 mm. Tato velikost byla zvolena vzhledem ke vhodnému rozložení na platformě a dostatečně reprezentativní velikosti objemových dílů.

Následně byla na platformě změřena tvrdost vzorků dle Vickerse pomocí přenosného tvrdoměru TH-1100. Všechny vzorky byly úspěšně vytisknuty, což značí

vhodný výběr rozsahu procesních parametrů. Na obrázku 4.8 je jejich rozmístění na platformě a vlevo dole také přepálené vzorky z důvodu příliš vysoké energie stavby.



Obr. 4.8 Vytisknuté objemové vzorky

Po odřezání vzorků byly vytvořeny metalografické výbrusy. Ty byly nafoceny na mikroskopu ZEISS Axio Observer Z1m. Porozita vzorků byla vyhodnocena pomocí programu ImageJ. Snímky byly nejprve převedeny do 8 bitové barevné hloubky. Samotná porozita byla vyhodnocena pomocí makra jPOR.

#### 4.7.1 Tahové vzorky

Procesní parametry, při kterých byla dosažena nejnižší porozita, byly použity pro tisk tahových vzorků dle DIN 50125 typ C o rozměrech tahové oblasti 8 x 40 mm. Celkem bylo vyrobeno 12 tahových vzorků pro 4 vhodné kombinace procesních parametrů. Ty byly testovány tahovou zkouškou na zařízení Zwick Z250. Vzhledem k velikosti vzorků byla zvolena ostrůvkovitá strategie šrafování s velikostí ostrůvku 5x5 mm. Vybrané procesní parametry jsou shrnuté v tabulce 4.5.

Tab. 4.5 Zvolené procesní parametry tahových vzorků

Číslo vzorku	Výkon laseru (W)	Rychlost skenování (mm/s)	Vzdálenost šraf (μm)
1-3	350	1000	70
4-6	400	1600	70
7-9	200	800	110
10-12	350	1000	110

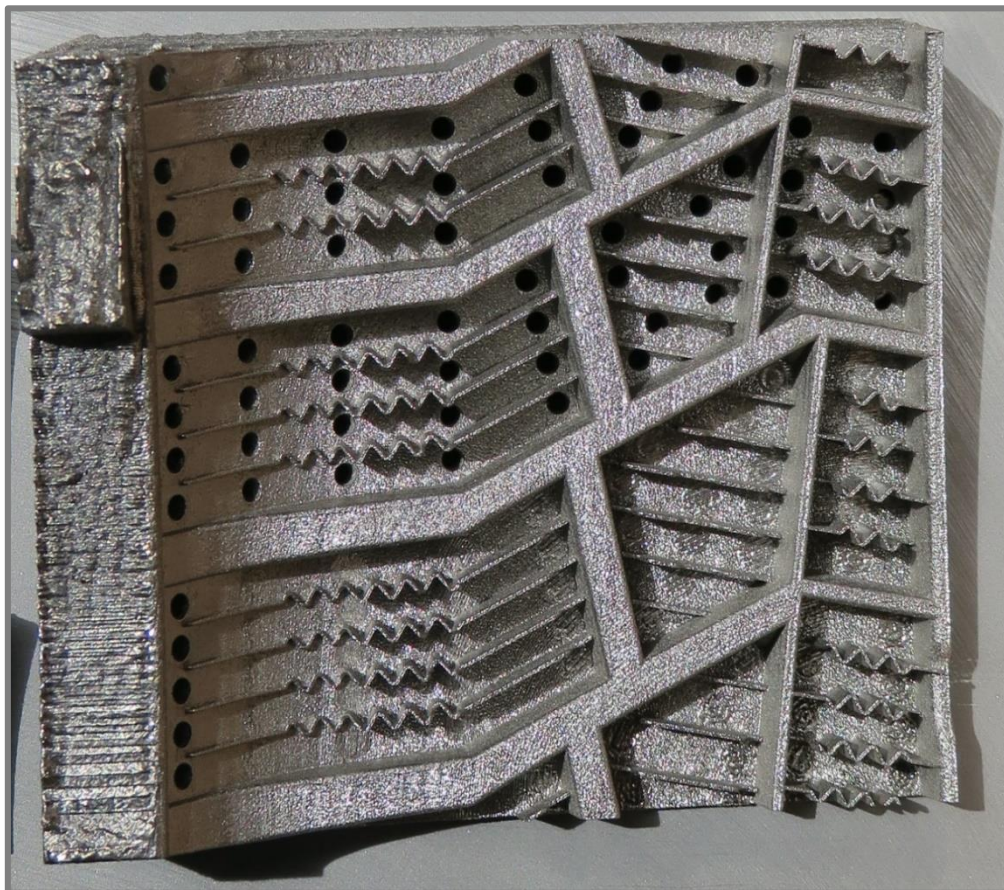
Tahovou zkouškou vzorků 1-3 a 10-12 bylo možné zjistit, zda závisí mechanické vlastnosti na vzdálenosti šraf. Byly také vybrány perspektivní procesní parametry pro nejvyšší rychlost skenování 1600 mm/s (vzorky 4-6). Pro porovnání závislosti na výkonu laseru slouží vzorky 7-9. Jeden vzorek ze sady byl o 5 mm delší, přičemž byl tento kus použit k vytvoření metalografického výbrusu pro změření porozity

a následné naleptání. To bylo provedeno 5% kyselinou dusičnou na alkoholové bázi po dobu několika sekund.

#### 4.8 Tisk lisovacího segmentu

4.8

Po nalezení vhodných procesních parametrů pro tisk struktur a objemový materiál bylo již možné přistoupit k tisku reprezentativní části čtvrtiny segmentu, kde se všechny tyto prvky vyskytují. Analýzou tohoto dílu byla pomocí 3D skeneru změřena geometrická odchylka od modelu. Vytisknutý vzorek je na obrázku 4.9.



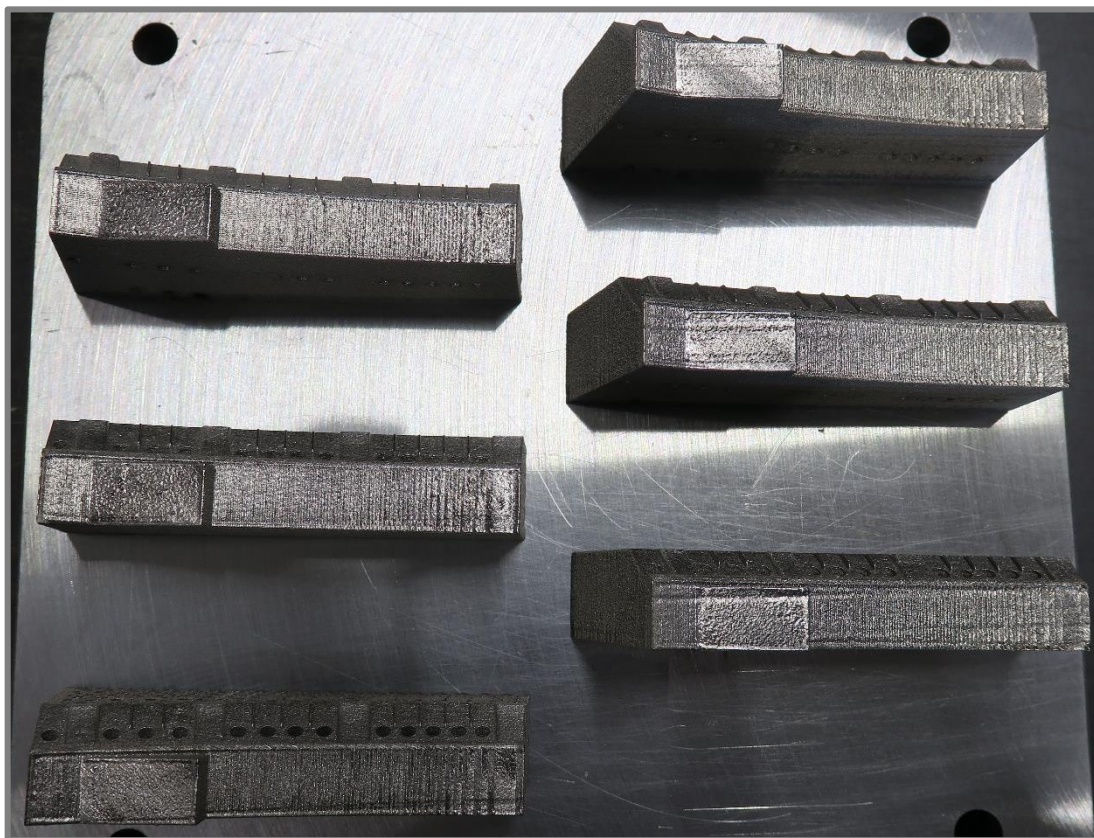
Obr. 4.9 Čtvrtina segmentu

Vzhledem k tomu, že byla špatně vytisknuta nejvyšší část dílu, bylo rozhodnuto provést optimalizaci její výroby. V další části bylo proto vytisknuto 6 pásů o šířce 20 mm obsahujících tuto část, kde byl zkoumán vliv změny geometrie struktury či procesních parametrů tisku. Jejich přehled je v tabulce 4.6.

Tab. 4.6 Přehled změn optimalizace nejvyšší části dílu

Číslo vzorku	Změna dílu
1	Tisk horní objemové části procesními parametry skořepiny
2	Objemové části tisknuté s parametry tahových vzorků 10 - 12
3	Použití konických podpor
4	Zaslepené otvory v boční stěně, větší otvory pro vysypání prášku
5	Pootočení struktury o 45°
6	Gradientní struktury

Vzorčky po stavbě v tomto pořadí seshora dolů jsou na obrázku 4.10.



Obr. 4.10 Vzorky pro test kvality objemu

Ani na jediném vzorku nedošlo ke kolapsu stavby nejvyšší objemové části tak jako v případě čtvrtiny segmentu. Je to způsobeno množstvím vzorků, kdy byl v průběhu výroby jedné vrstvy větší čas na odvod tepla z místa stavby. Nicméně stále jsou na vzorcích 3, 5 a 6 viditelné rýhy vzniklé přejezdy nanášecího zařízení s poškozeným pryžovým břitem. Pro tisk objemových částí lisovacího segmentu byly vybrány procesní parametry vzorku číslo 2.

V případě dostatečně nízké rozměrové odchylky i porozity bylo možné přistoupit již k tisku celého lisovacího segmentu. Opět bylo na jedné jeho polovině použito dutých a na druhé plných válečků viz obrázek 4.11. Na žádné z objemových částí nebylo zaznamenáno poškození nanášecím pryžovým břitem prášku.

Odhadovaná doba stavby segmentu byla 34 hodin. V průběhu stavby se ovšem vyskytl problém s výpočtem vektorů skenování strukturní části v reálném čase. Bylo proto rozhodnuto k rozdělení tohoto dílu na devět částí, což tento problém částečně vyřešilo. Nicméně i přesto trval reální tisk segmentu 80,5 hodiny. Vzorek nebyl tepelně zpracován, aby bylo možné zjistit, zda způsobí zbytkové pnutí dílu deformaci stavěcí platformy a zkroucení dílu. Optické srovnání bylo opět provedeno pomocí 3D skeneru ATOS Triple Scan.



Obr. 4.11 Lisovací segment

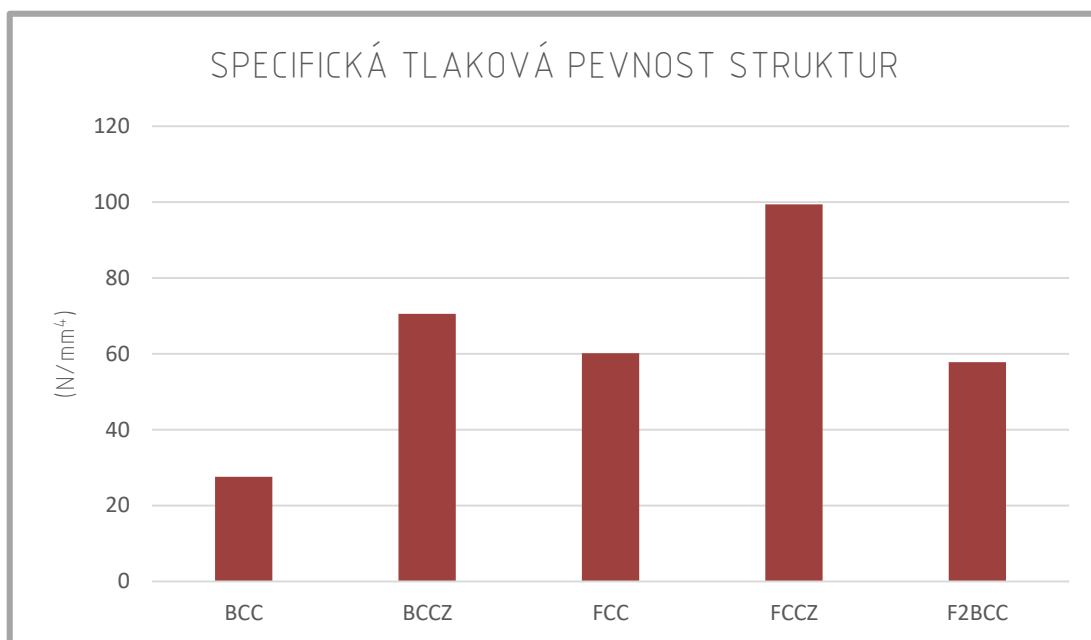
## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Strukturní díly

Výsledky byly opět rozděleny dle jednotlivých fází tisku jako v části 4.

#### 5.1.1 Volba struktury

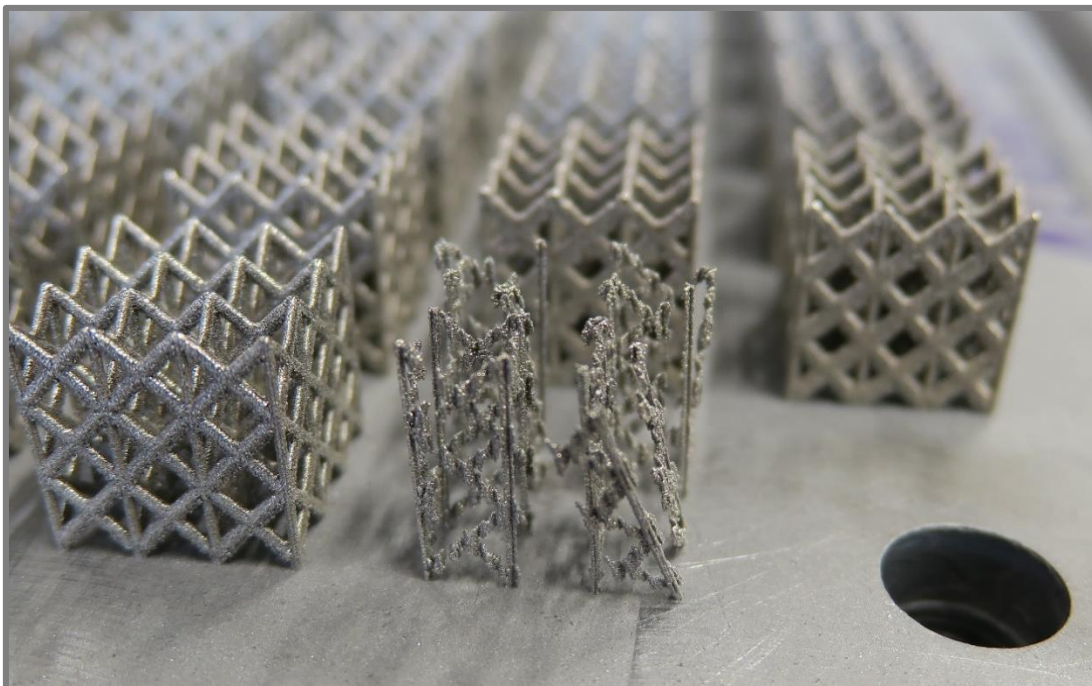
Na obrázku 5.1 je možné vidět porovnání specifické tlakové pevnosti struktur. Je to poměr jejich tuhosti ku objemu struktury. Tuhost vzorků byla vypočtena z lineární oblasti zatěžování v průběhu tahové zkoušky. Objem struktury byl vypočten z její hmotnosti. Hustota maraging oceli byla uvažována  $8,1 \text{ g/cm}^3$ . Struktura FCCZ má tento poměr nejvyšší a byl tedy potvrzen předpoklad o její vhodnosti. Problematikou výběru a zatěžování struktur se více zabýval ve své diplomové práci pan Kvaššay.



Obr. 5.1 Porovnání specifické tlakové pevnosti struktur

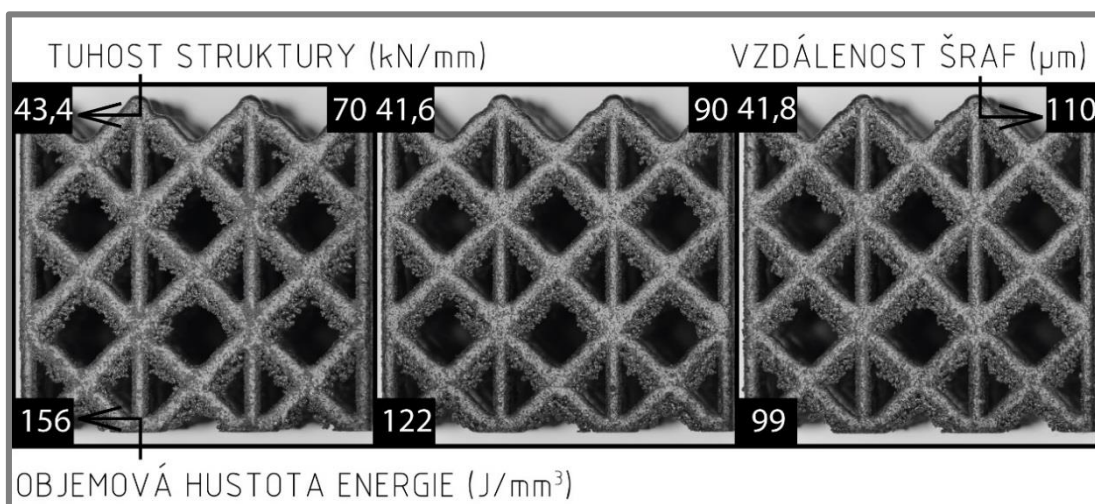
#### 5.1.2 Optimalizace procesních parametrů struktury FCCZ

Vzorky byly úspěšně vyrobeny kromě struktury stavěné s výkonem laseru 400 W, rychlostí skenování 800 mm/s a vzdáleností šraf 70  $\mu\text{m}$ . Ta měla největší objemovou hustotu energie ze všech vzorků  $178 \text{ J/mm}^3$ , takže došlo k nedostatečnému odvodu tepla a selhání stavby, což je patrné na obrázku 5.2.



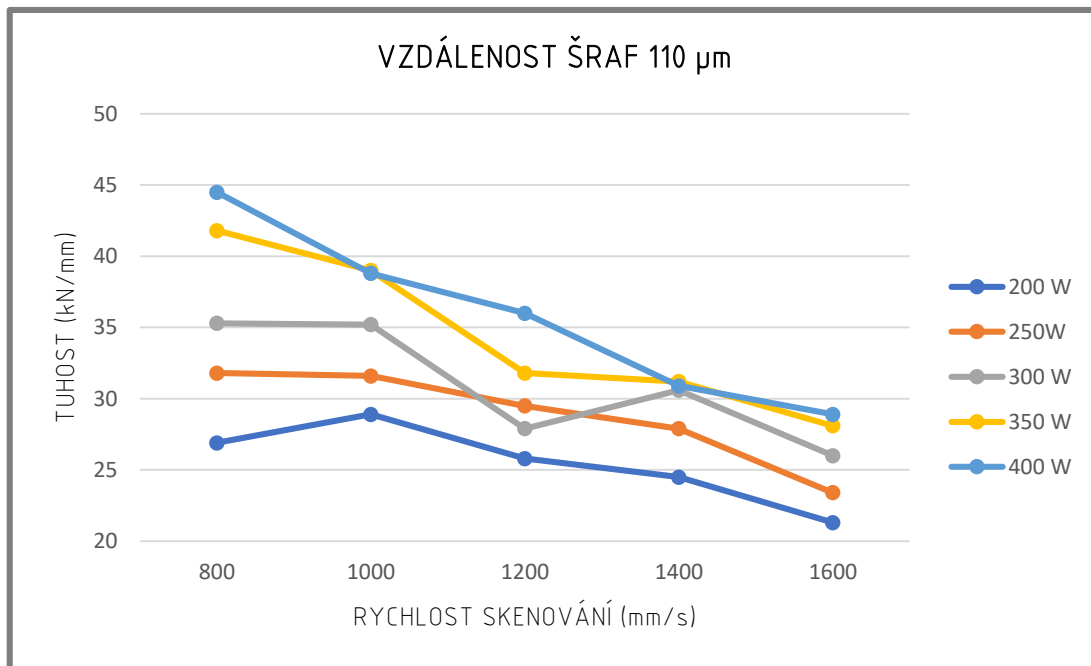
Obr. 5.2 Kolaps stavby vzorku z důvodu vysoké hustoty energie

Na obrázku 5.3 je porovnání struktur pro zvolené vzdálenosti šraf při výkonu laseru 350 W a rychlosti skenování 800 mm/s. Nejvyšší tuhost 43,4 kN/mm byla dosažena v případě vzdálenosti šraf 70  $\mu\text{m}$ . Pokud byla zvýšena na 110  $\mu\text{m}$ , tak se tuhost zmenšila pouze nepatrně na hodnotu 41,8 J/mm<sup>3</sup>, a proto byly tyto procesní parametry vybrány pro tisk dalších vzorků.



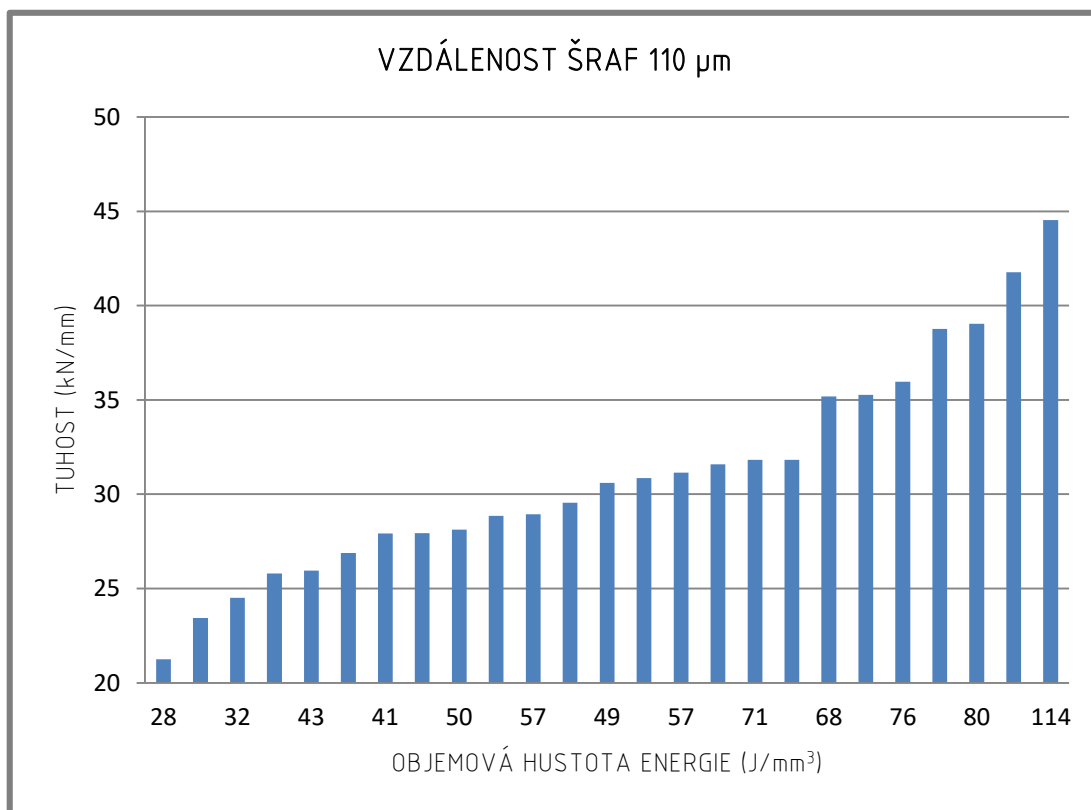
Obr. 5.3 Porovnání tuhosti struktur

Celkové procesní mapy pro jednotlivé vzdálenosti šraf jsou v přílohách 2, 3 a 4. Dále byly vytvořeny grafy závislosti tuhosti na rychlosti skenování pro jednotlivé výkony laseru rozdělené dle jednotlivých vzdáleností šraf. Pro hodnotu 110  $\mu\text{m}$  je na obrázku 5.4.



Obr. 5.4 Závislost tuhosti struktury na rychlosti skenování pro jednotlivé výkony

Je možné vidět, že tuhost klesá se zvyšující se rychlostí skenování i se zmenšováním výkonu laseru. Trend zvyšování tuhosti v případě rostoucí objemové hustoty energie je zřetelný na obrázku 5.5.



Obr. 5.5 Závislost tuhosti na objemové hustotě energie

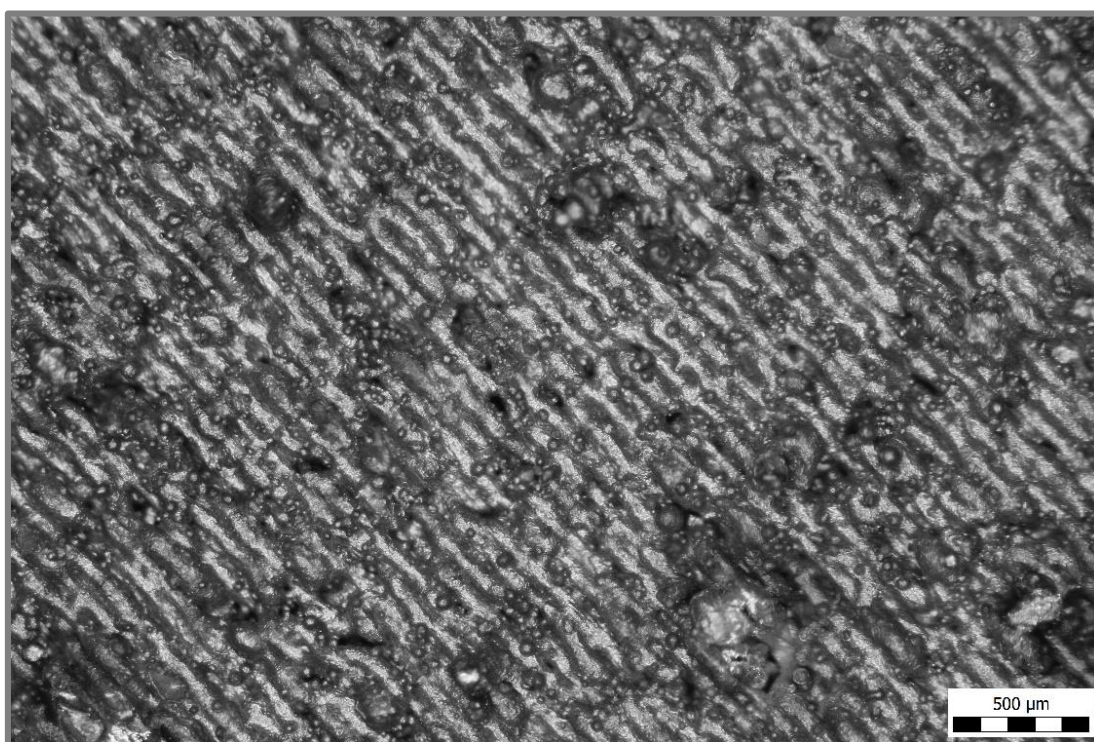
Rozdíl tuhosti mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou objemové hustoty energie je více než dvojnásobný. Grafy závislostí pro všechny vzdálenosti šraf jsou v přílohách 5 a 6.

### 5.1.3 Tisk skořepiny na struktuře

Tato fáze je opět rozdělena na tři typy vzorků, tak jako v kapitole 4.

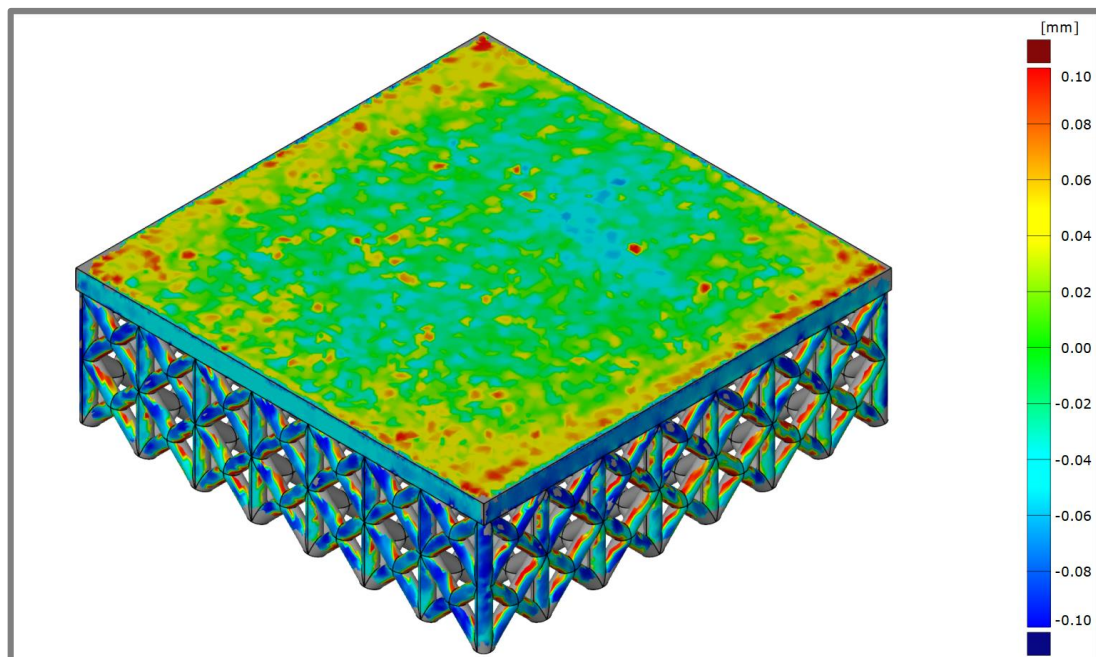
#### Vodorovná skořepina

Na obrázku 5.6 je mikrofotografie skořepiny postavené na struktuře s velikostí buňky 3 mm. Diagonálně jsou zřetelné jednotlivé diskontinuální návary přerušované porozitou. Také jsou viditelné jednotlivé neroztavené částice prášku. Obdobně byly vytisknuty i vzorky s velikostí buněk 5 a 7 mm. Snímky celých vzorků jsou k dispozici v příloze 7.



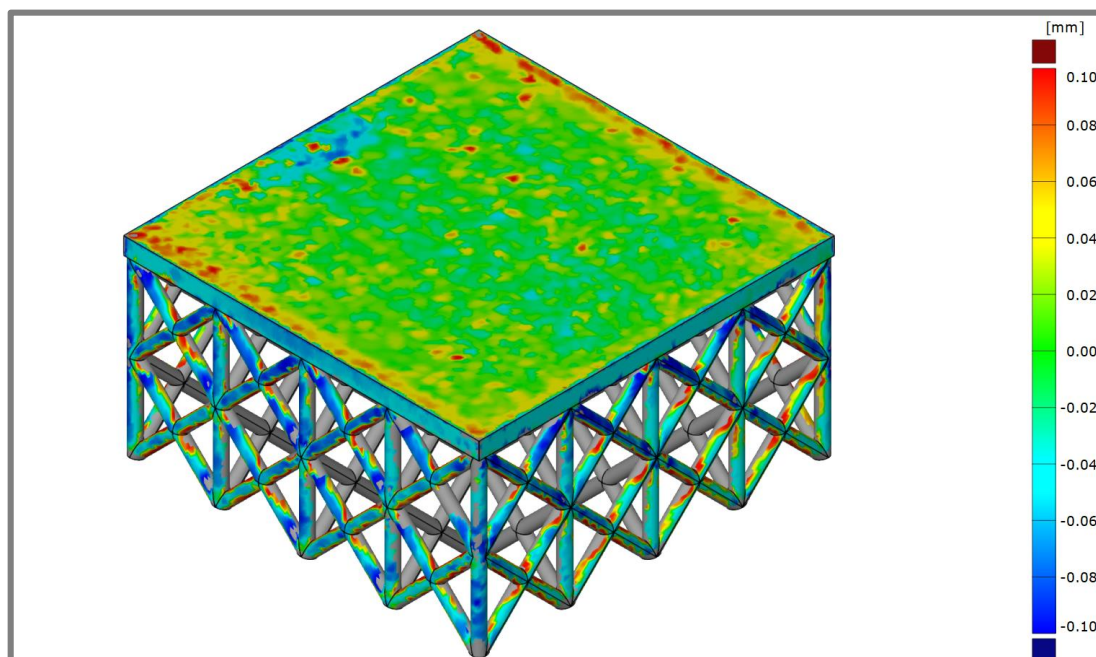
Obr. 5.6 Mikrofotografie skořepiny postavené na 3 mm buňce

Následně byly vzorky opticky zdigitalizovány a byla změřena jejich odchylka od modelu. Na obrázku 5.7 je toto porovnání provedeno pro 3 mm buňku.



Obr. 5.7 Optické srovnání skořepiny postavené na 3 mm buňce

Absolutní odchylka skořepiny je 0,1 mm, přičemž nejvíce vystupuje na okrajích a uprostřed je propadlá. Stranově je vyrobená skořepina i struktura naopak o tuto hodnotu menší. Tyto trendy jsou patrné i v případě velikosti buňky 5 mm viz. obrázek 5.8.



Obr. 5.8 Optické srovnání skořepiny postavené na 5 mm buňce

Skořepina je v tomto případě nejvíce propadlá na jednom okraji vzorku. Je možné, že prohnutí vzorku souvisí s nedostatečným nanesením prášku, jelikož na tomto okraji je prášek nanášen jako poslední. V případě velikosti buňky 7 mm došlo ke kolapsu stavby

skořepiny, a proto nemá optické srovnání své opodstatnění. Skořepina v tomto případě vystoupila o 1,5 mm. V tabulce 5.1 jsou změřené parametry vzorků.

Tab. 5.1 Změřené parametry vodorovných skořepin

Velikost buňky (mm)	Hmotnost (g)	Tvrдость HV 0,3	Plošná drsnost povrchu (μm)
3	9,841	347	24,1
5	7,774	340	21,2
7	7,686	343	23,1

Hmotnosti postavených vzorků jsou o 8–10 % vyšší než model. Je to způsobeno nalepeným práškem ze spodních stran prutů struktury. Také je možné vidět, že tvrdost ani drsnost povrchu nezávisí na velikosti buňky. Tvrдость skořepiny je srovnatelná s tepelně nezpracovanými vzorky. Bylo by vhodné, aby drsnost povrchu byla menší než 10 μm, což v tomto případě není dodrženo.

### Přetavování

Drsnost povrchu je obvykle možné zlepšit opakovaným přetavováním několika posledních vrstev vzorků. Pro tento test byly vyrobeny čtyři destičky, přičemž jedna byla se standartními parametry pro výrobu lamel pro porovnání. Další tři z nich byly v posledních třech vrstvách stavěny s jednonásobným přetavováním, přičemž úhel šrafování byl pootočen o 45°, 72° a 90° oproti standartní vrstvě. Dosažené drsnosti jsou shrnuty v tabulce 5.2.

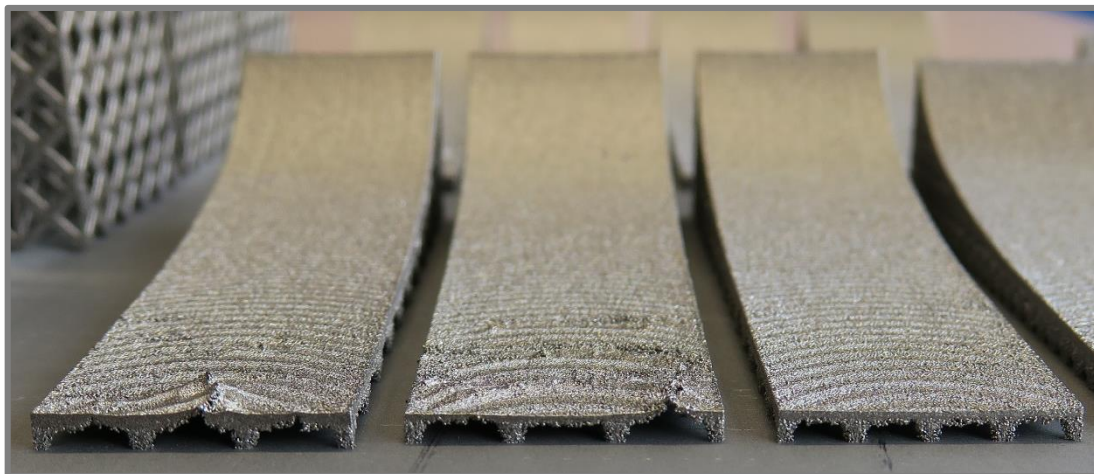
Tab. 5.2 Změna drsnosti přetavováním

Přetavování	Bez	Úhel přetavování		
		45°	72°	90°
<b>Drsnost povrchu (μm)</b>	20,4	22,9	21,2	19,9

Bylo zjištěno, že jednonásobné přetavování nemá na výslednou drsnost povrchu žádný vliv, nicméně drsnost povrchu je příliš vysoká, a proto bylo v následující fázi přistoupeno k vícenásobnému přetavování.

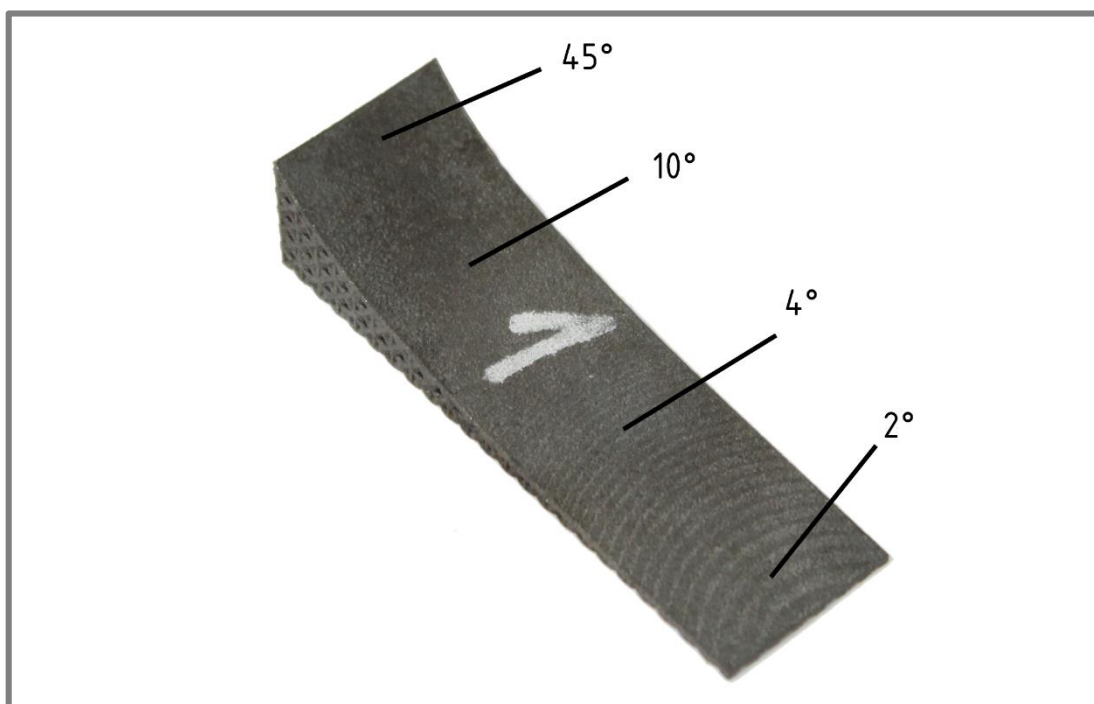
### Tvarová skořepina

Následně byla tisknuta tvarová část segmentu o šířce 20 mm. Na obrázku 5.9 je možné vidět kolaps stavby skořepiny v případě velikosti buňky 7 mm a tloušťce skořepiny 0,5 a 1 mm. Vzdálenost mezi buňkami byla v tomto případě příliš velká a došlo k vyzdvižení struktury uprostřed mezi pruty struktury.



Obr. 5.9 Kolaps skořepiny v případě velikosti buňky 7 mm

Následně byla na skořepinách všech vzorků změřena drsnost povrchu na čtyřech místech sklonu skořepiny dle obrázku 5.10. Je možné vidět, že na větší části vzorků je zvětšování sklonu pozvolné, přičemž v poslední části následuje strmý nárůst až do velikosti úhlu  $45^\circ$ .



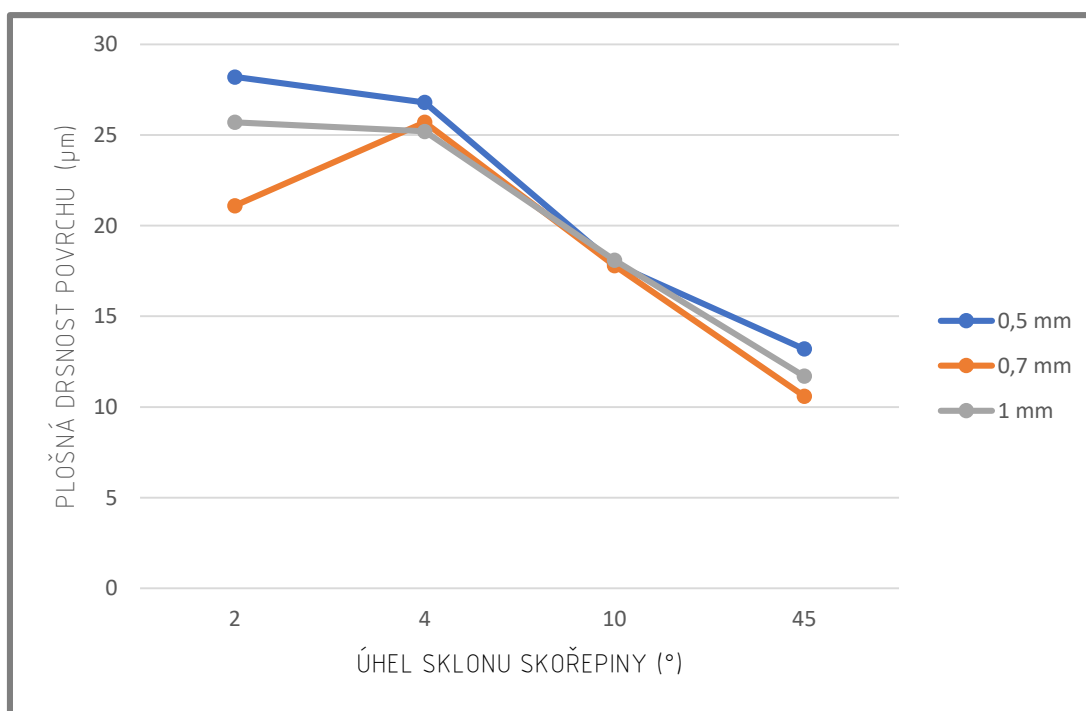
Obr. 5.10 Místa měření drsnosti s jednotlivými sklony

V tabulce 5.3 jsou již změřené drsnosti pro jednotlivé velikosti buněk a tloušťky skořepin i s jejich průměrnou hodnotou.

Tab. 5.3 Drsnost tvarových skořepin

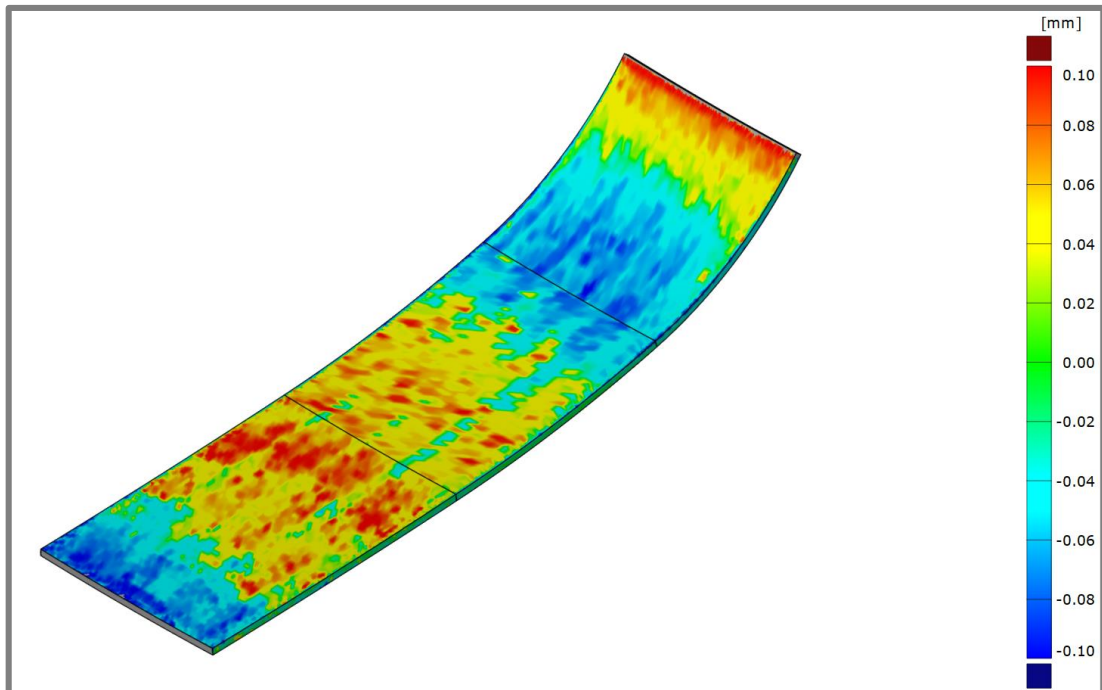
Velikost buňky	Tloušťka skořepiny	Plošná drsnost skořepiny pod úhlem ( $\mu\text{m}$ )				
		2°	4°	10°	45°	Průměr
3 mm	0,5 mm	26,1	23,7	22,5	13,3	21,4
	0,7 mm	24,4	26,7	18,4	12,5	20,5
	1 mm	22,1	23,0	16,9	10,6	18,2
5 mm	0,5 mm	28,2	26,8	17,9	13,2	21,5
	0,7 mm	22,1	23,0	16,9	10,6	18,2
	1 mm	25,7	25,2	18,1	11,7	20,2
7 mm	0,5 mm	61,6	20,3	16,2	10,4	27,1
	0,7 mm	31,7	26,6	18,1	11,7	22,0
	1 mm	123,8	27,0	17,6	10,6	44,8

Je možné vidět, že drsnost klesá se zvětšujícím se úhlem skořepiny, přičemž nejnižší dosažená drsnost byla ve více případech přibližně  $10,5 \mu\text{m}$ . Největší velikost buňky, na které je možné skořepinu úspěšně postavit je 5 mm. Graf závislosti plošné drsnosti povrchu na úhlu sklonu skořepiny pro jednotlivé tloušťky skořepin je na obrázku 5.11.



Obr. 5.11 Závislost drsnosti na úhlu sklonu skořepiny, velikost buňky 5 mm

Je zřejmé, že nejnižší drsnost byla v případě tloušťky skořepiny 0,7 mm, nicméně by bylo vhodné provést ještě jeden test, kdy by byla tato domněnka potvrzena. Na obrázku 5.12 je možné vidět optické porovnání této skořepiny od modelu.



Obr. 5.12 Optické srovnání 0,7 mm skořepiny na struktuře s 5 mm buňkou

Absolutní odchylka od modelu byla 0,1 mm. Trend dvojnásobného prohnutí skořepiny v průběhu vzorku byl sledován pro všechny porovnávané vzorky.

### Úhlové skořepiny

Na skořepině s odstupňovanou velikostí úhlu sklonu skořepiny byl sledován vliv vícenásobného přetavování na skořepinách o různých tloušťkách. Výsledky jsou přehledně zobrazeny v tabulce 5.4.

Tab. 5.4 Porovnání drsnosti úhlové skořepiny

Počet přetavování	Tloušťka skořepiny	Plošná drsnost skořepiny pod úhlem ( $\mu\text{m}$ )						
		0°	5°	10°	15°	20°	25°	Ø
2x	0,5 mm	15,5	55,6	60,4	59,3	25,1	26,0	40,3
	0,7 mm	18,7	20,3	18,9	68,4	23,7	15,6	27,6
	1 mm	16,6	23,4	19,6	21,3	19,3	18,2	19,7
3x	0,5 mm	11,5	30,9	88,7	47,1	25,2	20,9	37,4
	0,7 mm	16,7	18,7	75,9	94,4	34,3	22,4	43,7
	1 mm	13,4	23,7	17,4	20,1	29,2	22,7	21,1
4x	0,5 mm	11,5	42,1	41,0	32,0	23,6	14,8	27,5
	0,7 mm	19,8	18,0	109,4	68,2	59,4	33,9	51,5
	1 mm	22,2	23,0	16,7	17,6	20,0	16,8	19,4

Nejnižší plošné drsnosti 11,5  $\mu\text{m}$  bylo dosaženo při úhlu skořepiny 0° o tloušťce 0,5 mm a počtu přetavování shodně 3x i 4x. Oproti jednonásobnému přetavování byla na vodorovné ploše snížena drsnost povrchu na poloviční hodnotu. Pro vzorky s tloušťkou skořepiny 0,5 a 0,7 mm byl ovšem zaznamenán nárůst drsnosti v oblasti úhlu skořepiny 5° až 15° z důvodu popsaného v kapitole 4.6.4. Průměrná drsnost byla proto nejnižší u vzorků s tloušťkou skořepiny 1 mm.

## 5.2 Objemové díly

5.2

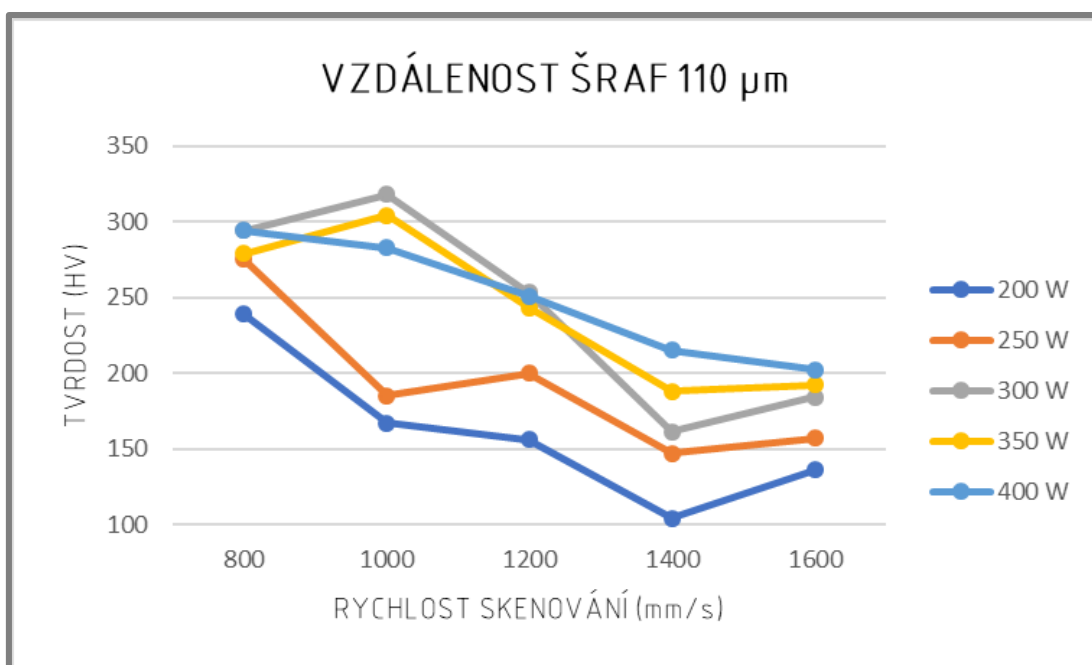
Objemové díly byly analyzovány z hlediska tvrdosti, redukce a typu porozity.

### 5.2.1 Tvrdost objemových dílů

5.2.1

Tvrdost objemových vzorků byla měřena na jejich horních stěnách. Výsledná tvrdost je průměrnou hodnotou z pěti měření. Největší tvrdost 320 HV byla naměřena při výkonu laseru 300 W, rychlosti skenování 1000 mm/s a vzdálenosti šraf 70 i 110  $\mu\text{m}$ . To je nejnižší tvrdost, která je obvykle dosahována aditivní technologií bez tepelného zpracování. Správně tepelně zpracované vzorky by měly mít tvrdost alespoň 515 HV [3].

Na obrázku 5.13 je možné vidět závislost změřené tvrdosti na rychlosti skenování pro jednotlivé výkony laseru při šrafovací vzdálenosti 110  $\mu\text{m}$ . Je zřejmá klesající tendence tvrdosti při zvyšování rychlosti skenování a snižování výkonu laseru. Závislosti pro všechny vzdálenosti šraf je možné nalézt v [příloze 7](#).



Obr. 5.13 Závislost tvrdosti na rychlosti skenování pro vzdálenost šraf 110  $\mu\text{m}$

Nízké hodnoty změřených tvrdostí je možné odůvodnit pravděpodobně špatnou metodikou měření. Pro přesné měření je totiž nutné, aby byla drsnost měřených dílů menší než 5  $\mu\text{m}$ . To určitě u všech objemových dílů splněno nebylo, takže mohlo dojít k pohlcení pádové energie jinou plochou než tou na dopadovém tělísku.

Dalším problémem by mohlo být nevhodně zvolené tepelné zpracování, které bylo po dobu 30 minut při teplotě 830  $^{\circ}\text{C}$ . To je obvyklé tepelné zpracování použité pro lamely, kdy je potřeba zachování dostatečné tažnosti, aby nedošlo ke křehkému lomu vzorku. Výsledkem tohoto tepelného zpracování je tedy spíše jen ochrana proti korozi a také snížení vnitřního pnutí. Z hlediska tvrdosti vzorků by bylo vhodnější standardní tepelné zpracování pro tento materiál, což je po dobu 5 až 6 hodin při teplotě 480–490  $^{\circ}\text{C}$ , kdy ovšem dochází k nežádoucímu snížení tažnosti na 1-3 %.

### 5.2.2 Porozita objemových dílů

Z fotografií metalografických výbrusů byly sestaveny procesní mapy pro jednotlivé vzdálenosti šraf. Jsou zobrazeny v příloze 2, 3 a 4. V tabulce 5.5 je škálovaně zobrazena porozita pro vzdálenost šraf 70  $\mu\text{m}$ . Je možné vidět, že porozita klesá se zvyšujícím se výkonem laseru, a taky se zmenšováním rychlosti skenování.

Tab. 5.5 Porozita pro vzdálenost šraf 70  $\mu\text{m}$

Porozita (%)		Rychlost skenování (mm/s)				
		800	1000	1200	1400	1600
Výkon laseru (W)	200	1,63	0,16	0,9	3,51	1,56
	250	2,58	0,58	0,37	4,47	0,23
	300	0,17	0,06	0,06	1,01	0,9
	350	0,06	0,01	0,17	0,47	0,8
	400	0,08	0,02	0,6	0,09	0,09

V tabulce 5.6 je již vyhodnocena porozita pro vzdálenost šraf 90  $\mu\text{m}$ . Je zřejmý trend, kdy jsou vzorky s nízkou porozitou umístěny pod diagonálou procesní mapy.

Tab. 5.6 Porozita pro vzdálenost šraf 90  $\mu\text{m}$

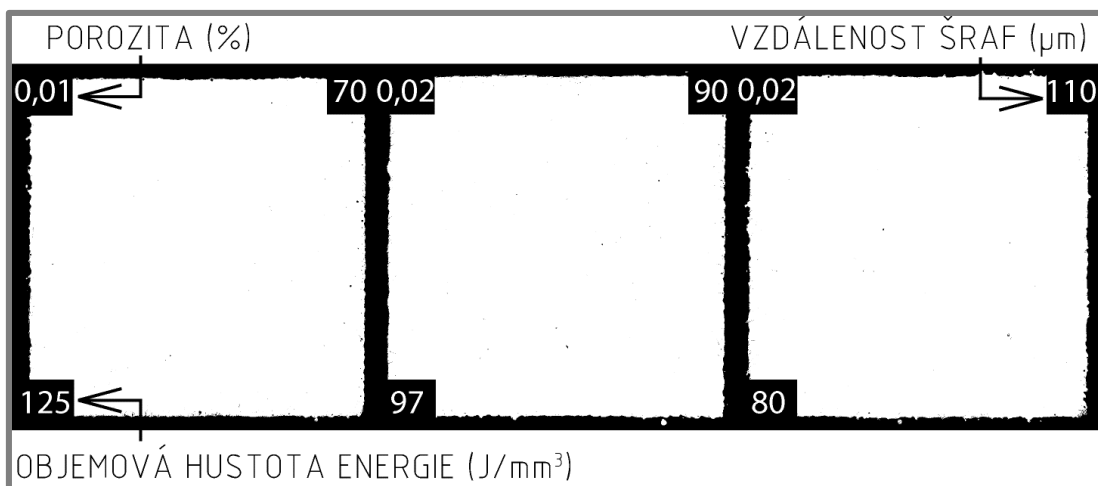
Porozita (%)		Rychlost skenování (mm/s)				
		800	1000	1200	1400	1600
Výkon laseru (W)	200	0,08	1,7	0,53	4,31	13,2
	250	0,02	0,97	5,7	0,94	1,44
	300	0,02	0,13	0,07	0,64	2,1
	350	0,03	0,02	1,6	0,37	1,93
	400	0,06	0,05	0,27	0,07	0,44

Obdobný trend lze pozorovat i pro vzdálenost šraf 110  $\mu\text{m}$ , přičemž diagonála byla v tomto případě posunuta blíže ke spodnímu okraji mapy.

Tab. 5.7 Porozita pro vzdálenost šraf 110  $\mu\text{m}$

Porozita (%)		Rychlost skenování (mm/s)				
		800	1000	1200	1400	1600
Výkon laseru (W)	200	0,09	3,3	11,3	17,9	15,4
	250	0,52	3,38	3,38	1,13	10,2
	300	0,05	0,23	1,08	6,93	1,42
	350	0,03	0,02	0,23	2,6	1,12
	400	0,1	0,1	0,12	0,62	0,23

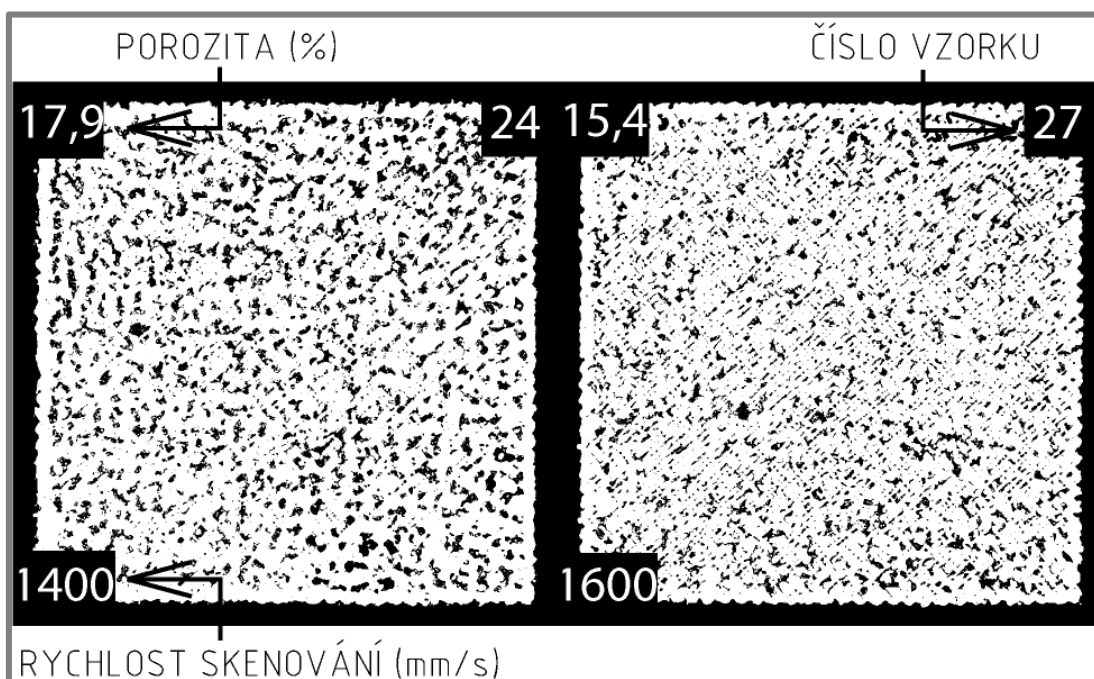
Nejnižší hodnoty porozity 0,01 % bylo dosaženo pro výkon laseru 350 W, rychlost skenování 1000 mm/s a vzdálenost šraf 70  $\mu\text{m}$ . Při těchto procesních parametrech byla nalezena nízká hodnota porozity i pro vzdálenost šraf 90 a 110  $\mu\text{m}$ , konkrétně 0,02 %. Metalografické výbrusy těchto vzorků jsou na obrázku 5.14.



Obr. 5.14 Porovnání porozity objemových vzorků

Je možné vidět, že ve všech případech se jedná téměř o homogenní materiál. Ve vzorcích se vyskytují pouze malé metalografické póry. Tyto procesní parametry jsou tedy vhodné pro tisk objemových dílů a budou použity i pro tisk tahových vzorků.

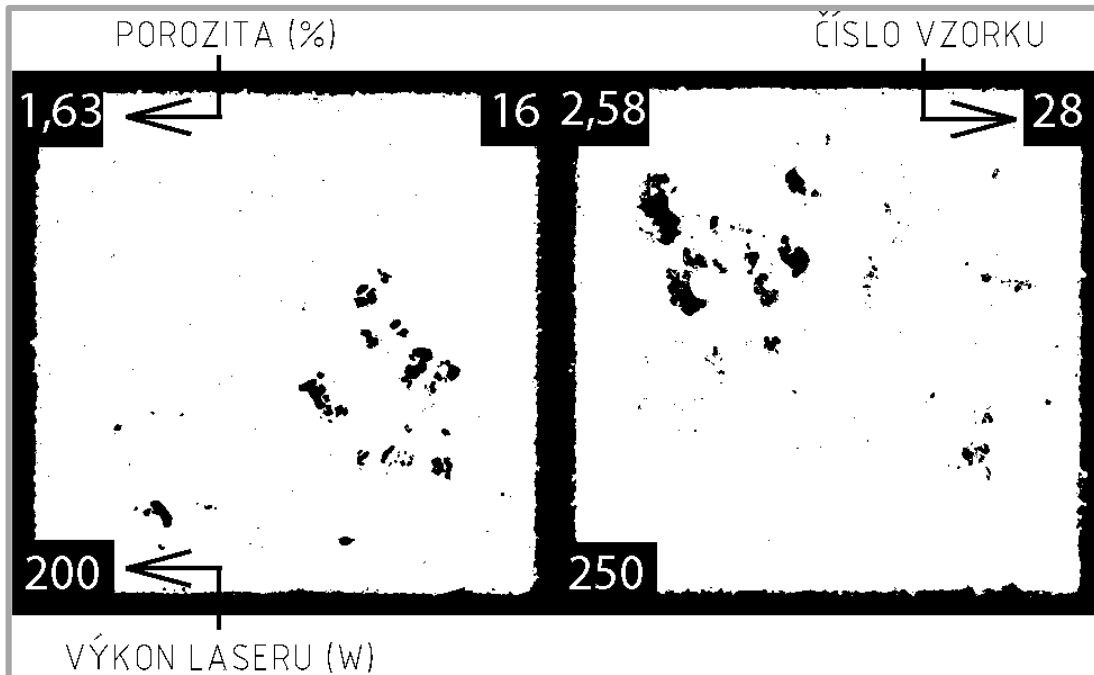
Při nízkém výkonu laseru 200 W a současném zvyšování rychlosti skenování je možné pozorovat nárůst porozity z důvodu nedostatku energie v průběhu stavby.



Obr. 5.15 Vysoká porozita z důvodu nedostatku energie stavby

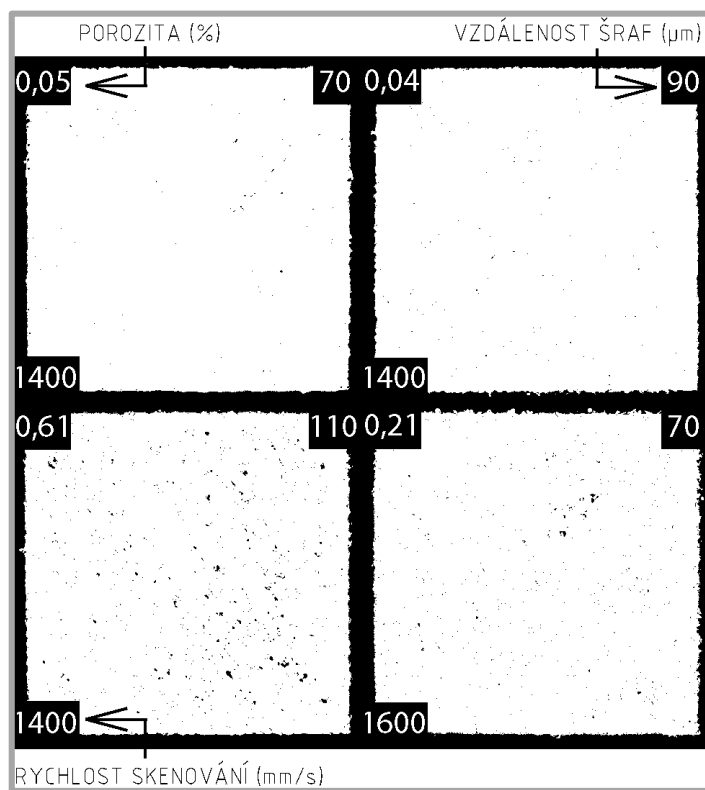
To je patrné zejména pro nejvyšší vzdálenost šraf 110 μm, kdy porozita dosahuje více než 15 % a jsou již viditelné jednotlivé návarry.

Byl pozorován i druh keyhole pórů s velikostí až 1,5 mm při nízké vzdálenosti šraf 70 μm a rychlosti skenování 800 mm/s. Výkon laseru byl v tomto případě 200 a 250 W. Jejich výbrusy jsou na obrázku 5.16.



Obr. 5.16 Keyhole póry

Zvláštní je skutečnost, že pro vyšší vzdálenosti šraf, kdy by byl jejich výskyt více pravděpodobný, se tyto póry již nevyskytovaly. Aby bylo možné zjistit, jak je uvedená metoda měření porozity přesná, byla v následující fázi vytisknuta sada 4 vzorků s perspektivními procesními parametry při maximálním výkonu laseru 400 W. Jejich metalografické výbrusy jsou na obrázku 5.17.



Obr. 5.17 Metalografické výbrusy objemových vzorků

Nejnižší porozity 0,04 % bylo dosaženo při rychlosti skenování 1400 mm/s a vzdálenosti šraf 90  $\mu\text{m}$ . Porozita vzorku v první sadě byla ovšem 0,17 %, což bylo způsobeno výskytem dvou pórů o velikosti až 800  $\mu\text{m}$ .

U dalších vzorků dosahoval rozdíl změřené porozity maximálně 50 %. Je to způsobeno tím, že pro tyto vzorky byla maximální porozita pouze 0,62 % a samotné měření velmi závisí na hloubce výbrusu.

### 5.3 Tahové vzorky

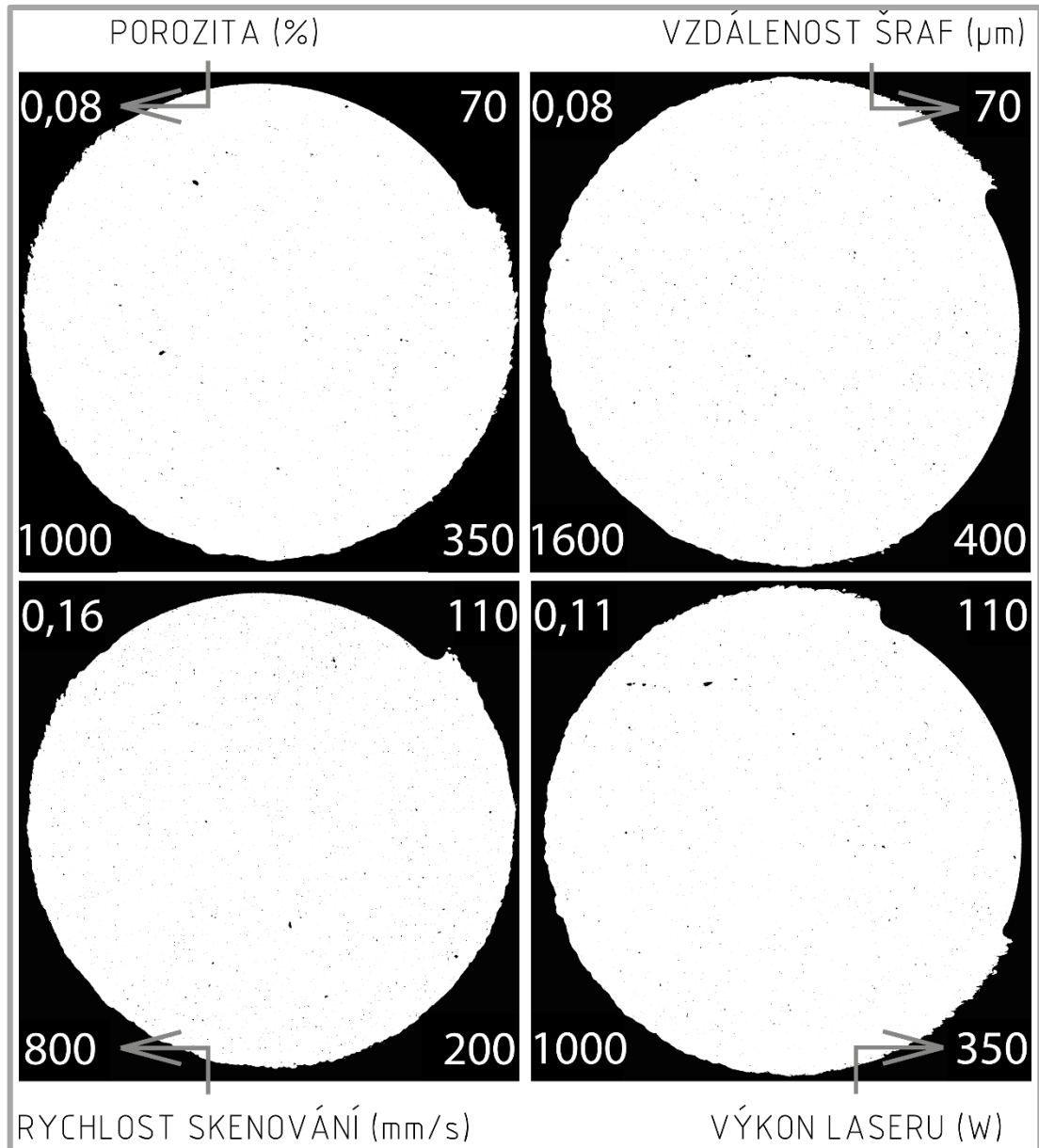
V tabulce 5.8 je možné vidět dosažené mechanické vlastnosti pro všechny tahové vzorky, přičemž tvrdost byla měřena pouze na metalografických výbrusech, které byly vytvořeny z jednoho delšího vzorku pro každou testovací sadu. Přehled všech změřených parametrů a také tahové diagramy jsou k dispozici v [příloze 5](#).

Tab. 5.8 Dosažené mechanické vlastnosti tahových vzorků

Číslo vzorku	E (GPa)	R <sub>p0.2</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A (%)	Z (%)	Tvrdost HV
1	161	815	1118	13,0	59,8	-
2	164	757	1123	11,5	53,7	-
3	164	773	1146	14,9	61,6	341
4	173	791	1125	11,8	51,6	348
5	143	786	1128	11,1	52,0	-
6	153	798	1126	10,8	55,1	-
7	151	770	1128	9,5	39,9	344
8	168	757	1049	1,8	6,3	-
9	160	776	1137	11,6	55,7	-
10	166	780	1131	14,1	64,0	-
11	164	751	1148	13,6	59,0	-
12	170	806	1131	13,7	57,8	351

Bylo zjištěno, že zvolené kombinace procesních parametrů nemají přílišný vliv na meze pevnosti a kluzu materiálu. Odlišná byla ovšem dosažená tažnost, zejména pro tahový vzorek 8, kdy byla pouze 1,8 %, kdy mohlo dojít ke křehkému lomu. Dle předpokladu měly nejlepší mechanické vlastnosti vzorky s odladěnými procesními parametry.

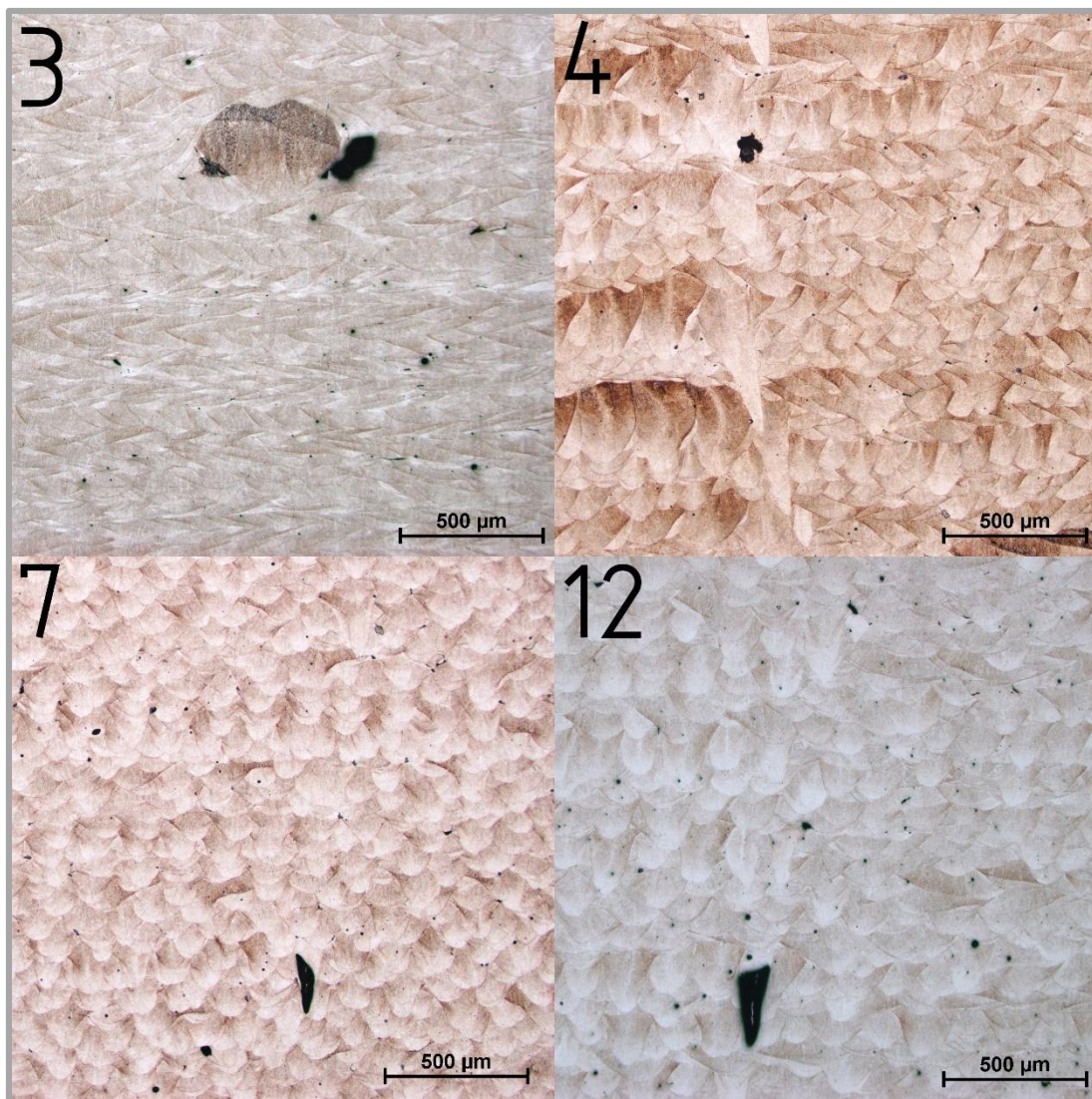
Pokud bychom dosažené výsledky porovnali s prací [3], jsou shodné s hodnotami dosahovanými pro tepelně nezpracované vzorky, přičemž mez kluzu leží na spodní hranici požadovaného intervalu. Použití tepelné zpracování tudíž nemá vliv na dosažené mechanické vlastnosti. Metalografické výbrusy vzorků 3, 4, 7 a 12 a jejich změřená porozita jsou na obrázku 5.18.



Obr. 5.18 Metalografické výbrusy tahových vzorků

Všechny vzorky měly vyšší porozitu než v případě kvádrových vzorků postavených se stejnými procesními parametry. Je to způsobeno odlišnou orientací řezu vzorku, která byla v tomto případě vertikální, a tudíž přes jednotlivé postavené vrstvy dílu.

Nejnižší porozitu 0,08 % měl vzorek se vzdáleností šraf 70  $\mu\text{m}$  a výkonem laseru 400 W. Díky vysoké rychlosti skenování 1600 mm/s byly tyto parametry vybrány pro tisk dalších objemových dílů. Bylo také zjištěno, že v případě volby vyšší vzdálenosti šraf je nepatrně větší i porozita. Vzorky ve stejném pořadí po naleptání jsou na obrázku 5.19.



Obr. 5.19 Naleptané tahové vzorky

Ve vzorku číslo 3 je možné vidět nežádoucí příměs, která způsobila porozitu na hranici s originálním materiálem. Pro vzorek 4 jsou charakteristické průvraty přes několik vrstev, které se v průběhu stavby v jednom místě opakují. Může to být způsobeno zvolenou ostrůvkovitou strategií šrafování, kdy se v tomto místě mění směr šraf a laser pálí dlouhou dobu na jedno místo. Na vzorcích 7 a 12 se vyskytují keyhole póry a také se zde vzhledem k vyšší vzdálenosti šraf 110 μm mnohem více vyskytují metalografické póry na hranicích ostrůvků.

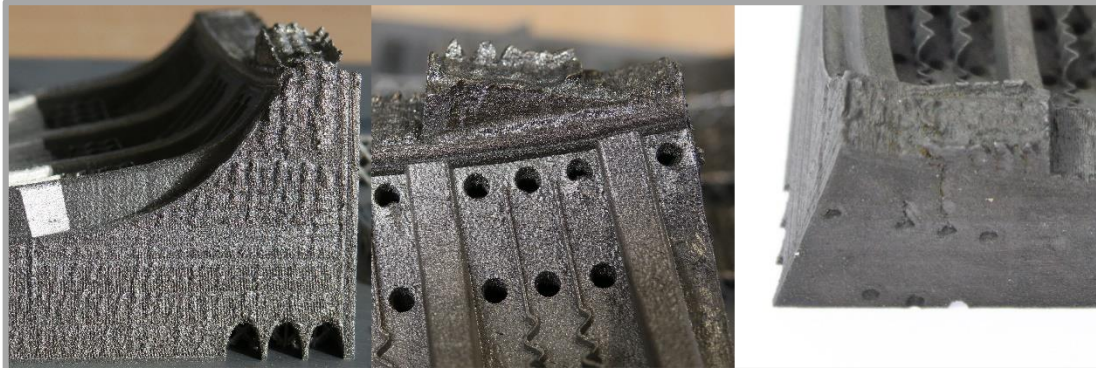
#### 5.4 Lisovací segment

5.4

Nejprve byla pro ověření realizovatelnosti tisku vytisknuta čtvrtina lisovacího segmentu. Následně bylo nutné zoptimalizovat tisk nejvyšší objemové části tohoto dílu. Na závěr byl již vytisknut celý lisovací segment, který by byl po provedeném tepelném zpracování a obrobení plně funkčním vzorkem.

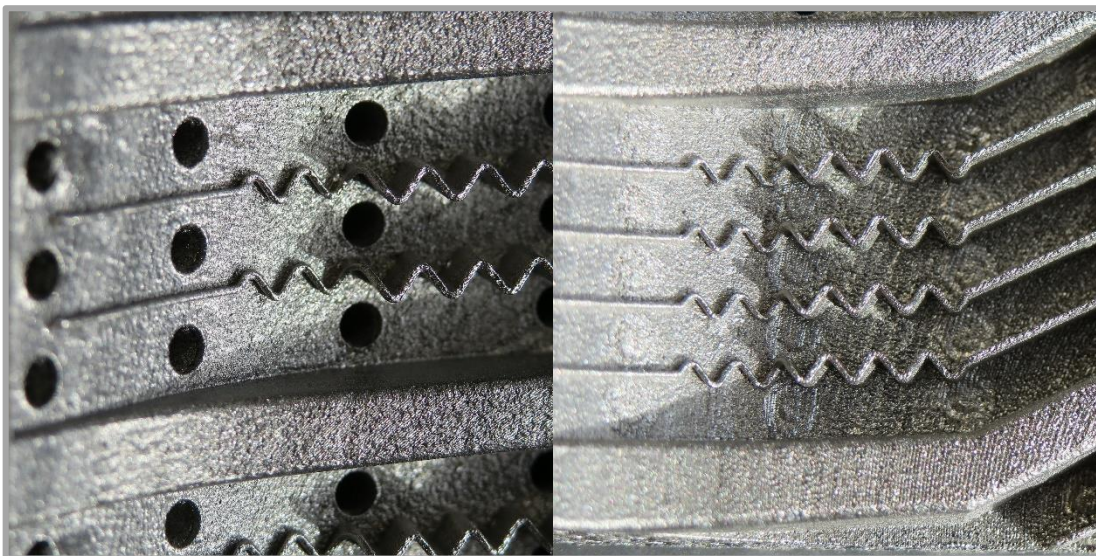
### 5.4.1 Čtvrtina segmentu

Čtvrtina lisovacího segmentu byla nejprve vyfocena, přičemž byly zjištěny defekty při tisku v objemové části. Ty je možné vidět na obrázku 5.20.



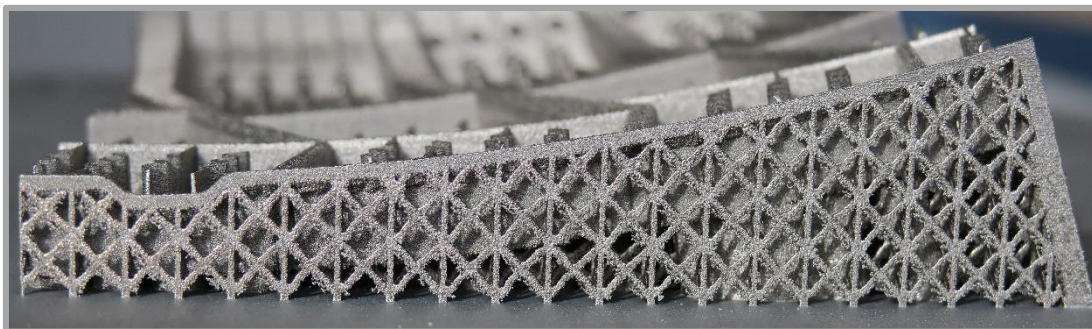
Obr. 5.20 Defekty vzniklé při stavbě čtvrtiny segmentu

Vlevo je to zejména vysoká drsnost rovinné plochy, přičemž jsou viditelné změny v jednotlivých vrstvách tisku, které korespondují s výškou jednotlivých buněk struktury. Uprostřed je to potom přepálená objemová část segmentu, kdy byla stavěna pouze malá část dílu a nebyl zajištěn dostatečný odvod tepla stavby. Vpravo to jsou již trhliny šířící se od děr pro ventily do další části stavby. Vzhledem k tomu, že nebylo v průběhu práce známo, zda bude segment tisknut s plnými či dutými válečkami, byly na části dílu vytisknuty obě varianty. Jejich porovnání je na obrázku 5.21.



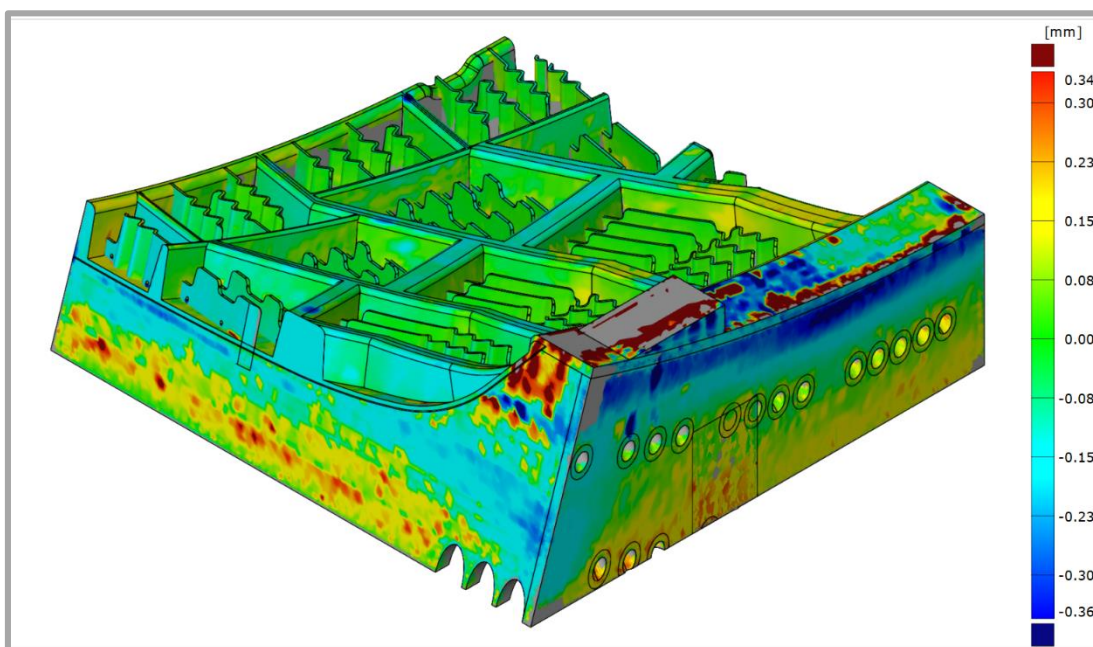
Obr. 5.21 Porovnání tisku dutých a plných válečků

Oba dva typy dílů se podařilo v pořádku vytisknout, přičemž duté válečky je možné oříznout skořepinou a zanechat do ní jen přesah 0,1 mm. Plné válečky končí na horní ploše skořepiny, a proto je jejich hranice na ní viditelná, jelikož se určitá část obsahující oba díly skenuje dvakrát. Na čtvrtině segmentu bylo možné pozorovat řez a kvalitu postavené skořepiny v průběhu celého dílu viz obrázek 5.22.



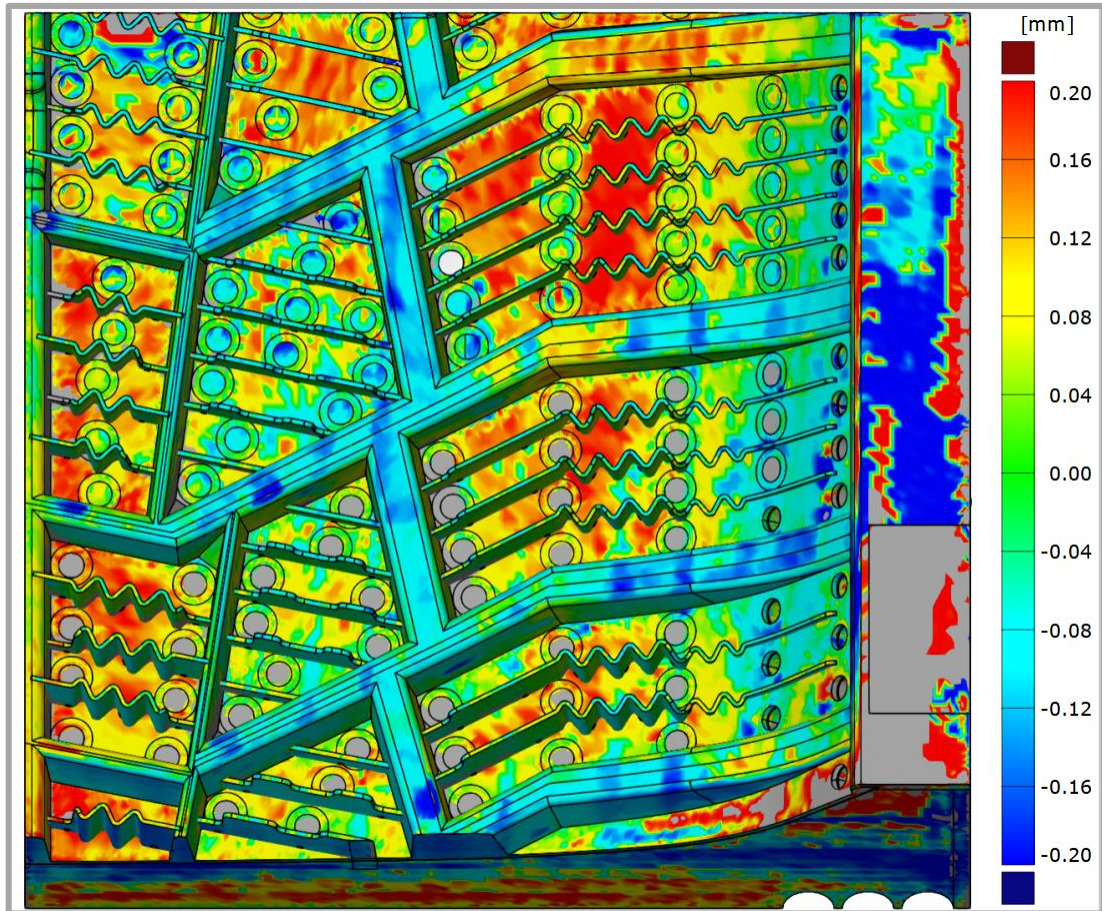
Obr. 5.22 Postavená skořepina čtvrtiny lisovacího segmentu

Následovalo optické skenování a porovnání s modelem. Vzhledem k tomu, že struktura byla generována v programu Magics je k dispozici pouze ve formátu STL. Nebylo tudíž možné její porovnání, na které je potřeba CAD model. Na obrázku 5.23 je optické srovnání objemové části dílů, pro které byla zvolena maximální odchylka 0,5 mm.



Obr. 5.23 Optické srovnání čtvrtiny segmentu odchylka 0,5 mm

Je možné vidět největší odchylky v nejvyšší části vzorku, kde došlo vzhledem k rychlosti stavby k nedostatečnému odvodu tepla a vystoupení dílu. Na horní části svislé stěny došlo naopak k propadu vzorku o 0,36 mm. Pro porovnání přesnosti vyrobené skořepiny a lamel byla maximální odchylka zmenšena na 0,2 mm viz obrázek 5.24.

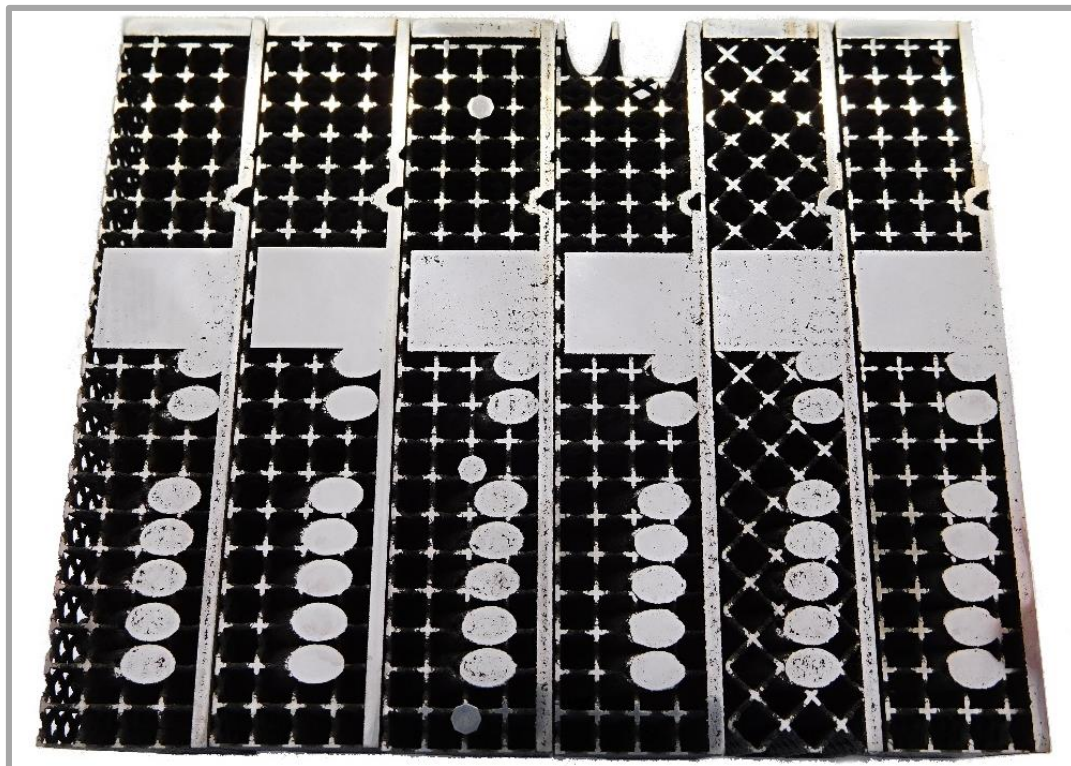


Obr. 5.24 Optické srovnání skořepiny čtvrtiny segmentu odchylka 0,2 mm

Červeně a tmavě modře jsou označeny oblasti, kde byla odchylka vyšší než akceptovatelných 0,1 mm. Na čtvrtině segmentu byla analyzována také plošná drsnost povrchu skořepiny. Konkrétně v její rovinnější oblasti na horní ploše výstupků tvořící drážky pneumatiky. Její průměrná hodnota vyhodnocená z deseti měření byla 33,1  $\mu\text{m}$ . Na jiných oblastech skořepiny nebylo možné z důvodu kolize s optickou aparaturou profilometru drsnost vyhodnotit.

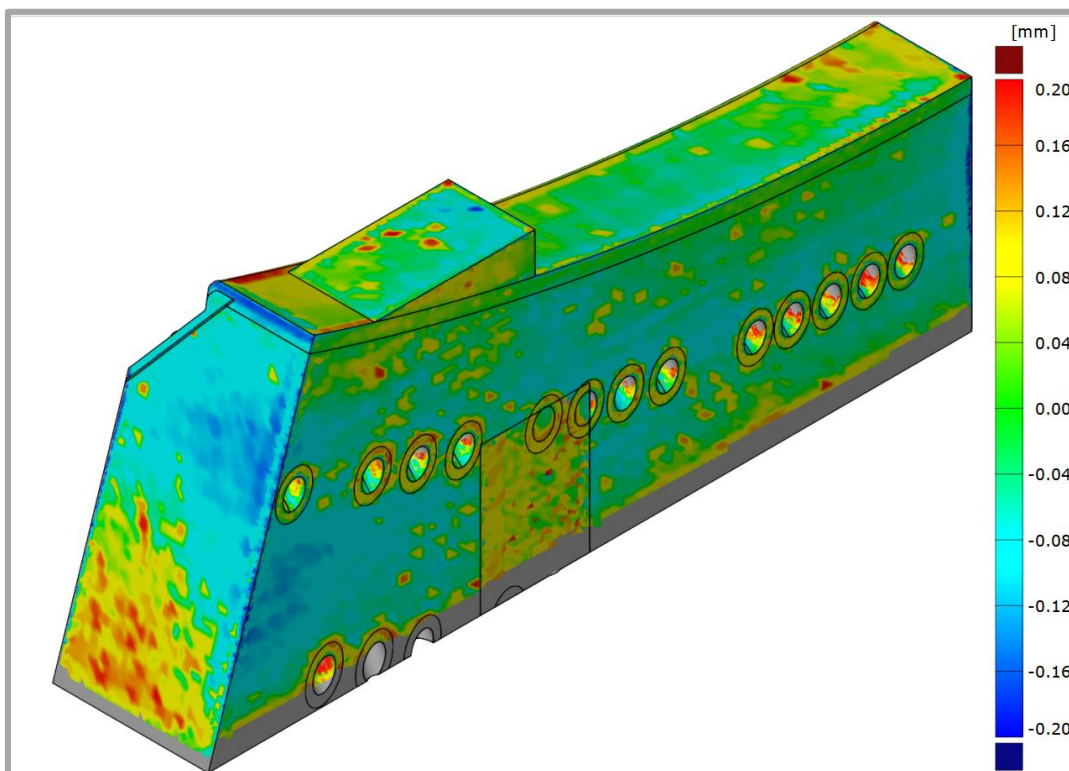
#### 5.4.2 Optimalizace objemové části

Nejvyšší část čtvrtiny segmentu o šířce 20 mm byla vytisknuta se změnami popsány v kapitole 4.8. Na obrázku 5.25 je možné vidět porozitu všech dílů po odřezání od platformy. Již na první pohled je možné vidět, že vzorky 2, 4 a 6 (zleva) mají nižší porozitu. Jedná se o vzorky, které byly umístěny na pravé straně platformy, odkud je nanášen prášek. Další vliv může mít lépe zaostřená optika na této polovině platformy.



Obr. 5.25 Porozita objemových dílů

Vzorek číslo 2, který byl tisknut s upravenými procesními parametry objemu (tahové vzorky 10-12) měl absolutně nejnižší porozitu. Optické srovnání jeho objemových částí je na obrázku 5.26.

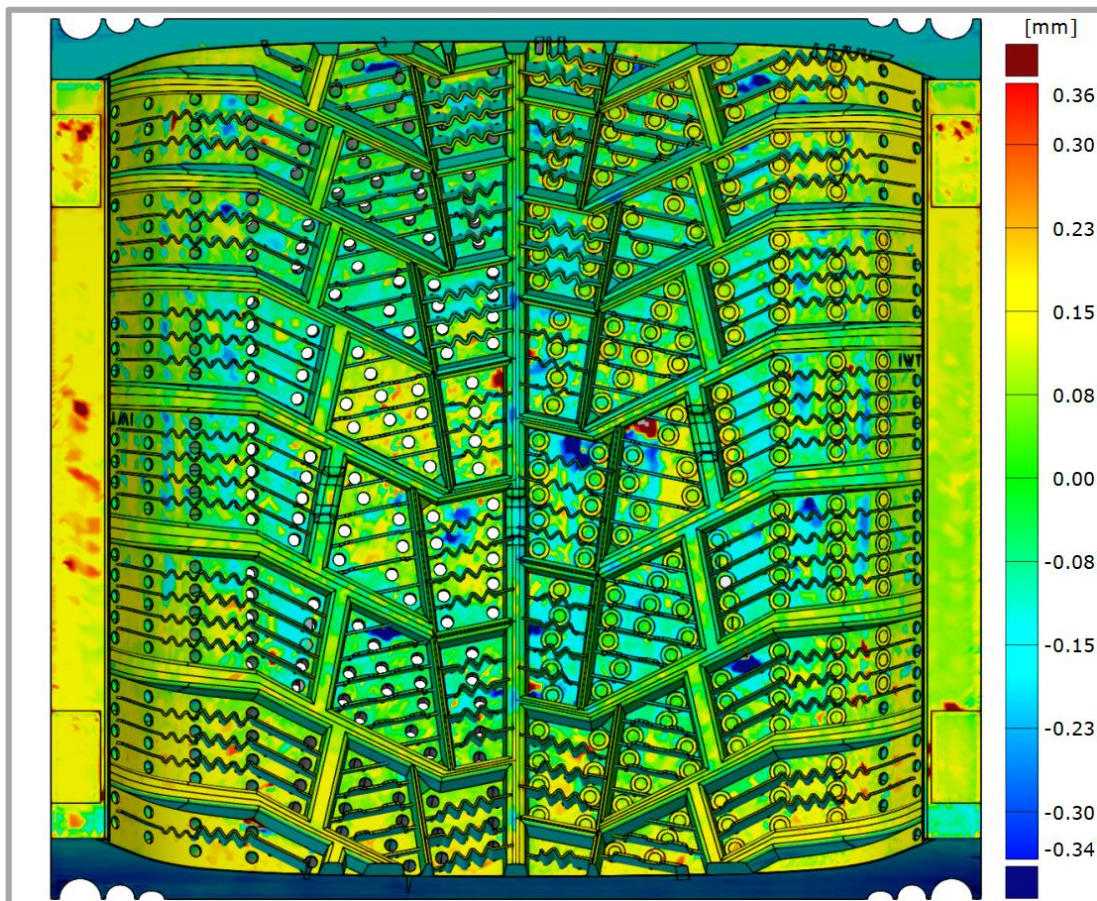


Obr. 5.26 Optické srovnání optimalizace objemové části vzorku č. 2

Tento vzorek neměl na horní straně objemových částí žádné stopy po poškození nanášecím břitem a měl taky nejmenší rozměrové odchylky. Pro tisk objemových částí celého segmentu byly proto použity jeho procesní parametry. Na tomto vzorku byla změřena i plošná drsnost skořepiny postavené pod úhlem 45°. Ta byla měřena na deseti místech v oblasti 1,6x5 mm. Její průměrná hodnota byla 13,8  $\mu\text{m}$ .

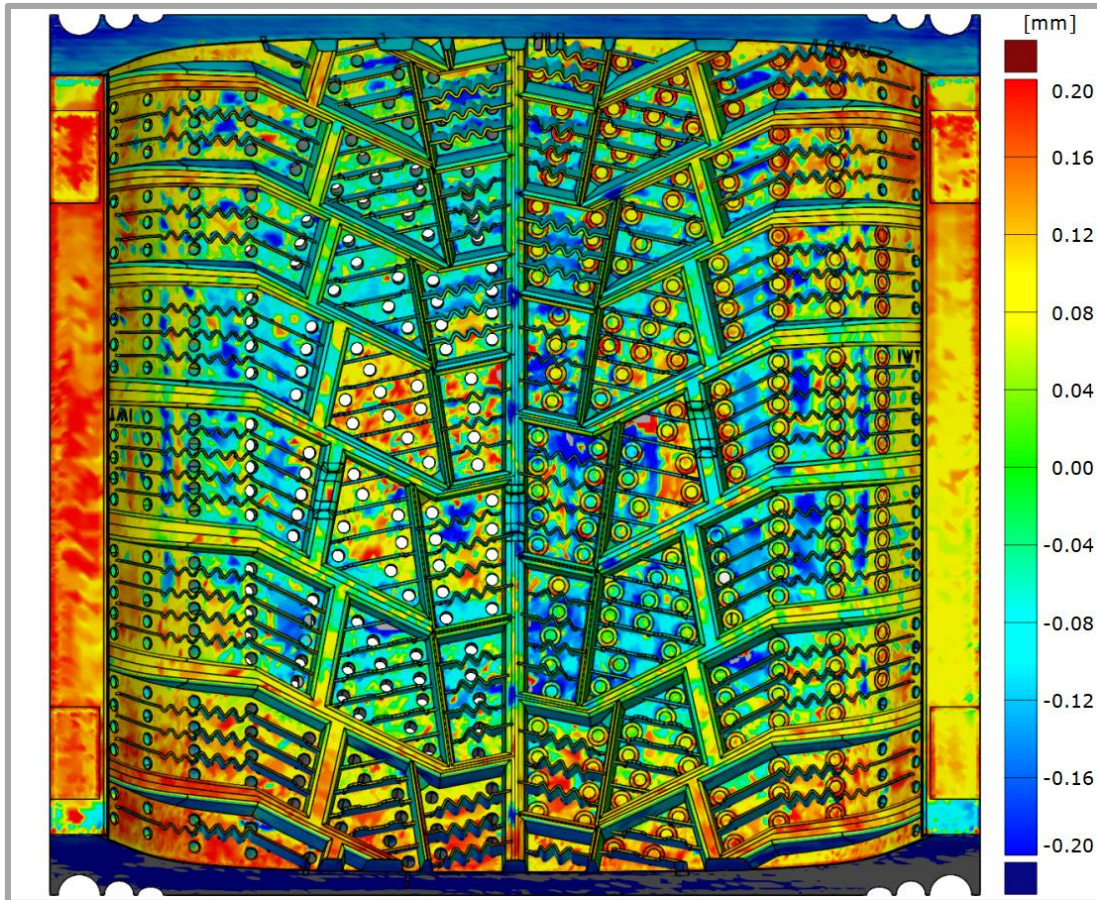
#### 5.4.3 Funkční vzorek

Lisovací segment byl po tisku naskenován a byla změřena jeho geometrická odchylka od modelu. Na obrázku 5.27 je porovnání provedeno pro velikost maximální odchylky 0,5 mm. Bylo zjištěno, že na skořepině se vyskytlo několik míst, kde došlo k jejímu poklesu či vystoupení o 0,5 mm. Tento jev nastal obvykle v oblasti nízkého sklonu skořepiny. V průběhu tisku této oblasti byly upravovány tisková data podpůrné struktury, což mohlo mít vliv i na kvalitu stavby. Výraznější odchylky byly zjištěny i na vodorovných oblastech objemových dílů, které ovšem mají přídavek na obrobení 1 mm, takže dojde obrobením k její eliminaci.



Obr. 5.27 Otické srovnání segmentu odchylka 0,5 mm

Porovnání v případě odchylky 0,2 mm je již možné vidět na obrázku 5.28. Červeně a tmavě modře jsou opět zobrazeny oblasti, kdy byla změřená odchylka větší než požadovaných 0,1 mm.



Obr. 5.28 Otické srovnání segmentu odchylka 0,2 mm

## 6 DISKUZE

První část práce byla zaměřena na nalezení vhodné struktury pro odlehčení segmentu a její optimální procesní parametry. Byla ověřena vhodnost mřížkové struktury FCCZ, což koresponduje s pracemi [5, 10]. Simulací zatěžování struktur a výběrovými kritérii se ve své diplomové práci zabýval kolega Kvaššay.

Dále byly nalezeny vhodné procesní parametry pro tisk struktury z hlediska tuhosti. Její nejvyšší hodnoty 45,7 kN/mm bylo sice dosaženo při výkonu laseru 400 W, rychlosti skenování 800 mm/s a vzdálenosti šraf 90  $\mu\text{m}$ , ale tato struktura byla již z důvodu vysoké objemové hustoty energie přepálená. Jako vhodnější parametry byly proto vybrány parametry se stejnou rychlostí, ale výkonem 350 W a vzdáleností šraf 110  $\mu\text{m}$ , kdy tuhost poklesla pouze na 41,8 kN/mm, ale rychlost stavby se zvýšila o 22 %.

V dalších fázích již byla zvolena vhodná velikost buňky struktury pomocí testu stavby skořepiny na jejím povrchu. Došlo ke kolapsu stavby vodorovné i tvarové skořepiny na struktuře s velikostí buňky 7 mm. Jako vhodná byla proto vybrána velikost buňky 5 mm. Tvrdost vodorovné skořepiny byla 35 HRC, což je obvyklá hodnota po provedeném rozpouštěcím žihání [3].

Průměrná plošná drsnost vodorovné skořepiny byla 23  $\mu\text{m}$ , přičemž se zvyšujícím úhlem sklonu klesala až na 12  $\mu\text{m}$  v případě 45°. Vzhledem k požadavku, aby byla výsledná plošná drsnost menší než 10  $\mu\text{m}$  byl testován vliv opětovného přetavování vodorovné plochy. Jednonásobným přetavováním se nepodařilo výslednou drsnost snížit. Dále byl proto testován vliv 2-4násobného přetavování na skořepině s úhlem sklonu 0° až 25°. Cílem tohoto testu mělo být také potvrzení vhodné tloušťky skořepiny. Při úhlu skořepiny 0° se sice podařilo při trojnásobném přetavování dosáhnout drsnosti povrchu 11,5  $\mu\text{m}$ , ale pro vyšší sklon skořepiny nemělo opět přetavování významný vliv. Navíc došlo ke kolapsu stavby skořepiny o tloušťce 0,5 i 0,7 mm, což si protiřečí s předchozím testem. Proto bylo rozhodnuto k použití skořepiny o tloušťce 0,7 mm. Při tisku s touto tloušťkou vrstvy se současně v této fázi podařilo vytisknout celou čtvrtinu segmentu.

Optimalizací procesních parametrů objemové části bylo zjištěno, že porozita klesá s využitím vyššího výkonu laseru a nižších rychlostí skenování. Bylo zjištěno, že při výkonu laseru 350 W a rychlosti 1000 mm/s je porozita téměř nezávislá na vzdálenosti šraf a dosahuje nejnižších hodnot 0,01-0,02 %. Této porozity bylo dosaženo i v prostudované literatuře [17].

Tyto procesní parametry byly použity i pro tisk tahových vzorků. K těmto parametrům byly navíc ještě vybrány dvojice parametry pro testování závislosti na snížení výkonu laseru na 200 W a zvýšení rychlosti skenování na 1600 mm/s. Výsledné mechanické vlastnosti téměř nezávisí na porozitě vzorků. Jedinou výjimkou byl vzorek s nejvyšší porozitou postavený při nízkém výkonu laseru, který měl tažnost pouze 1,8 %, kdy mohl nastat křehký lom. Dosažené mechanické vlastnosti opět korespondují s prací [3], pouze průměrná mez kluzu byla 780 MPa, přičemž by měla být pro tepelně nezpracované vzorky alespoň 900 MPa. Je možné, že tento pokles je způsoben právě použitým tepelným zpracováním. Pro tisk objemových částí lisovacího segmentu byly použity procesní parametry s vyšší rychlostí skenování 1600 mm/s, vzdáleností šraf 70  $\mu\text{m}$  a výkonem 400 W, kdy bylo dosaženo u tahového vzorku nejnižší porozity 0,08 %.

Čtvrtinu segmentu se podařilo úspěšně vytisknout v oblasti skořepiny a lamel, kdy maximální odchylka od modelu dosahovala 0,2 mm. Byla ovšem nutná

optimalizace tisku nejvyšší objemové části, která obsahovala defekty. Ty byly způsobené pravděpodobně nedostatečným odvodem tepla, jelikož se stavěla jen čtvrtina segmentu obsahující jen jednu tuto část. Na čtvrtině segmentu byla měřena i drsnost skořepiny ve středové části, která byla průměrně 33,1  $\mu\text{m}$ .

Při optimalizaci se těchto částí stavělo šest a tento problém byl významně eliminován. Zároveň bylo zjištěno, že z hlediska porozity i kvality stavby dílů je lepší pro stavbu objemových dílů použití výkonu laseru 350 W, rychlosti skenování 1000 mm/s a vzdálenosti šraf 110  $\mu\text{m}$ . Rychlost stavby je stejná jako v případě použití původních parametrů. Na dílu s těmito procesními parametry byla měřena i drsnost skořepiny segmentu v jeho ramenní části, která byla průměrně 13,8  $\mu\text{m}$ .

Lisovací segment byl tedy tisknut s procesními parametry v tabulce 6.1.

Tab. 6.1 Procesní parametry dílů segmentu

Typ dílu	Výkon laseru (W)	Rychlost skenování (mm/s)	Vzdálenost šraf ( $\mu\text{m}$ )	Objemová hustota energie ( $\text{J}/\text{mm}^3$ )
OBJEM	350	1000	110	80
STRUKTURA	350	800	110	99

Bylo zjištěno, že rozměrová odchylka skořepiny dosahuje na několika místech až 0,5 mm. Nicméně pro většinu neobrobených ploch byla odchylka menší než 0,2 mm tak jako v případě čtvrtiny segmentu. Drsnost povrchu celého segmentu nebylo možné změřit z důvodu velké hmotnosti dílu.

## 7 ZÁVĚR

V této práci byly optimalizovány procesní parametry tisku segmentu pro výrobu lisovací formy pneumatik. Segment se skládá z kombinace struktur, skořepin, tenkých lamel a objemových částí. Samotná optimalizace byla zaměřena na strukturní a objemové části. Pro skořepinovou část byly použity odladěné procesní parametry pro tisk lamel, jelikož se jedná o stejný typ geometrie.

Proměnnými procesními parametry byly výkon laseru, rychlost skenování a vzdálenost šraf. Jejich parametry byly zvoleny s ohledem na prostudovanou literaturu. Výkon laseru 200-400 W, rychlost skenování 800-1600 mm/s a tři vzdálenosti šraf: 70, 90 a 110  $\mu\text{m}$ .

Na základě rešeršní části práce bylo zjištěno, že technologickým limitem SLM výroby je velikost dílu 0,4 mm, jelikož poté vznikají rozměrové odchylky způsobené přibližováním velikosti dílu k šířce paprsku laseru. Jako limitní se ukázala také velikost buňky struktury 5 mm, jelikož v případě 7 mm buňky došlo ke kolapsu stavby skořepiny.

Byly navrženy kvádrová testovací tělesa pro optimalizaci objemových částí redukcí porozity, která byla změřena pomocí programu ImageJ. Pro výběr vhodné struktury a nalezení procesních parametrů tisku bylo vytvořeno 75 testovacích těles na tlakovou zkoušku. Hodnotícím kritériem bylo dosažení nejvyšší tuhosti vzorku a také kvalita postaveného dílu. Nakonec byly navrženy tři typy skořepinových vzorků na strukturách, kdy byla rozhodující dosažená plošná drsnost povrchu.

Byly nalezeny optimalizované procesní parametry pro tisk strukturních a objemových částí segmentu. Je to v obou případech výkon laseru 350 W a vzdálenost šraf 110  $\mu\text{m}$ . Rychlost skenování je v případě struktury 800 mm/s, pro objemové části 1000 mm/s.

Problematickou při stavbě segmentu se ukázala vysoká plošná drsnost povrchu zejména ve středové části, která byla průměrně 33,1  $\mu\text{m}$ . V části ramenní byla drsnost 13,8  $\mu\text{m}$ . Nicméně ani zde nebyla menší než požadovaných 10  $\mu\text{m}$ . Dále jsou to vyšší rozměrové odchylky 0,2 mm u skořepiny. Oba dva tyto jevy by bylo možné eliminovat zmenšením tloušťky vrstvy 40  $\mu\text{m}$  na hodnotu 20-30  $\mu\text{m}$ , čímž by se ovšem úměrně navýšil čas stavby. Jedná se o první segment postavený na zařízení M2 Cusing.

Také by bylo vhodné segment tepelně zpracovat při teplotě 830 °C po dobu 30 minut a poté obrobít, aby vznikl plně funkční vzorek.

Pro porovnání kvality tisku slouží segment postavený na zařízení EOS M290. Ten byl stavěn se standartními parametry pro tloušťku vrstvy 40  $\mu\text{m}$ . Nejmenší drsnost byla 15,8  $\mu\text{m}$  v ramenní oblasti. Maximální byla 26,7 v oblasti ramenní. Absolutní odchylka po tisku v dezénové části byla přibližně 0,1 mm. Výsledná geometrie je tudíž srovnatelná.

**8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] TOMEŠ, Jan. Analýza přesnosti výroby lamel formy pneumatiky vyráběných SLM technologií [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/59634>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí práce Daniel Koutný.
- [2] *SLMinAction*. In: Selective Laser Melting in Action: Additive Manufacturing Magazine [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://d2n4wb9orp1vta.cloudfront.net/cms/SLMinAction.jpg;width=560>
- [3] *EOS MS1 Maraging Steel for DMLS 3D Printing*. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e9f7cb19eb81450d8f67966151bd1802>
- [4] CAMPANELLI, S.L., N CONTUZZI a A.D. LUDOVICO. Manufacturing of 18 Ni Marage 300 Steel Samples by Selective Laser Melting. *Advanced Materials Research* [online]. Trans Tech Publications, 2010, **83-86**, 850-857 [cit. 2018-05-13]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.850. ISSN 1022-6680. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/272634530\\_Manufacturing\\_of\\_18\\_Ni\\_Marage\\_300\\_Steel\\_Samples\\_by\\_Selective\\_Laser\\_Melting](https://www.researchgate.net/publication/272634530_Manufacturing_of_18_Ni_Marage_300_Steel_Samples_by_Selective_Laser_Melting)
- [5] CAMPANELLI, S.L., N. CONTUZZI, A. ANGELASTRO a A. DOMENICO. *Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process* [online]. 2010-11-02 [cit. 2018-05-13]. DOI: 10.5772/10432. ISBN 10.5772/10432. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/new-trends-in-technologies--devices--computer--communication-and-industrial-systems/capabilities-and-performances-of-the-selective-laser-melting-process>
- [6] YASA, E., K. KEMPEN a J. KRUTH. Microstructure and mechanical properties of Maraging Steel 300 after selective laser melting. *Proceedings of the 21st International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2010, s. 383–396. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/289265839\\_Microstructure\\_and\\_mechanical\\_properties\\_of\\_maraging\\_steel\\_300\\_after\\_selective\\_laser\\_melting](https://www.researchgate.net/publication/289265839_Microstructure_and_mechanical_properties_of_maraging_steel_300_after_selective_laser_melting)
- [7] KEMPEN, K., E. YASA, L. THUIS, J.-P. KRUTH a J. VAN HUMBEECK. Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel. *Physics Procedia* [online]. Elsevier B.V., 2011, **12**, 255-263 [cit. 2018-05-13]. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.033. ISSN 1875-3892. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187538921100112X>

- [8] THIJS, L., J. VAN HUMBEECK, K KEMPEN, E YASA a J.-P. KRUTH. Investigation on the inclusions in maraging steel produced by Selective Laser Melting. *5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*. 2011, č. 2007, s. 297–304. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/300064819\\_Investigation\\_on\\_the\\_inclusions\\_in\\_maraging\\_steel\\_produced\\_by\\_Selective\\_Laser\\_Melting](https://www.researchgate.net/publication/300064819_Investigation_on_the_inclusions_in_maraging_steel_produced_by_Selective_Laser_Melting)
- [9] TAN, C., K. ZHU, X. TONG, Y. HUANG, J. LI, W. MA, F. LI, a T. KUANG. 2016. Microstructure and Mechanical Properties of 18Ni-300 Maraging Steel Fabricated by Selective Laser Melting. *Proceedings of the 2016 6th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering (ICADME 2016)*. Dostupné z: [https://www.atlantis-press.com/php/download\\_paper.php?id=25862785](https://www.atlantis-press.com/php/download_paper.php?id=25862785)
- [10] CONTUZZI, N., S. CAMPANELLI, C. CASAVOLA a L. LAMBERTI. Manufacturing and Characterization of 18Ni Marage 300 Lattice Components by Selective Laser Melting. *Materials*. 2013, **6**(8), 3451–3468. DOI: 10.3390/ma6083451. ISBN 10.3390/ma6083451. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/6/8/3451/>
- [11] CASALINO, G., S.L. CAMPANELLI, N. CONTUZZI a A.D. LUDOVICO. Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel. *Optics and Laser Technology* [online]. Elsevier, 2015, **65**, 151–158 [cit. 2018-05-13]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2014.07.021. ISSN 0030-3992. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399214002011>
- [12] BECKER, T. a D. DIMITROV. The achievable mechanical properties of SLM produced Maraging Steel 300 components. *Rapid Prototyping Journal*[online]. Emerald Group Publishing Limited, 2016, **22**(3), 487–494 [cit. 2018-05-13]. DOI: 10.1108/RPJ-08-2014-0096. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://www-emeraldinsight-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/doi/abs/10.1108/RPJ-08-2014-0096>
- [13] CASATI, R., J.N. LEMKE, A. TUISSI a M. VEDANI. Aging Behaviour and Mechanical Performance of 18-Ni 300 Steel Processed by Selective Laser Melting. *Metals* [online]. Basel: MDPI, 2016, **6**(9), 218 [cit. 2018-05-13]. DOI: 10.3390/met6090218. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2075-4701/6/9/218>
- [14] KOUTNY, D., L. PANTELEJEV, J. TOMES a D. PALOUSEK. Comparison of Selective Laser Melting of 18Ni Maraging Steel By Pxl and M2 Cusing. *MM Science Journal*. 2016, roč. 2016, č. 6, s. 1590–1596. ISSN 18031269. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/312061230\\_Comparison\\_of\\_selective\\_laser\\_melting\\_of\\_18NI\\_maraging\\_steel\\_by\\_PXL\\_and\\_M2\\_cusing](https://www.researchgate.net/publication/312061230_Comparison_of_selective_laser_melting_of_18NI_maraging_steel_by_PXL_and_M2_cusing)

- [15] MUTUA, J., S. NAKATA, T. ONDA a Z-CH. CHEN. Optimization of selective laser melting parameters and influence of post heat treatment on microstructure and mechanical properties of maraging steel. *Materials & Design* [online]. Elsevier, 2018, 139, 486-497 [cit. 2017-12-12]. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.042. ISSN 0264-1275. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0264127517310730>
- [16] DEMIR, A. a B. PREVITALI. Investigation of remelting and preheating in SLM of 18Ni300 maraging steel as corrective and preventive measures for porosity reduction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer London, 2017, 93(5), 2697-2709 [cit. 2018-05-10]. DOI: 10.1007/s00170-017-0697-z. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s00170-017-0697-z>
- [17] SŮKAL, Jan. Analýza vlivu recyklace práškové oceli na porozitu dílů vyráběných technologií Selective Laser Melting [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/66624>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí práce David Paloušek.
- [18] *Datasheet\_CL\_50WS*. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://www.concept-laser.de/fileadmin//user\\_upload/Datasheet\\_CL\\_50WS.pdf](https://www.concept-laser.de/fileadmin//user_upload/Datasheet_CL_50WS.pdf)
- [19] *M2 cusing Metal laser melting system*. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://www.concept-laser.de/fileadmin/Blaue\\_Broschueren/1708\\_M2\\_cusing\\_EN\\_update\\_1\\_\\_Eigendruck\\_X3.pdf](https://www.concept-laser.de/fileadmin/Blaue_Broschueren/1708_M2_cusing_EN_update_1__Eigendruck_X3.pdf)

**9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN**

<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>
3D	Třidimenzionální
BCC	Body Centered Cubic
CT	Computed tomography
DIN	Deutsche Industrie Norm
FCC	Face Centered Cubic
HRC	Hardness Rockwell C
HV	Hardness Vickerse
SEM	Scanning electron microscope
SLM	Selective Laser Melting

<b>Symbol</b>	<b>Rozměr</b>	<b>Popis</b>
A	%	tažnost
B <sub>d</sub>	μm	průměr laserového paprsku
E	GPa	modul pružnosti v tahu
E <sub>s</sub>	J/mm <sup>2</sup>	plošná hustota energie
E <sub>v</sub>	J/mm <sup>3</sup>	objemová hustota energie
H <sub>d</sub>	μm	vzdálenost šraf
L <sub>p</sub>	W	výkon laseru
L <sub>s</sub>	mm/s	rychlost skenování
L <sub>t</sub>	μm	tloušťka vrstvy
R <sub>m</sub>	MPa	mez pevnosti
R <sub>p0.2</sub>	MPa	smluvní mez kluzu
S <sub>a</sub>	μm	plošná drsnost povrchu
Z	%	kontrakce

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<b>Obr. 1.1</b> Strukturami odlehčený díl vyrobený pomocí SLM technologie [2].....	12
<b>Obr. 2.1</b> Závislost tvrdosti na plošné hustotě energie [4] .....	15
<b>Obr. 2.2</b> Závislost hustoty vyrobených dílů na hustotě energie [5].....	15
<b>Obr. 2.3</b> Test vyrobitelnosti rozměrových dílů [5] .....	16
<b>Obr. 2.4</b> Struktura FCCZ [5] .....	16
<b>Obr. 2.5</b> Závislost drsnosti povrchu na rychlosti skenování [6].....	17
<b>Obr. 2.6</b> Závislost tvrdosti na době tepelného zpracování [6].....	18
<b>Obr. 2.7</b> Tahová zkouška [6] .....	18
<b>Obr. 2.8</b> Závislost relativní hustoty na rychlosti skenování a tloušťce vrstvy [7].....	19
<b>Obr. 2.9</b> Závislost tvrdosti na teplotě a době stárnutí [7] .....	19
<b>Obr. 2.10</b> Mikrofotografie horní a boční stěny vzorku [8] .....	20
<b>Obr. 2.11</b> Oxidy na horní straně vzorků [8] .....	21
<b>Obr. 2.12</b> Morfologie a drsnost povrchu horní strany vzorku [9] .....	21
<b>Obr. 2.13</b> SEM snímky horizontálního a vertikálního řezu vzorku [9].....	22
<b>Obr. 2.14</b> Mřížkové struktury [10] .....	23
<b>Obr. 2.15</b> Tlakové diagramy mřížkových struktur vzorků 1 až 6 [10].....	23
<b>Obr. 2.16</b> Metalografický výbrus vzorku [11].....	24
<b>Obr. 2.17</b> Tahové zkoušky vzorků s rozdílnou relativní hustotou [11].....	25
<b>Obr. 2.18</b> Závislost relativní hustoty na rychlosti skenování a vzdálenosti šraf [12].....	26
<b>Obr. 2.19</b> Micro CT obraz vzorku [12].....	26
<b>Obr. 2.20</b> Mikrofotografie tepelně zpracovaného vzorku [10].....	28
<b>Obr. 2.21</b> Řez roztrženého tahového vzorku [13].....	28
<b>Obr. 2.22</b> Porovnání metalografických výbrusů [14] .....	29
<b>Obr. 2.23</b> Závislost relativní hustoty na procesních parametrech [15].....	30
<b>Obr. 2.24</b> Mapa procesních parametrů [15].....	31
<b>Obr. 2.25</b> Přehled korekčních strategií [16].....	32
<b>Obr. 2.26</b> SEM snímky porovnání korekčních strategií [16] .....	32
<b>Obr. 2.27</b> Rozložení porozity určené pomocí $\mu$ CT analýzy [17] .....	34
<b>Obr. 4.1</b> Schéma postupu řešení .....	37
<b>Obr. 4.2</b> 3D tiskárna M2 Cusing [19] .....	38
<b>Obr. 4.3</b> Vzorky pro porovnání vhodnosti struktury .....	40
<b>Obr. 4.4</b> Vzorky pro optimalizaci procesních parametrů struktur .....	41
<b>Obr. 4.5</b> Porovnání tisku vodorovné skořepiny na struktuře .....	42
<b>Obr. 4.6</b> Vzorky pro testování tisku tvarové skořepiny na struktuře.....	42
<b>Obr. 4.7</b> Vzorky pro testování zlepšení drsnosti přetavováním .....	43
<b>Obr. 4.8</b> Vytisknuté objemové vzorky.....	44
<b>Obr. 4.9</b> Čtvrtina segmentu.....	45
<b>Obr. 4.10</b> Vzorky pro test kvality objemu .....	46
<b>Obr. 4.11</b> Lisovací segment.....	47
<b>Obr. 5.1</b> Porovnání specifické tlakové pevnosti struktur.....	48
<b>Obr. 5.2</b> Kolaps stavby vzorku z důvodu vysoké hustoty energie.....	49
<b>Obr. 5.3</b> Porovnání tuhosti struktur .....	49
<b>Obr. 5.4</b> Závislost tuhosti struktury na rychlosti skenování pro jednotlivé výkony..	50
<b>Obr. 5.5</b> Závislost tuhosti na objemové hustotě energie.....	50
<b>Obr. 5.6</b> Mikrofotografie skořepiny postavené na 3 mm buňce .....	51
<b>Obr. 5.7</b> Optické srovnání skořepiny postavené na 3 mm buňce .....	52

---

<b>Obr. 5.8</b> Optické srovnání skořepiny postavené na 5 mm buňce.....	52
<b>Obr. 5.9</b> Kolaps skořepiny v případě velikosti buňky 7 mm .....	54
<b>Obr. 5.10</b> Místa měření drsnosti s jednotlivými sklony .....	54
<b>Obr. 5.11</b> Závislost drsnosti na úhlu sklonu skořepiny, velikost buňky 5 mm.....	55
<b>Obr. 5.12</b> Optické srovnání 0,7 mm skořepiny na struktuře s 5 mm buňkou .....	56
<b>Obr. 5.13</b> Závislost tvrdosti na rychlosti skenování pro vzdálenost šraf 110 $\mu\text{m}$ .....	57
<b>Obr. 5.14</b> Porovnání porozity objemových vzorků.....	59
<b>Obr. 5.15</b> Vysoká porozita z důvodu nedostatku energie stavby.....	59
<b>Obr. 5.16</b> Keyhole póry .....	60
<b>Obr. 5.17</b> Metalografické výbrusy objemových vzorků .....	60
<b>Obr. 5.18</b> Metalografické výbrusy tahových vzorků .....	62
<b>Obr. 5.19</b> Naleptané tahové vzorky .....	63
<b>Obr. 5.20</b> Defekty vzniklé při stavbě čtvrtiny segmentu .....	64
<b>Obr. 5.21</b> Porovnání tisku dutých a plných válečků .....	64
<b>Obr. 5.22</b> Postavená skořepina čtvrtiny lisovacího segmentu .....	65
<b>Obr. 5.23</b> Optické srovnání čtvrtiny segmentu odchylka 0,5 mm .....	65
<b>Obr. 5.24</b> Optické srovnání skořepiny čtvrtiny segmentu odchylka 0,2 mm .....	66
<b>Obr. 5.25</b> Porozita objemových dílů .....	67
<b>Obr. 5.26</b> Optické srovnání optimalizace objemové části vzorku č. 2 .....	67
<b>Obr. 5.27</b> Optické srovnání segmentu odchylka 0,5 mm.....	68
<b>Obr. 5.28</b> Optické srovnání segmentu odchylka 0,2 mm.....	69

**11 SEZNAM TABULEK**

<b>Tab. 2.1</b> Chemické složení oceli 1.2709 [3] .....	14
<b>Tab. 2.2</b> Mechanické vlastnosti oceli 1.2709 [3] .....	14
<b>Tab. 2.3</b> Procesní parametry [4] .....	14
<b>Tab. 2.4</b> Procesní parametry [6] .....	17
<b>Tab. 2.5</b> Procesní parametry [9] .....	21
<b>Tab. 2.6</b> Procesní parametry [10] .....	22
<b>Tab. 2.7</b> Procesní parametry [11] .....	24
<b>Tab. 2.8</b> Procesní parametry [12] .....	25
<b>Tab. 2.9</b> Výsledky tahových zkoušek po tepelném zpracování [12] .....	27
<b>Tab. 2.10</b> Procesní parametry [13] .....	27
<b>Tab. 2.11</b> Mechanické vlastnosti dosažené tepelným zpracování [13] .....	28
<b>Tab. 2.12</b> Porovnání procesních parametrů tiskáren [14] .....	29
<b>Tab. 2.13</b> Porovnání mechanických vlastností tahových vzorků [14] .....	29
<b>Tab. 2.14</b> Procesní parametry [15] .....	30
<b>Tab. 2.15</b> Procesní parametry [16] .....	31
<b>Tab. 2.16</b> Korekční strategie [16] .....	32
<b>Tab. 4.1</b> Chemické složení materiálu CL 50WS [18] .....	37
<b>Tab. 4.2</b> Mechanické vlastnosti materiálu CL 50WS [18] .....	37
<b>Tab. 4.3</b> Technické parametry zařízení M2 cusing [19] .....	38
<b>Tab. 4.4</b> Zvolené procesní parametry stavby .....	39
<b>Tab. 4.5</b> Zvolené procesní parametry tahových vzorků .....	44
<b>Tab. 4.6</b> Přehled změn optimalizace nejvyšší části dílu .....	45
<b>Tab. 5.1</b> Změřené parametry vodorovných skořepin .....	53
<b>Tab. 5.2</b> Změna drsnosti přetavováním .....	53
<b>Tab. 5.3</b> Drsnost tvarových skořepin .....	55
<b>Tab. 5.4</b> Porovnání drsnosti úhlové skořepiny .....	56
<b>Tab. 5.5</b> Porozita pro vzdálenost šraf 70 $\mu\text{m}$ .....	58
<b>Tab. 5.6</b> Porozita pro vzdálenost šraf 90 $\mu\text{m}$ .....	58
<b>Tab. 5.7</b> Porozita pro vzdálenost šraf 110 $\mu\text{m}$ .....	58
<b>Tab. 5.8</b> Dosažené mechanické vlastnosti tahových vzorků .....	61
<b>Tab. 6.1</b> Procesní parametry dílů segmentu .....	71

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

---

**Příloha 1** Seznam použitých procesních parametrů

**Příloha 2** Výsledky tlakových zkoušek struktur vzdálenost šraf 70  $\mu\text{m}$

**Příloha 3** Výsledky tlakových zkoušek struktur vzdálenost šraf 90  $\mu\text{m}$

**Příloha 4** Výsledky tlakových zkoušek struktur vzdálenost šraf 110  $\mu\text{m}$

**Příloha 5** Závislost tuhosti struktur na rychlosti skenování pro jednotlivé výkony

**Příloha 6** Závislost tuhosti struktur na objemové hustotě energie

**Příloha 7** Porovnání postavených rovinných skořepin na struktuře

**Příloha 8** Výsledky měření tvrdosti

**Příloha 9** Procesní mapa analýzy porozity vzdálenost šraf 70  $\mu\text{m}$

**Příloha 10** Procesní mapa analýzy porozity vzdálenost šraf 90  $\mu\text{m}$

**Příloha 11** Procesní mapa analýzy porozity vzdálenost šraf 110  $\mu\text{m}$

**Příloha 12** Závislost porozity na rychlosti skenování pro jednotlivé výkony

**Příloha 13** Výsledky tahových zkoušek