



# 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 SLM PROCESNÍCH PARAMETRŮ PRO TENKOSTĚNNÉ DÍLY Z NIKLOVÉ SUPERSLITINY

DEVELOPMENT OF SLM PROCESS PARAMETERS FOR THIN-WALLED NICKEL SUPERALLOY  
COMPONENTS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Richard Kafka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2021



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Bc. Richard Kafka</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

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 SLM procesních parametrů pro tenkostěnné díly z niklové superslitiny**

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

Aditivní technologie výroby kovových materiálů se v posledních 10 letech výrazně rozšiřují do řady průmyslových odvětví, avšak jejich širší aplikace je stále omezena portfoliem dostupných a ověřených materiálů. Technologie Selective Laser Melting (SLM) patří mezi nejrozšířenější, avšak i pro tuto technologii je v současné době ověřeno jen přibližně 30 materiálů. Rozšíření portfolia zpracovatelných materiálů umožní kvalifikaci SLM procesu pro další typy komponent jako jsou například tenkostěnné tepelné výměníky pro vysokoteplotní aplikace.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

**Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem je vyvinout procesní parametry technologie selektivního laserového tavení pro výrobu tenkostěnných dílů z niklové superslitiny.

Dílčí cíle diplomové práce:

- vypracovat přehled výsledků výzkumu pro SLM zpracování niklových superslitin,
- experimentálně stanovit optimální procesní parametry pro tenkostěnné díly z materiálu IN 718,
- vyvinout experimentální zařízení pro testování těsnosti tenkostěnných dílů,
- navrhnout, vyrobit a otestovat ukázkový díl obsahující alespoň 2 kanály se společnou tenkou stěnou odolávající tlaku 10 bar.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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

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

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

**Seznam doporučené literatury:**

MOUSSAOUI, K., RUBIO, W., MOUSSEIGNE, M., SULTAN, T., REZAI, F. Effects of Selective Laser Melting additive manufacturing parameters of Inconel 718 on porosity, microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*. 2018, vol. 735, pp. 182-190. ISSN 09215093.

CHARLES, A., ELKASEER, A., THIJIS, L., HAGENMEYER, V., SCHOLZ, S., Effect of process parameters on the generated surface roughness of down-facing surfaces in selective laser melting. *Applied Sciences*. 2019, vol. 9, no. 6. ISSN 20763417.

HOSSEINI, E.; POPOVICH, V. A. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718. *Additive Manufacturing*, 2019, 30: 100877. ISSN 22148604.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Diplomová práce řeší vývoj procesních parametrů technologie SLM pro materiál IN718. Hlavním cílem je experimentální stanovení souboru parametrů pro výrobu tenkostěnných dílů s ohledem na hustotu materiálu, drsnost povrchu a těsnost. Podstatou vývoje parametrů je experimentální objasnění vlivu výkonu laseru a skenovací rychlosti na morfologii samostatných návarů, kterými jsou vyrobeny tenké stěny. Společně se stěnami větších šířek a objemovými vzorky je možné vytvořit průnik parametrů, kterým lze vyrobit součásti tvořené kombinací tenkostěnné a objemové geometrie. Provedeným výzkumem vznikl materiálový soubor, kde je využito parametrů tenkých stěn na oblast obrysových kontur objemových těles. Podařilo se vyrobit stěnu s průměrnou šířkou 0,15 mm a drsností 6  $\mu\text{m}$ , která splňuje požadavek těsnosti. Skenovacím vzorem meander bylo dosaženo relativní hustoty materiálu 99,92 %, což je více než s parametry od dodavatele. Na základě získaných poznatků bylo možné aplikovat soubor parametrů na součásti kombinující obě geometrie vystavené přetlakům.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Selective laser melting, Inconel 718, tenkostěnné díly, těsnost SLM dílů, niklová superslitina

## ABSTRACT

The diploma thesis deals with the development of process parameters of SLM technology for the material IN718. The main goal is an experimental development of a set of parameters for the production of thin-walled parts with regard to material density, surface roughness and tightness. The essence of the development of parameters is an experimental explanation of the influence of laser power and scanning speed on the morphology of single tracks, which are used for the production of a thin wall. Together with walls of larger widths and volume samples, it is possible to create an intersection of parameters by which is possible to create components formed by a combination of thin-walled and volume geometry. The performed research created a material set, where the parameters of thin walls are used for the area of contours of bulk samples. We managed to produce a wall with an average width of 0.15 mm and roughness of 6  $\mu\text{m}$ , which meets the requirement for the tightness. The meander scanning pattern achieved a relative material density of 99.92%, which is more than with the supplier's parameters. Based on the acquired knowledge, it was possible to apply a set of parameters to components combining both geometries.

## KEYWORDS

Selective laser melting, Inconel 718, thin-walled parts, tightness of SLM parts, Nickel superalloy



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KAFKA, Richard. *Vývoj procesních parametrů pro tenkostěnné díly z niklové superslitiny*. Brno, 2021, 121 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.





## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval především panu doc. Ing. Danielu Koutnému, Ph.D. za vedení práce, odborné rady a cenné připomínky. Dále děkuji školiteli na SLM zařízení Ing. Vítu Šreibrovi a za pomoc s přípravou metalografických výbrusů. Poděkování patří také Ing. Romanu Štěpánkovi, Ph.D. za přípravu několika metalografických vzorků a Panu Janu Zavřelovi, DiS. za elektroerozivní odřezání vzorků z platformy. V neposlední řadě patří mé poděkování rodině a přítelkyni za podporu a trpělivost při zpracování této diplomové práce.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Bc. Richard Kafka



# OBSAH

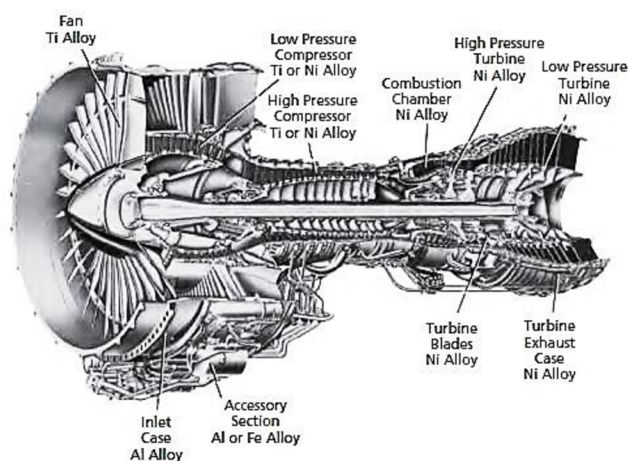
<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>16</b>
2.1	Materiál Inconel 718	16
2.2	Základní procesní parametry SLM	17
2.3	Drsnost povrchu aditivně vyráběných dílů	19
2.4	Porozita a zbytkové napětí	21
2.5	Vliv procesních parametrů na drsnost povrchu	23
2.5.1	Hustota laserové energie a stavěcí úhel	23
2.5.2	Skenovací rychlost a průměr paprsku	24
2.5.3	Tloušťka vrstvy	26
2.6	Vliv procesních parametrů na porozitu	26
2.6.1	Optimální hustota laserové energie a stavěcí úhel	27
2.6.2	Zaostření laserového paprsku	30
2.6.3	Vliv skenovací strategie na zbytkové napětí	31
2.7	Zpracování tenkostěnných dílů	32
2.7.1	Návarové testy	34
2.8	Měřicí metody těsnosti součástí	34
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>36</b>
3.1	Analýza problému	36
3.2	Analýza a zhodnocení rešerše	37
3.3	Cíle diplomové práce	40
3.4	Vědecké otázky a hypotézy	41
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METODY</b>	<b>42</b>
4.1	Postup řešení	42
4.2	Prášek Inconel 718	44
4.3	Použité zařízení a postupy	44
4.3.1	SLM 280 HL	44
4.3.2	KEYENCE VHX-6000	44
4.3.3	SAPHIR 250 A2-ECO	45
4.4	Návarové testy	45

4.4.1	Kontinuita návaru	47
4.4.2	Geometrie návaru	47
<b>4.5</b>	<b>Testy tenkých stěn</b>	<b>48</b>
4.5.1	Tenké stěny tvořené jedním návarem	48
4.5.2	Experiment zaostření laserového paprsku	49
4.5.3	Test stěn pod úhlem	50
4.5.4	Test kvality stěn větších šířek	50
<b>4.6</b>	<b>Testy objemových vzorků</b>	<b>51</b>
<b>4.7</b>	<b>Testy těsnosti</b>	<b>52</b>
4.7.1	Zařízení na měření těsnosti	52
<b>4.8</b>	<b>Ověření získaných procesních parametrů</b>	<b>54</b>
4.8.1	Návrh testovací součásti	54
<b>4.9</b>	<b>Pracovní postup metalografických úprav</b>	<b>55</b>
<b>4.10</b>	<b>Metody vyhodnocení</b>	<b>56</b>
4.10.1	Postup vyhodnocení geometrie jedné skenovací stopy	56
4.10.2	Měření šířky tenké stěny	57
4.10.3	Vyhodnocení drsnosti povrchu	57
4.10.4	Vyhodnocení porozity	58
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>59</b>
<b>5.1</b>	<b>Vyhodnocení návarových testů</b>	<b>59</b>
5.1.1	Analýza horního pohledu	59
5.1.2	Geometrie návarů	62
5.1.3	Perspektivní oblast parametrů	65
<b>5.2</b>	<b>Tenké stěny tvořené jedním návarem</b>	<b>67</b>
5.2.1	Vstupní parametry	67
5.2.2	Analýza posledních návarů	68
5.2.3	Vyhodnocení šířky stěny	69
5.2.4	Drsnost povrchu	70
5.2.5	Design of Experiment (DoE)	71
5.2.6	Ověření predikce DoE	73
5.2.7	Experiment zaostření laserového paprsku	73
5.2.8	Návary se zaostřením	76
5.2.9	Test stěny pod úhlem	77
5.2.10	Stěna tvořená dvojím skenováním laseru	79
5.2.11	Experiment délky skenování	81
<b>5.3</b>	<b>Testy stěn větších šířek</b>	<b>84</b>

5.3.1	Příprava a popis experimentu	84
5.3.2	Analýza drsnosti povrchu kolmé stěny	85
5.3.3	Analýza drsnosti povrchu šikmé stěny	86
5.3.4	Optimalizace kontury parametrem Downskin	87
5.3.5	Rozměrová přesnost kolmých stěn	88
5.3.6	Vyhodnocení relativní hustoty materiálu	89
5.4	Vyhodnocení objemových vzorků	89
5.4.1	Porovnání s parametry od dodavatele	89
5.4.2	Hustota materiálu s rozdílnou skenovací strategií	90
5.5	Průnik parametrů	91
5.6	Tvarový experiment	92
5.6.1	Tenkostěnná struktura	93
5.6.2	Výroba prutů	93
5.7	Vyhodnocení experimentu těsnosti	94
5.7.1	Příprava a popis experimentu	94
5.7.2	Analýza získaných dat	95
5.8	Ověření získaných parametrů	95
5.8.1	Výroba součástí a tlakový test	95
5.8.2	Analýza generování výrobních dat tenkostěnné geometrie	97
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>99</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>104</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>106</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>110</b>
9.1	Seznam zkratk	110
9.2	Seznam veličin	110
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>111</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>116</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>117</b>

# 1 ÚVOD

Největší oblastí potenciální aplikace aditivního výrobního procesu je oblast letecké techniky. Je zde vyžadována vysoká teplotní odolnost, únavová životnost a dobré mechanické vlastnosti. Vysokoteplotní materiály, které jsou schopny odolat teplotě až 80 % teploty tavení materiálu, také známé pod názvem „superslitiny“, jsou dobrým příkladem typu slitin vykazujících výše uvedené požadavky [1]. Hlavním představitelem jsou slitiny na bázi niklu. Jejich typickým využitím jsou součásti proudového motoru, kde tvoří obvykle 40 - 50 % z jeho celkové hmotnosti [2]. Dosahují meze pevnosti v tahu až 1600 MPa za pokojové teploty [2]. Jak ukazuje Obr. 1-1, většina částí motoru je vyrobena víceméně tenkostěnnými, tvarově složitými profily. Je to dáno zejména snižováním hmotnosti a lepším rozvodem tepla. Zároveň tyto součásti musí být schopny odolat vysokým tlakům. Nejpoužívanější slitinou je Inconel 718.



Obr. 1-1 Řez proudového motoru [3]

Jedním z hlavních představitelů aditivních technologií je selektivní laserové tavení (SLM). Tento způsob výroby umožňuje vyrábět součásti z různých slitin tavením částic kovového prášku laserovým paprskem. K vytvoření jakékoli složité geometrie dochází pohybujícím se laserem v různých skenovacích strategiích, a to vrstvou po vrstvě. Při vytváření navazujících vrstev za použití větší tepelné laserové energie, se taví nejen nově nanesený prášek, ale také předchozí vrstvy, čímž dojde k vytvoření jemnozrnné mikrostruktury vyznačující se dobrými mechanickými vlastnostmi. Během procesu je zařízení naplněno inertním plynem zamezující nežádoucí oxidaci produktu okolní atmosférou. V současné době lze pomocí SLM zpracovat několik desítek kovových materiálů a jejich slitin. Jejich použití je zejména pro speciální díly ve vesmírných aplikacích, lékařství, letectví nebo v automobilovém průmyslu. Hlavní předností SLM je výroba dílů s komplexní geometrií, které nelze vytvořit konvenčními způsoby. Za komplexní geometrii lze považovat součást kombinující tenké stěny a objemové prvky různých tvarů. Typickým příkladem je tepelný výměník.

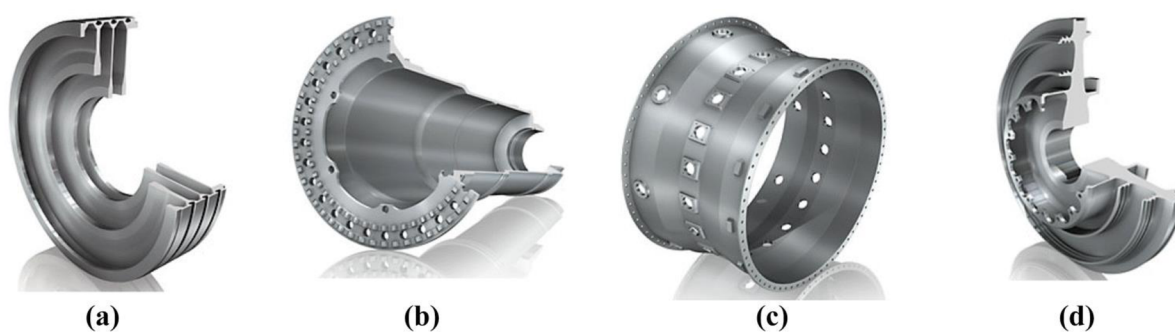
Výrobní proces geometrických prvků technologie selektivního laserového tavení, jako jsou již zmíněné tenké stěny nebo například převislé struktury, je z tepelného hlediska výrazně odlišný od zpracování objemových dílů. Se snižujícím se stavebním úhlem se zhoršuje drsnost povrchu. Ta je pro součásti, které nelze kvůli své složitosti dále opracovat, nežádoucí. V krajních oblastech šikmých stěn narůstá velké množství podpovrchové mikroporozity ovlivňující tvorbu mikrotrhlin [4]. To negativně působí na únavovou pevnost materiálu. Velkou roli hraje i schopnost tenké stěny odolávat vysokým tlakům. Těsnost je tedy další důležitý požadavek tenkých stěn.

Tato práce je zaměřena na materiálový výzkum slitiny IN 718, stanovení oblasti s vhodnou kombinací hlavních procesních parametrů, které jsou perspektivní pro vytvoření tenkostěnných dílů ze slitiny IN718, s nízkou porozitou a drsností potřebnou pro vysokoteplotní operace. Dílčím cílem práce je ověření získaných parametrů na tenkostěnné součásti vystavené přetlaku, což se pojí s těsností stěn.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Materiál Inconel 718

Technologie SLM se v poslední době stává potenciální výrobní oblastí letecké techniky. Nejslibnějšími výhodami jsou zejména možnosti výroby geometricky složitých a dutých dílů, úspora materiálu a možné nahrazení několika jednotlivých pracovních procesů. Superslitiny na bázi niklu jsou jedním z nejpoužívanějších materiálů v moderním leteckém průmyslu. Díky své rovnováze mezi pevností při vysokých teplotách, odolností proti tečení, únavovou pevností a odolností pro oxidaci a korozi, jsou používány v horké části proudových motorů. Mechanická napětí vznikající v turbínových discích mohou během letu dosáhnout až 1000 MPa [5].



Obr. 2-1 Součásti motorů Aircraft ze slitiny IN 718; a) cívka motoru; b) turbínová hřídel; c) spalovací pouzdro; d) turbínový disk; [6]

Austenitová slitina Inconel 718 (dále jen IN718) vykazuje vynikající kombinaci mechanických vlastností a dobré zpracovatelnosti ve vysoce agresivních pracovních prostředích. Díky odolnosti vůči korozi za teplot až 650 °C, dobrým únavovým vlastnostem a odolnosti proti opotřebení, z něj činí atraktivního kandidáta pro mnoho dalších aplikací, jako jsou plynové turbíny, raketové motory a jaderné reaktory. Z důvodu své mikrostrukturální stability za zvýšených teplot našla tato slitina své místo také v automobilovém průmyslu. Používá se pro některé části turbodmychadel [7].

Následující kapitoly jsou zaměřeny na zpracování niklových superslitin, resp. materiálu IN718 a IN625. Slitina Inconel 718 je stárnutá verze slitiny 625. Stárnutím (neboli precipitačním vytvrzením) se vytvoří sraženiny v molekulární struktuře, které jsou tvaru sloupcových zrn. Výsledkem je výraznější pevnost materiálu. V případě slitiny 718 jde o 2x větší hodnotu meze kluzu po tepelném zpracování oproti slitině 625 [8] [9]. Podle Tab. 2-1 mají srovnatelné fyzikální vlastnosti jako je hustota a konduktivita. Rovněž se podobají chemickým složením. Proto je možné zaměřit řešeršní část na obě podskupiny niklových superslitin.



Tab. 2-1 Fyzikální a mechanické vlastnosti; pro tloušťku vrstvy 30 μm [8] [9]

	Konduktivita (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Hustota (g·cm <sup>-3</sup> )	Mez kluzu (Mpa)	Tvrdość (HV)
IN 718	11,2	8,20	1281	303
IN 625	9,8	8,44	699	303

## 2.2 Základní procesní parametry SLM

Technologie SLM a další aditivní technologie jsou komplexním výrobním procesem, jehož nastavením lze měnit mikrostrukturu a tím i konečné materiálové a mechanické vlastnosti součásti. Požadavky na kvalitu součásti mohou být drsnost povrchu, vysoká hustota materiálu, rozměrová a geometrická přesnost, mikrostruktura a mechanické vlastnosti. Parametry výrobního procesu lze rozdělit na laserové, skenovací, práškové a teplotní. Základní parametry jsou uvedeny níže [7].

### Hustota laserové energie

Objemová hustota laserové energie (*VED*) řídí množství energie přiváděné do procesu tuhnutí. Spolu s rychlostí chlazení hrají klíčovou roli ve velikosti zrn v konečné ztuhlé části, což vede k menším zrnům ve srovnání s odlévanými součástmi. Jedná se o komplex dílčích procesních parametrů, zobrazených v rovnici 2-1. Lze také použít plošnou hustotu energie (*LED*), kde se bere v úvahu pouze výkon, skenovací rychlost a tloušťka vrstvy [10].

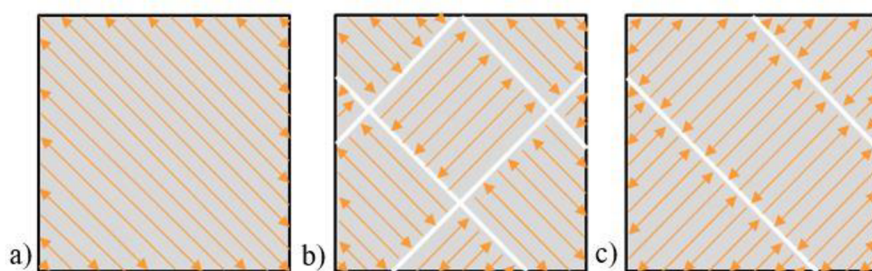
$$VED = \frac{P}{v \cdot H \cdot t} \left( \frac{J}{mm^3} \right) \quad (2-1)$$

kde:

<i>P</i>	W	- výkon laseru
<i>v</i>	mm · s <sup>-1</sup>	- skenovací rychlost
<i>H</i>	mm	- vzdálenost skenovacích stop
<i>t</i>	mm	- tloušťka vrstvy

### Strategie skenování

Strategie skenování kovového prášku udává dráhu laserového paprsku při tavení jednotlivých vrstev. Volba vhodné strategie je jeden ze způsobů, jak snížit případná zbytková napětí, která při výrobě vznikají. Důvodem vzniku těchto napětí je rychlý ohřev a následné ochlazení taveniny. To má za následek vznik smykových sil mezi jednotlivými vrstvami a výslednou koncentraci zbytkového napětí [11].

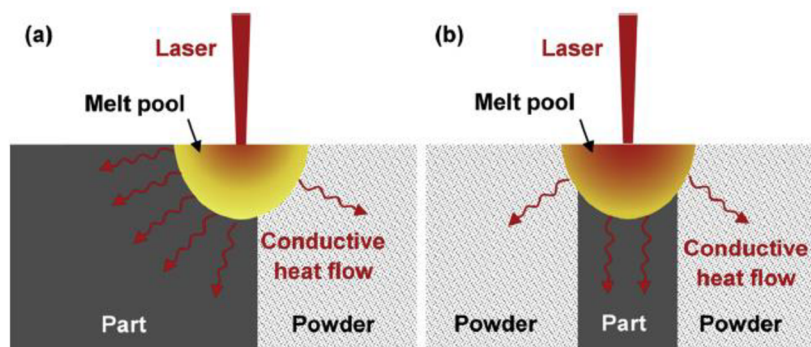


**Obr. 2-2** Vzorové skenovací strategie; a) meander; b) chessboard; c) stripes; upraveno z [11]

Základní šrafovací strategie se nazývá „meander“ a je zobrazena na Obr. 2-2a. Používá se pro malé a tenkostěnné díly. Rozdělením celé oblasti do několika menších podoblastí s různými skenovacími směry lze dosáhnout rovnoměrně rozloženého zbytkového napětí. Tento vzor (Obr. 2-2b) se nazývá „chessboard“ (šachovnice). Jednotlivé čtverce jsou skenovány pomocí strategie meander, a jsou vůči sobě pootočený o  $90^\circ$ . Používá se hlavně pro rozměrově větší součásti [12]. Podobného rozložení zbytkového napětí lze dosáhnout také u skenovací strategie „stripes“ (Obr. 2-2c). Charakteristickým znakem je dráha laseru tvořená přerušovanými pásy. Skenovací vektory jsou kratší, což příznivě snižuje koncentraci zbytkového napětí. Volba strategie stripes, stejně jako u metody chessboard, je vhodná pro větší a objemnější součásti [12]. Skenovací strategie se mohou mezi jednotlivými vrstvami pootočit o určitý úhel. Bez mezivrstevní rotace se mohou na sebe indukovat opakující se defekty. Obvykle se používá úhel  $67^\circ$ . To je hodnota, kdy je možné vytvořit největší počet vrstev na sebe, aniž by se opakovaly směry skenovacích vektorů.

Kvalita vyráběné součásti, včetně konečné relativní hustoty materiálu a drsnosti povrchu, je primárně závislá na vlastnostech natavené oblasti. Malá roztavená oblast ovlivňuje hloubku skenovací stopy, která může způsobit nedostatečné protavení předchozí vrstvy. Větší oblast taveniny vznikne poklesem skenovací rychlosti, kdy je dodávána větší hustota energie [13].

Použití konstantních parametrů v průběhu výrobního procesu nedokáže zajistit kvalitu celé součásti. Zpracování některých geometrických prvků (např. tenkých stěn a převislých struktur) je z tepelného hlediska výrazně odlišné od zpracování jednoduchých objemových dílů [14]. Během výrobního procesu dochází k teplotám tavení materiálu. Teplo odváděné z tavné lázně již vyrobenou částí komponenty je větší než v případě tavení oblasti s pouze práškovým podkladem (Obr. 2-3). Je to dáno tím, že teplo v oblasti prášku pod vytvářenou vrstvou nemá kam odcházet. Prášek je v porovnání s již ztuhlým materiálem izolant. Nedochází zde k rychlému odvodu a roste natavená oblast [15]. A jelikož je převislá geometrická oblast závislá na rozměrech tavné lázně, bude ovlivněna její kvalita povrchu. Proto je důležité zaměřit se i na specifické geometrické prvky jako jsou již zmíněné šikmé stěny.

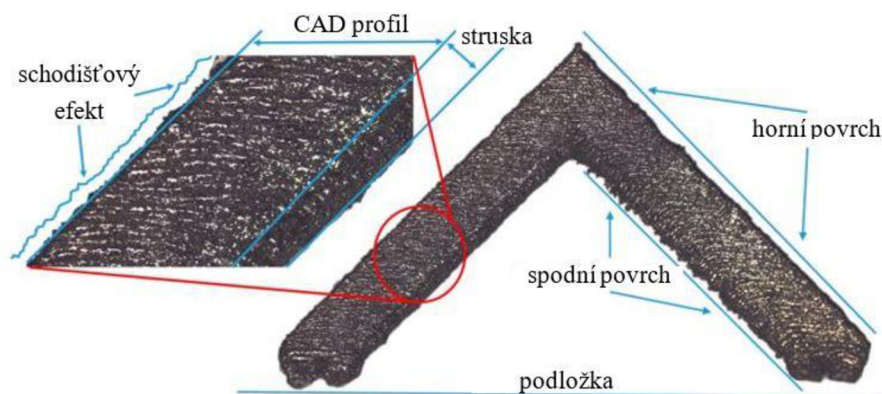


Obr. 2-3 Rozdíl v odvodu tepla; a) objemová část; b) tenká stěna [14]

## 2.3 Drsnost povrchu aditivně vyráběných dílů

Součásti vyráběné aditivními technologiemi se vyznačují vysokou drsností povrchu, která vyžaduje následné dokončovací úpravy, což se z pohledu výrobce může projevit jako dražší či časově náročný výrobní proces. V horším případě, například u součástí, které mají funkční plochy na méně přístupných místech, je tato varianta nepřijatelná. Proto je vyžadována co nejmenší drsnost povrchu. Za účelem zlepšení kvality povrchu stojí také omezení vzniku mikrotrhlin. Ty se iniciují v místech prasklin a pórů. Drsnost povrchu vychází ze dvou odlišných mechanismů: i) nerovnoměrné tuhnutí roztaveného materiálu v oblasti horního povrchu v důsledku turbulentního proudění taveniny a ii) nežádoucí přilepení práškových částic na spodní povrch převislé části v důsledku vysokého přívodu laserové energie [14].

Drsnost součásti může být ovlivněna jevem známým jako „balling efekt“. Tento efekt je charakterizován tvorbou výrazně hrubých kuliček na povrchu právě slinuté vrstvy. Je způsoben snížením povrchového napětí taveniny a nelineárním tuhnutím. U slitin na bázi niklu mají kuličky tendenci se tvořit při použití malé hustoty energie, což může vyplývat ze zvýšení skenovací rychlosti nebo snížení výkonu laseru [7].

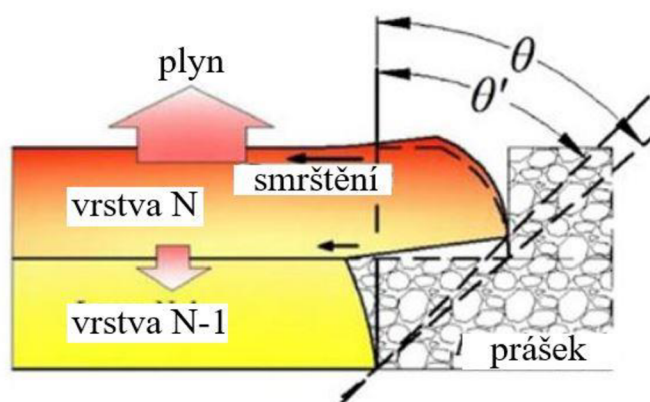


Obr. 2-4 Schodišťový efekt na horním a tvorba strusky na spodním povrchu; upraveno z [16]

Výrobní proces převislých stěn vykazuje tzv. schodišťový efekt (Obr. 2-4) vyskytující se na plochách směřujících dolů. Tento efekt přispívá ke zvýšené drsnosti těchto povrchů. Povrchy, které jsou pod úhlem menším než  $45^\circ$  vůči základní desce, vykazují velmi vysokou drsnost. V takovémto případě je to připisováno především tvorbě strusky. Ta vzniká v důsledku vysoké absorpce laserové energie do podkladového prášku, na rozdíl od oblastí tvořených již ztuhlými předchozími vrstvami [16]. Existuje několik významných rozdílů v laserové absorpci a tepelné vodivosti mezi pevným materiálem a práškem. Tepelná vodivost práškového materiálu je přibližně 100x menší než u pevného podkladu [17]. To způsobuje výrazný teplotní gradient. Nahromaděná energie v kovovém prášku příliš ovlivňuje růst roztavené oblasti, která se v důsledku gravitační a kapilární síly propadne a vytvoří se struska.

Vyskytující se struska nemusí ovlivnit pouze drsnost povrchu, ale může vykazovat horší rozměrovou přesnost součástí. Použití strukturálních podpor by tvorbu strusky omezilo. To však vede k nárůstu procesních kroků, zejména jejich odstraňování. Navíc špatným nastavením procesních parametrů ovlivňujících tisk podpor by mohlo dojít k tvorbě otřepů ovlivňujících výslednou drsnost povrchu. Využití strukturálních podpor je ve většině případů co nejvíce omezováno, jak z hlediska časové náročnosti post výrobního procesu, tak kvůli poškození povrchu v důsledku jeho odstraňování. Velkou roli zde hraje také použití většího množství materiálu. Ovšem existují případy, kdy právě podpurné struktury jsou jedinou variantou ke zhotovení geometricky složitěho výrobku.

U převislých prvků dochází často k makroskopickým deformacím vytvářených vrstev. V důsledku termálního pnutí při nerovnoměrném smršťování materiálu během tuhnutí, vznikají v horní části vytvářené vrstvy tahová napětí [14]. V případě překročení termálně snížené pevnosti materiálu, dochází k plastické deformaci, která se projeví jako ohyb vytvářené vrstvy směrem vzhůru. Je to také dáno tím, že podkladovým materiálem není již ztuhlá předchozí vrstva, nýbrž prášek. Princip tvorby takovýchto deformací je zobrazen na Obr. 2-5.

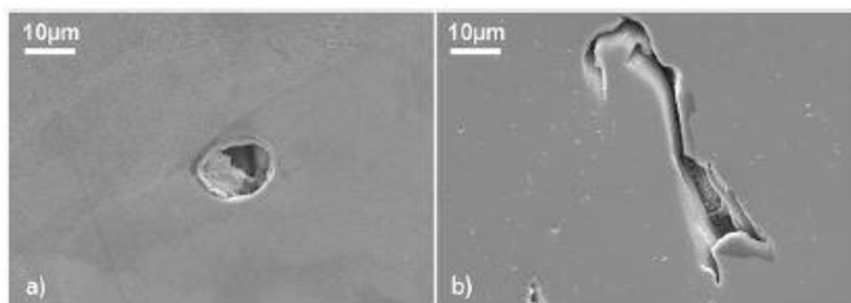


Obr. 2-5 Princip vzniku makroskopických deformací; upraveno z [14]

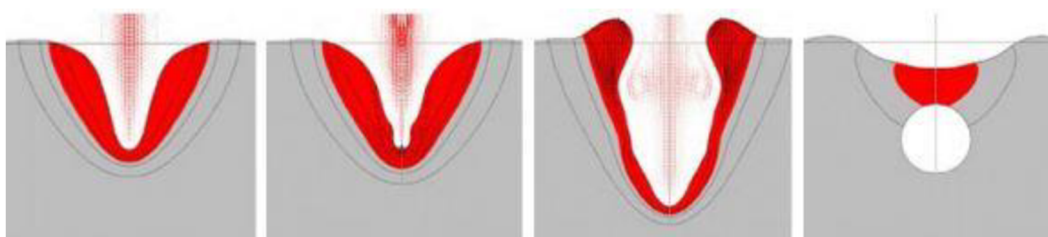
Jak již bylo zmíněno, kvalitu povrchu lze zlepšit pomocí dokončovacích úprav. Příkladem může být kuličkování nebo elektrolytické leštění. Potom lze dosáhnout drsnosti povrchu 5 až 10  $\mu\text{m}$  [18]. Bohužel tyto varianty nelze použít pro dutiny nebo geometricky složité tvary. Navíc zbytková pórovitost představuje zásadní problém při dosahování dobré konečné povrchové úpravy. Mechanická úprava funguje jako subtraktivní metoda, která přináší erozi určitého množství povrchu, čímž dojde k odhalení podpovrchové mikro-porozity, což ovlivní výsledné mechanické vlastnosti.

## 2.4 Porozita a zbytkové napětí

Během výrobního procesu selektivního laserového tavení mohou vznikat dva základní typy pórů, které se liší mechanismem tvorby. Jsou to póry vzniklé příliš velkým přívodem laserové energie a póry vzniklé nedostatečným protavením. V prvním případě (Obr. 2-6a) jsou kulaté póry důsledkem velkého přívodu energie, což se pojí s nízkou skenovací rychlostí. Dochází zde k rychlému chladnutí materiálu. Jak již bylo uvedeno, pro technologii SLM je charakteristické použití inertního plynu. Tyto inertní plyny nepodléhají chemickým reakcím a zabraňují tak kontaminaci roztavené kovové lázně nebo zpevněného kovu. Jestliže není inertnímu plynu umožněn únik pryč z roztavené lázně, zůstane po jejím ztuhnutí uvězněn uvnitř. Tím dojde ke vzniku dutin vyplněných plynem [19].



**Obr. 2-6** Druhy porozity v materiálu IN 718; a) uvězněný plyn; b) lack of fusion [19]



**Obr. 2-7** Princip vzniku póru zánikem režimu klíčové dírky [20]

Druhým procesem vzniku pórovitosti je nedostatečné množství tepelné energie, což má za následek nedokonalé tavení prášku a nedostatečné pronikání taveniny do substrátu nebo do dříve vytvořené vrstvy [21]. Taktéž nemusí dojít k úplnému protavení s okolními skenovacími stopami. Výsledkem nedostatečného tavení je vytvoření vnitřních nepravidelných dutin nazývaných „lack of fusion“ (Obr. 2-6b). Naopak v případě příliš vysoké hustoty energie dochází ke vzniku tzv. keyhole režimu, kde materiál vystavený zdroji tepelného paprsku se začíná odpařovat a vytváří hlubokou dutinu tvaru klíčové dírky [7]. Tento režim je převzatý z technologie svařování. Tyto dutiny mohou při svém zániku způsobit uvěznění plynu u dna svarové vrstvy, čímž dojde ke vzniku póru, který může mít kulový či oválný tvar [21]. Princip vzniku póru je zobrazen na Obr. 2-7. Porozita vlivem tohoto efektu je u niklových superslitin zcela běžná, a to díky velkému tavnému rozsahu tvořeného velkým množstvím legujících prvků.

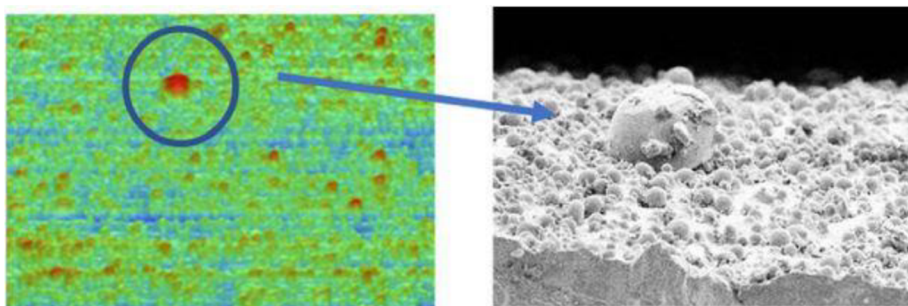
Přítomnost zbytkového napětí, obzvláště tahového napětí blízkého povrchu je nežádoucí, protože snižuje efektivní mez únavy a tahové vlastnosti materiálu. Hlavní příčinou zbytkového napětí v procesu SLM je nestejnosměrný teplotní gradient ve vyhřívané oblasti během tavení. To má za následek komplikovanou nerovnoměrnou deformaci během rychlého ochlazování, kdy se laserový paprsek pohybuje jiným směrem od tuhnutí lázně. Minimalizování zbytkového napětí v součásti lze dosáhnout vhodnou volbou procesních parametrů a skenovací strategie. Velkou roli může hrát i předehtání práškového lože. Předehtání způsobí snížení teplotního gradientu [7].

Součásti turbínového motoru jsou vystaveny významným výkyvům napětí a teplotám během opakovaných cyklů vzletu, letu a přistání. Tyto cykly mohou mít za následek malé lokalizované napětí, které po delší době může vzrůst a dojít k selhání součásti. Únavová životnost, tj. trvanlivost součástí je jednou z nejdůležitějších mechanických vlastností konstrukčních dílů. Studium únavové životnosti předpovídá růst trhlin v součásti, resp. počet cyklů potřebných k vytvoření malé trhliny a její šíření v rámci struktury součásti. Pevnost tepelně ovlivňovaného IN718 je řízena třemi faktory: i) mikrostrukturou, ii) vnitřními defekty a iii) kvalitou povrchu [22]. Další kapitoly jsou věnovány vlivu procesních parametrů na poslední dva zmíněné faktory.

## 2.5 Vliv procesních parametrů na drsnost povrchu

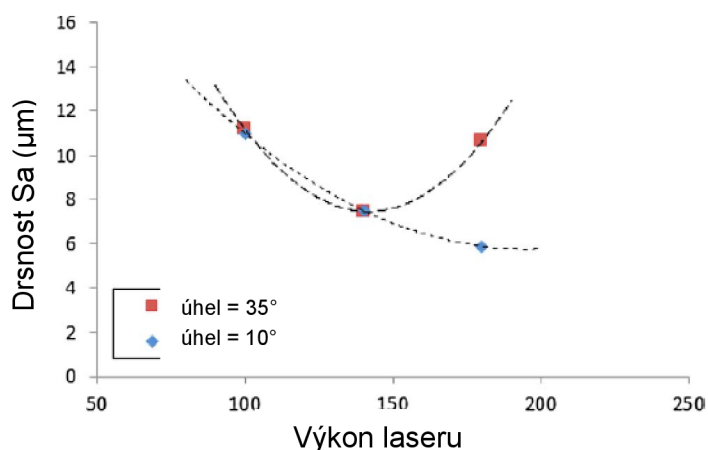
### 2.5.1 Hustota laserové energie a stavěcí úhel

Koutiri [23] zkoumal jak výkon laseru ovlivňuje drsnost povrchu převislé stěny v závislosti na stavěcím úhlu u materiálu IN625. Potvrdil, že zvýšení výkonu laseru má tendenci zvyšovat velikost roztavené oblasti, což umožňuje lepší opětovné roztavení předchozích vrstev. To vede k lepší kvalitě povrchu. Na druhé straně příliš velká hodnota výkonu v kombinaci s velkým stavěcím úhlem způsobí lepení okolních částic na převislý povrch. Takovéto částice mohou hrát roli během cyklických zatížení, jelikož jsou vystaveny iniciaci únavových trhlin, protože jsou plně zapuštěny do povrchu, jak je ukázáno na Obr. 2-8. Jejich tvorbu lze přičítat jejich pozici v těsné blízkosti stěn, s nimiž se mohou spojit.



Obr. 2-8 Neroztavená částice na povrchu součásti [9]

Na Obr. 2-9 lze vidět, že snížení těchto aglomerátů na spodním povrchu součásti se stavěcím úhlem  $10^\circ$ , se dosáhne při výkonu laseru 180 W a skenovací rychlosti 0,5 m/s. Pro větší úhel ( $35^\circ$ ) se to děje při výkonu mezi 100 a 140 W.

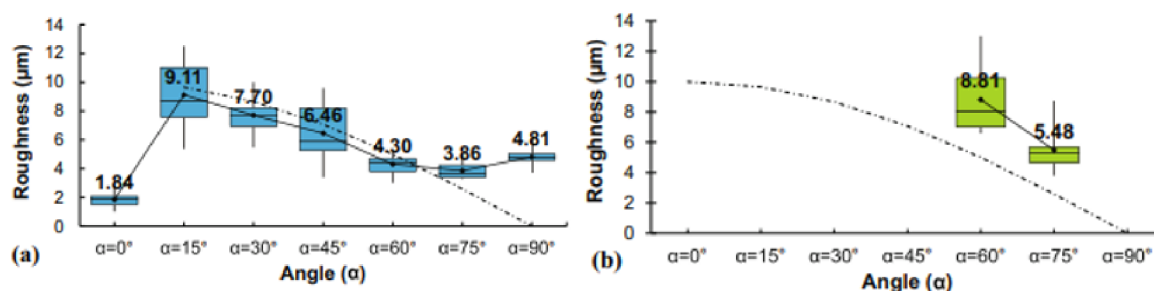


Obr. 2-9 Závislost drsnosti horního povrchu na výkonu laseru pro rozdílné stavěcí úhly;  $v = 0,5$  m/s [23]

Campbell [24] odvodil teoretickou drsnost povrchu ( $R_a$ ) pro převislý povrch. Kde  $\theta$  je úhel mezi normálou povrchu a vertikálním směrem, a  $t$  je tloušťka vrstvy. Z rovnice 2-2 vyplývá, že kvalita povrchu roste s klesající tloušťkou vrstvy. Také se očekává, že se drsnost zvýší s tím, jak se snižuje sklon povrchu.

$$R_a = \frac{t \cdot \sin(\theta)}{4 \tan(\theta)} \quad [\mu\text{m}] \quad (2-2)$$

To potvrdil Covarrubias [25], který se věnoval vlivu stavěcího úhlu na povrchové vlastnosti u niklových superslitin, resp. materiálu IN718. Procesní parametry byly nastaveny stejně jak pro konturu, tak pro vnitřní výplň. Tloušťka vrstvy byla 40  $\mu\text{m}$ , výkon laseru 285 W a skenovací rychlost 960 mm/s. Byla použita skenovací strategie meander. Na Obr. 2-10 jsou zobrazena porovnání experimentálních dat a teoretické drsnosti. Jediným výrazným rozdílem je stavěcí úhel  $0^\circ$ , kdy v tomto případě nelze teoretický model aplikovat. V případě  $90^\circ$  je experimentální drsnost vyšší než teoretická. To je možné připsat roztavením malých částic blízkých povrchu nebo smrštění materiálu.



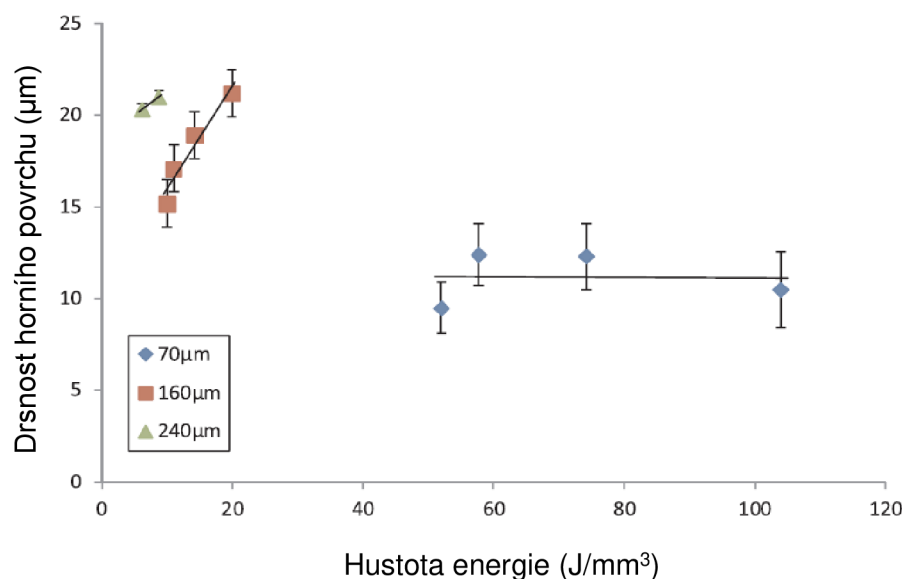
Obr. 2-10 Závislost drsnosti povrchu na úhlu; a) horní povrch; b) spodní povrch; [25]

## 2.5.2 Skenovací rychlost a průměr paprsku

Koutiri [23] zkoumal vliv procesních parametrů na drsnost povrchu, porozitu a únavové chování niklové superslitiny Inconel 625 pro různé stavěcí úhly. Cílem tohoto výzkumu bylo také zjistit, zda použití objemové hustoty energie je možné aplikovat za účelem dosažení lepší kvality povrchu. Podařilo se jim objasnit vliv skenovací rychlosti konturové strategie a průměru laserového paprsku na povrch vzorku.

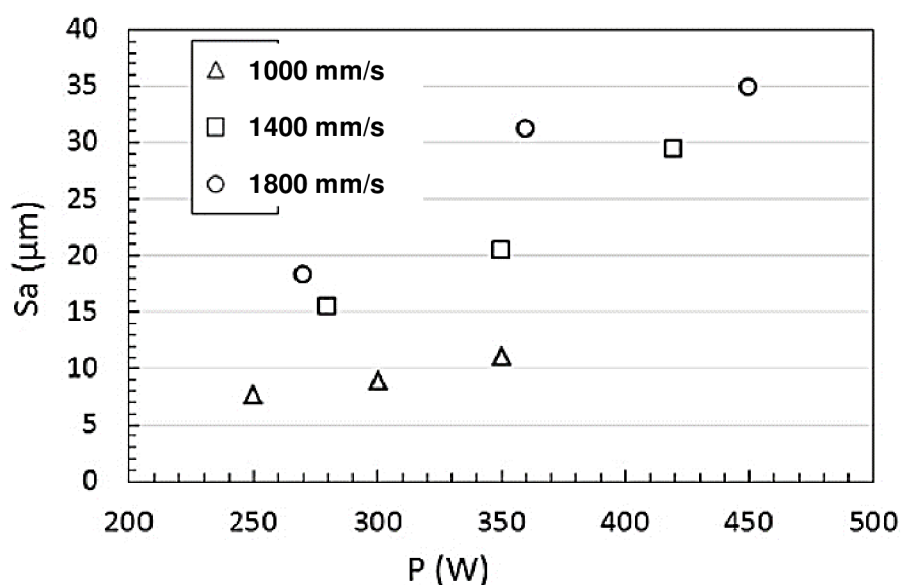
Za použití konstantního výkonu laseru (400 W), byly měněny skenovací rychlosti 1 až 2 m/s. Průměr laserového paprsku byl nastaven na 70, 160 a 240  $\mu\text{m}$ . Tyto uvedené parametry byly použity jak pro konturu, tak pro výplň. Drsnost povrchu vzorků byla změřena na optickém profilometru. Z Obr. 2-11 je patrné, že největší rozsah drsnosti při konstantní hodnotě průměru paprsku a snižující se skenovací rychlosti, je pro průměr o velikosti 160  $\mu\text{m}$ . Autor udává mírný růst  $S_a$  se zvyšujícím se  $VED$ . Porovnáním všech tří průměrů paprsku lze usoudit, že menší průměr paprsku podporuje vyhlazování povrchu. Nejlepší kvality povrchu (6 až 11  $\mu\text{m}$ ) bylo dosaženo při výkonu laseru 140 až 180 W, skenovací rychlosti 0,5 m/s a průměru paprsku 70  $\mu\text{m}$ .





Obr. 2-11 Vliv průměru laserového paprsku na drsnost; upraveno z [15]

Moussaoui [4] zkoumal účinky *VED* na drsnost u objemových vzorků materiálu Inconel 718 tvaru krychle. Jednalo se pouze o horní povrch vzorku, tudíž parametry kontury a jádra byly stejné. Nejmenší drsnosti 6,7 μm bylo dosaženo při nastavení výkonu laseru na 250 W a skenovací rychlosti 1000 mm/s. Jako skenovací strategie bylo použito paralelního skenování (meander) s 90° mezivrstevní rotací. Z Obr. 2-12 je patrné, že drsnost horního povrchu vzorku je silně závislá na skenovací rychlosti. Zvyšováním rychlosti a výkonu vzniká větší drsnost, zatímco nižší rychlostí lze dosáhnout lepší kvality povrchu. Autor také uvádí, že vzdálenost skenovacích st op (*H*) nemá žádný výrazný vliv na konečnou kvalitu horního povrchu.



Obr. 2-12 Vliv výkonu laseru a skenovací rychlosti na drsnost horního povrchu; upraveno z [4]

### 2.5.3 Tloušťka vrstvy

Dalším ze způsobů, jak kontrolovat povrchovou úpravu, je měnit tloušťku vrstvy. Samozřejmě nezáleží pouze na tomto parametru, ale je důležité ke každé hodnotě vhodně zvolit ostatní procesní parametry. Způsobem, jakým tloušťka vrstvy ovlivní drsnost povrchu, porozitu a výsledné mechanické vlastnosti materiálu IN718, se zabýval Nguyen [26]. Byly porovnány tloušťky vrstvy 20, 30, 40 a 50  $\mu\text{m}$ . Vzorčky o velikosti 10 x 10 x 10 mm byly vyrobeny s výkonem laseru 285 W, skenovací rychlostí 2,5 m/s a šrafovací vzdáleností 50  $\mu\text{m}$ . V Tab. 2-2 jsou uvedeny naměřené hodnoty pro jednotlivé vrstvy.

Drsnost horního povrchu byla měřena na profilometru Bruker a pro měření porozity byla aplikována metoda metalografického výbrusu. Kromě toho, že menší vrstva měla o něco lepší rozměrovou přesnost u všech zkoumaných tvarů, také bylo dosaženo lepších mechanických vlastností. Jak ukazuje tabulka, modul pružnosti v tahu je pro tloušťku 20  $\mu\text{m}$  přibližně o 30 GPa větší než pro 50  $\mu\text{m}$ . Výsledky ukazují, že čím menší je tloušťka vrstvy, tím lze dosáhnout lepší kvality součástí. Porozita vyšla pro všechny hodnoty menší než 1,1 %, ačkoli s nejmenší tloušťkou bylo dosaženo nejlepších hodnot. To se dá vysvětlit tím, že menší tloušťkou lze zcela roztavit prášek i póry s případně zachyceným plynem.

Tab. 2-2 Vlastnosti IN 718 pro různé tloušťky [26]

	<b>Ra (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>hustota (%)</b>	<b>tvrdost (HV)</b>	<b>E (Gpa)</b>	<b>Re<sub>0,2</sub> (Mpa)</b>
20 $\mu\text{m}$	5,1	99,98	339	203	767
30 $\mu\text{m}$	8,2	99,68	331	191	752
40 $\mu\text{m}$	12,3	99,34	322	180	741
50 $\mu\text{m}$	50,0	98,94	311	172	732

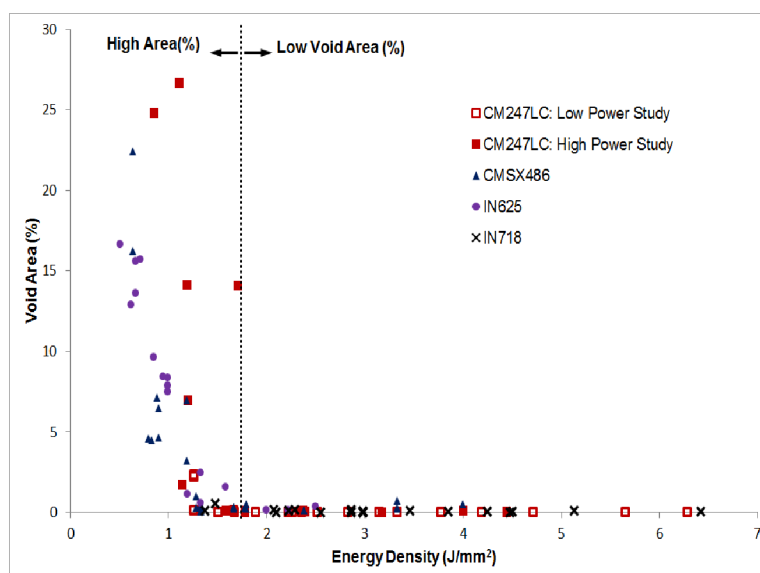
## 2.6 Vliv procesních parametrů na porozitu

Při optimalizaci zpracovatelnosti převislé struktury by měl být současně uvažován vliv podmínek laserové energie jak na kvalitu povrchu, tak na úroveň relativní hustoty materiálu. Při cyklickém zatížení působí podpovrchová porozita jako iniciátor trhlin, v jejichž důsledku se snižuje únavová pevnost. Při aplikování zatížení, kde se existence pórů nachází v podpovrchové oblasti, dochází k jejich šíření. Póry ovlivňují mechanickou integritu, zejména odolnost materiálu za cyklických zatěžujících podmínek. Kromě toho u pórů, obsahujících zachycený inertní plyn během výrobního procesu, dochází při vysokoteplotních aplikacích (např. lopatky plynových turbín) k tepelné roztažnosti plynu, což způsobuje vnitřní napětí podporující růst trhlin [27].

## 2.6.1 Optimální hustota laserové energie a stavěcí úhel

Oproti předchozí kapitole, kde byla hustota energie označena jako ne příliš výrazná pro změnu kvality povrchu, lze nyní určit hustotu energie jako nejdůležitější parametr ovlivňující pórovitost vyráběných dílů. V rámci niklových superslitin bylo provedeno již několik odborných výzkumů v rámci dosažení minimální pórovitosti.

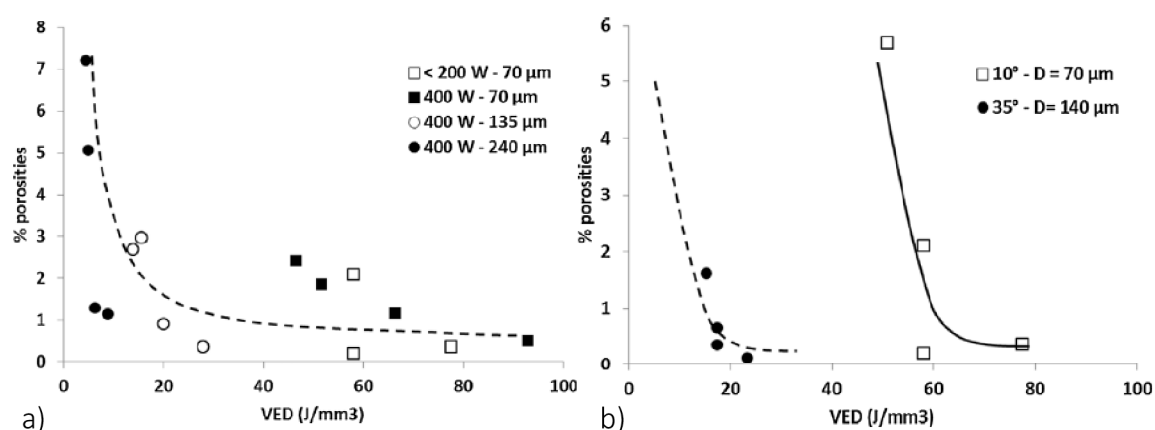
Carter provedl porovnávací studii [10] několika výzkumů závislosti hustoty laserové energie na porozitě niklových superslitin. Celkem bylo porováno pět materiálů s podobnými procesními parametry. Výkon laserového paprsku byl nastaven maximálně na 400 W a maximální skenovací rychlost na 7000 mm/s. Tloušťka vrstvy byla pro všechny vzorky stejná, a to 20  $\mu\text{m}$ . Samotný SLM proces byl proveden pro všechny materiály na stejném zařízení s argonem jako ochranným plynem.



Obr. 2-13 Závislost lineární hustoty laserové energie na porozitě [10]

Obr. 2-13 představuje závislost procentuálního množství porozity měřené v pěti rozdílných studiích na hustotě energie. Tečkovaná čára znázorňuje přibližnou hranici mezi oblastmi s vysokým a nízkým výskytem pórů. Tato hranice je přibližně  $1,7 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$  pro všechny zkoumané superslitiny niklu. S uvažováním tloušťky vrstvy je tato hodnota  $85 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$ . Všechny zkoumané slitiny vykazují stejný trend, kdy s rostoucí hustotou energie se snižuje procentuální složka pórovitosti, dokud není dosaženo prahové hodnoty hustoty energie. Prahovou hodnotou lze rozumět okamžik, kdy dochází k úplné konsolidaci. Ta je definována tak, že se v materiálu nevyskytují žádné velké dutiny, tj. SLM proces plně roztavil a ztuhlil prášek bez ohledu na další vady, které mohou být přítomny (například zbytkový plyn nebo mikrotrhliny). Díky této studii lze tvrdit, že hodnota této hranice je podobná pro všechny slitiny na bázi niklu, protože bez ohledu na konečné mechanické vlastnosti nebo použití mají Ni superslitiny podobný bod tání a měrnou absorpci laserové energie [10].

Spojností mezi pórovitostí a hustotou laserové energie u niklových super slitin, respektive materiálu IN625, se také zabýval Koutiri [23]. Hlavními parametry byla skenovací rychlost a průměr laserového paprsku. Podobně jako v předchozí kapitole, autor zkoumal vliv stavěcího úhlu na vzorcích o tloušťce 4 mm. Vzdálenost skenovacích stop byla nastavena na 140  $\mu\text{m}$  pro úhel 35° a 70  $\mu\text{m}$  pro 10°. Parametry kontury byly konstantní o výkonu 140 W a rychlosti 0,5 m/s. Byly měněny pouze parametry jádra za účelem změny hustoty energie. Aplikována byla skenovací strategie stripes. Rozsah výkonu se pohyboval od 175 do 200 W. Skenovací rychlost byla nastavena na 0,6 až 0,8 m/s. Sklon dílů měl jasný vliv na procentuální zastoupení pórů v materiálu. Větší stavěcí úhel zvyšuje průměrnou teplotu na spodní straně stěny v důsledku rostoucí tepelné koncentrace. To vysvětluje Obr. 2-14b, kde pro stavěcí úhel 35° dochází ke konsolidaci materiálu přibližně při dvakrát nižší hustotě laserové energie než u úhlu 10°. Nejmenší porozity (0,12 %) bylo dosaženo pro stavěcí úhel 35° s procesními parametry zobrazené v Tab. 2-3.

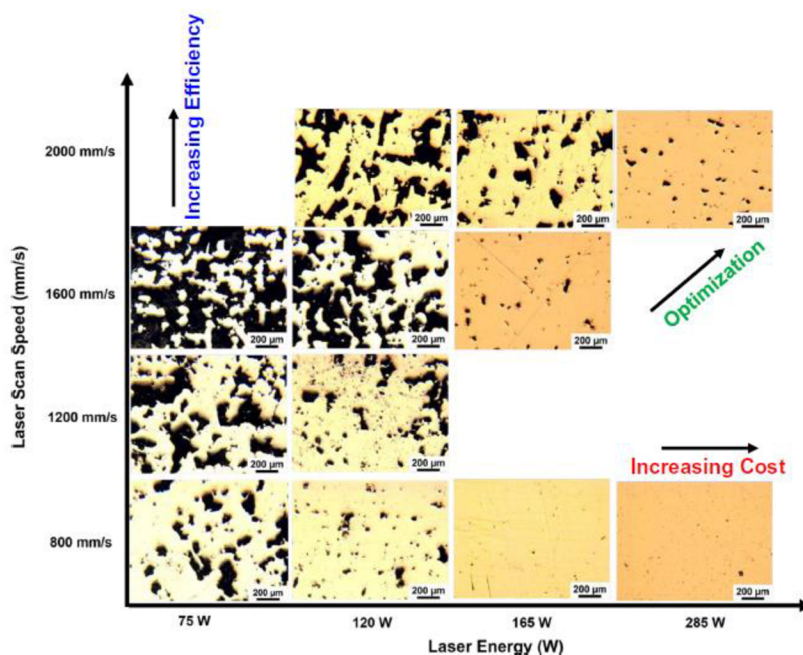


Obr. 2-14 a) závislost porozity na různých procesních parametrech; b) pro různé stavěcí úhly [23]

Jak již bylo zmíněno, vysoká hustota laserové energie způsobuje větší natavenou oblast, což přispívá k lepšímu protavení předchozích vrstev, a tím možnému roztavení mezivrstevní porozity. To je také znázorněno na Obr. 2-14a, kde křivka, udávající chování porozity se zvyšující se VED, prokládá naměřené hodnoty pro různé vzdálenosti skenovacích stop. V tomto měření byly vzorky pod nulovým úhlem řízeny konstantním výkonem 400 W. Parametry kontury byly konstantní pro všechny vzorky. Měnila se pouze skenovací rychlost od 1 do 2 m/s. Pro většinu parametrů vykazující porozitu menší než 0,5 % je prahová hodnota konsolidace materiálu v rozsahu 30 až 40  $\text{J}/\text{mm}^3$ . Autor udává, že vzdálenost skenovacích stop nemá výrazný vliv na porozitu materiálu. Zajímavým faktem je pórovitost v oblasti blízkosti povrchu vzorku, kde velikost pórů dosahuje až 200  $\mu\text{m}$ . Tyto defekty hrají hlavní roli v celkové porozitě vzorku. Lze to vysvětlit pomocí překrývání mezi dvěma strategiemi: i) konturou a ii) vnitřním šrafováním. K podobnému výsledku došel Moussaoui [4], který potvrdil, že zvýšením VED se dosáhne jemnější mikrostruktury s pevně vázanými dendrity. Nejmenší pórovitosti (0,4 %) bylo dosaženo u vzorku s hodnotou  $\text{VED} = 61,2 \text{ J}/\text{mm}^3$ .

Tab. 2-3 Použité procesní parametry s pórovitostí 0,12 %; tloušťka vrstvy 50  $\mu\text{m}$ ; stavěcí úhel 35°

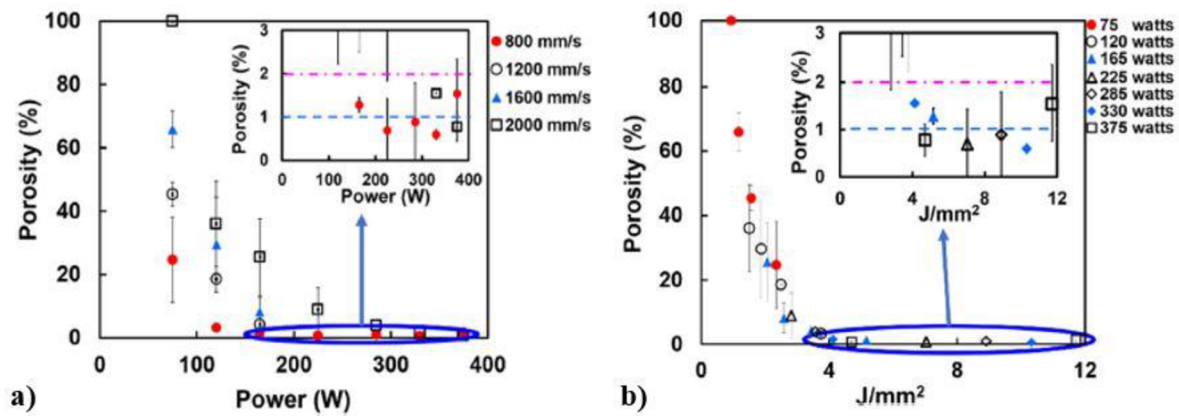
	Kontura	Jádro
$P$ (W)	140	200
$v$ (m/s)	0,5	0,6
$D$ ( $\mu\text{m}$ )	70	140



Obr. 2-15 Optické mikrografy porozity vzorků jako funkce výkonu a rychlosti [28]

Kumar [28] také zpracoval procesní parametry IN718 z hlediska porozity. První částí práce bylo stanovení charakteristických rozměrů tavné lázně pomocí návarové metody. Výkon laseru se pohyboval v rozsahu 75 až 300 W, skenovací rychlost byla nastavena na 800, 1500 a 2200 mm/s a tloušťka vrstvy byla konstantní o velikosti 40  $\mu\text{m}$ . Cílem bylo zjistit chování šířky tavné lázně, která je kritickým parametrem pro nastavení vzdálenosti skenovacích stop u tisku objemových dílů. Šířka i hloubka roztavené lázně vykazovala lineární nárůst s rostoucí hustotou energie v rozsahu 2 až 10  $\text{J}/\text{mm}^2$ .

Druhou částí byl tisk objemových vzorků tvaru krychle. Byla použita skenovací strategie meander s 90° mezivrstevní rotací. Rozměry tavné lázně vykazovaly menší rozměry při stejných parametrech než u návarové metody. Z Obr. 2-15 je očividné, že s rostoucí skenovací rychlostí roste výrobní efektivita, nicméně je limitována růstem vnitřních dutin při daném výkonu laseru. Naopak nízkou rychlostí lze získat lepší kvalitu, ačkoli s nárůstem výrobního času. Proto autor navrhl cestu optimalizace těchto dvou směrů.



Obr. 2-16 Porozita funkcí a) laserového výkonu; b) hustoty laserové energie; upraveno z [25]

Obr. 2-16a ukazuje nelineární chování porozity s rostoucím výkonem laseru. Nejmenšího množství porozity (<1 %) bylo dosaženo při skenovací rychlosti 800 mm/s a výkonu laseru větším než 165 W. U největší rychlosti 2000 mm/s byla tato hodnota dosažena při výkonu nad 330 W. Z Obr. 2-16b je patrné, že tyto parametry vyjádřené optimální hustotou laserové energie jsou v rozsahu 2,5 až 4 J/mm<sup>2</sup>.

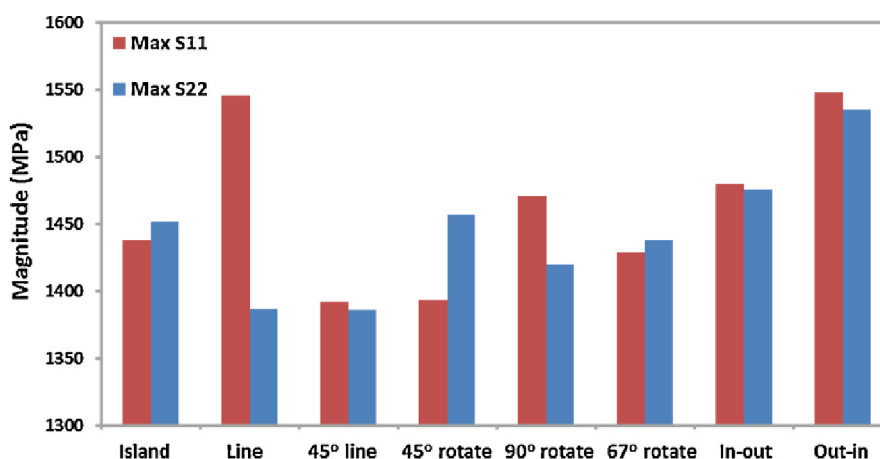
## 2.6.2 Zaostření laserového paprsku

Každé odladěné okno procesních parametrů jakéhokoli materiálu není vždy úplně stoprocentní. Stále se zde vyskytuje zbytková porozita, která je nezávislá na vedlejších procesních parametrech. Vyskytuje se v oblasti začátku a konce skenovací stopy nebo v místech hranic skenovacích strategií. Zejména pak v ostrovní strategii a strategii stripes. Parametrem, kterým lze ovlivnit zbytkovou porozitu, je zaostření laserového paprsku neboli „focus offset“. To znamená posunutí laseru v jeho ose dále od povrchu vrstvy za účelem zmenšení jeho bodu dopadu. Tím dojde ke zmenšení energie dodávané do prášku. Nastavení tohoto parametru je také integrováno ve skenovací funkci pod názvem „skywriting“. Ta umožňuje vypnout laserový paprsek během zrychlení a zpomalení laseru v oblasti změny jeho směru. Interakce laseru a prášku je tedy jiná než v případě konstantní skenovací rychlosti.

Redukcí zbytkové porozity pomocí této funkce se věnoval Mancisidor [29]. Porovnal objemové vzorky z IN718, vyrobené skenovací strategií stripes, pro různá nastavení laserového zaostření. Výkon laseru byl nastaven na 200 W a skenovací rychlost se pohybovala v rozsahu 600 až 1100 m/s. Bez použití zmíněných funkcí dosáhl porozity menší než 0,5 % pro hustotu energie od 55 do 90 J/mm<sup>3</sup>. Poté byla zapnuta funkce skywriting a měněn offset od 4 do 12 mm od povrchu vzorku. Nejmenší hodnoty porozity (0,05 %) bylo dosaženo pro offset 10 mm.

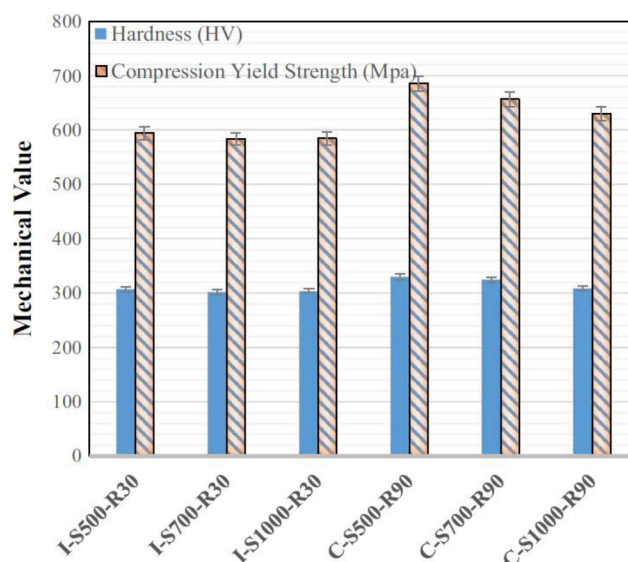
### 2.6.3 Vliv skenovací strategie na zbytkové napětí

Pro zjištění zbytkového napětí vzniklo několik výzkumů, kde bylo toto napětí měřeno jak experimentálně, tak pomocí numerických simulací. Výzkum, který prezentoval Cheng [11] byl věnovaný numerickému modelování. Porovnal typy skenovacích strategií vůči zbytkovému napětí v součásti z materiálu IN718. Celkem bylo porovnáno osm strategií, kde zbytkové napětí bylo stanoveno ve dvou směrech. Na Obr. 2-17 značí červený sloupec zbytkové napětí ve směru X, a modrý ve směru Y. Maximální redukce zbytkového napětí bylo dosaženo u skenovacího vzoru meander (popsaný jako 45° line), kde skenovací stopa byla nakloněna k ose X o 45°. Tato strategie neobsahuje mezivrstevní rotaci. Jelikož teplotní gradient se mění se skenovací strategií, lze očekávat poměrně jednotnější odchylku ve směru X a Y u této skenovací metody. Kromě toho autor udává, že může být napětí sníženo také zmenšením délky skenovacího vektoru.



Obr. 2-17 Zbytkové napětí pro různé skenovací strategie [26]

Skenovací strategie může také ovlivnit relativní hustotu materiálu a konečnou mikrostrukturu součástí. Tomu se věnoval Amirjan [30], který zjistil, že použitím šachovnicové strategie (5 x 5 mm) lze zvýšit hustotu materiálu IN718, oproti strategii meander s 90° rotací. Naopak vykazuje horší mechanické vlastnosti, jak ukazuje Obr. 2-18. To je pravděpodobně dáno již zmíněným zbytkovým napětím ostrovní strategie. Kontinuální strategií meander lze dosáhnout jemnější mikrostruktury vzorku. Ta obsahuje větší množství vytvrzujících fází. To potvrdil i Carter [31]. Porovnal stejné strategie, kde meander prokázal homogennější strukturu s většími pravidelnými dendrity. Ty vykazují nominální zarovnání se směrem stavby, a tím i lepší konečné vlastnosti materiálu.



**Obr. 2-18** Porovnání tvrdosti a meze pevnosti v tahu materiálu IN718 pro různé skenovací podmínky; (I = ostrovní strategie, C = meander strategie, S = skenovací rychlost, R = mezivrstevní rotace) [30]

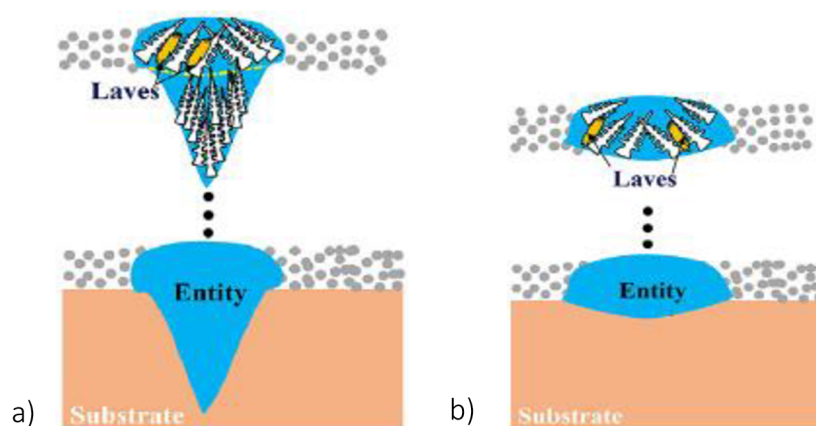
## 2.7 Zpracování tenkostěnných dílů

Další možnou geometrií součástí jsou tenkostěnné prvky. Tenkou stěnou lze rozumět stěnu od minimální možné tloušťky do 4 mm [32]. Součásti vykazující malou hmotnost jsou široce používané v oblasti letectví a elektrotechnických zařízeních. Typickým příkladem jsou výměníky, kde za účelem zvýšení rozvodu tepla je nutné zvětšit počet a velikost styčných povrchů v omezeném prostoru. Tudíž je stěna vyžadována co nejtenčí. Současně se předpokládá, že tenkostěnné prvky mají vysoké mechanické vlastnosti.

Tloušťka tenké stěny díky technologii SLM může dosáhnout několika desetin milimetru bez následného obrábění. Výrobní proces takovýchto geometrických prvků se nazývá „single wall“. Metoda je specifická v tom, že se laserový paprsek pohybuje pouze jednou skenovací stopou. Jelikož jsou obě strany stěny tvořeny práškem, jev přenosu tepla je značně odlišný od objemových dílů [32]. Tisk tenkých stěn souvisí s charakteristikami natavené oblasti, která mění svůj tvar v závislosti na tavicím režimu. Takovým režimem lze rozumět proces výroby jedné stopy, jejíž tvar tavné lázně lze měnit s procesními parametry. Každý tvar tavné lázně je rozdílný z hlediska krystalografické struktury [32]. Hlavními parametry jsou výkon laseru, skenovací rychlost a tloušťka vrstvy. Existují dva tavicí režimy „keyhole“ a „conduction“.



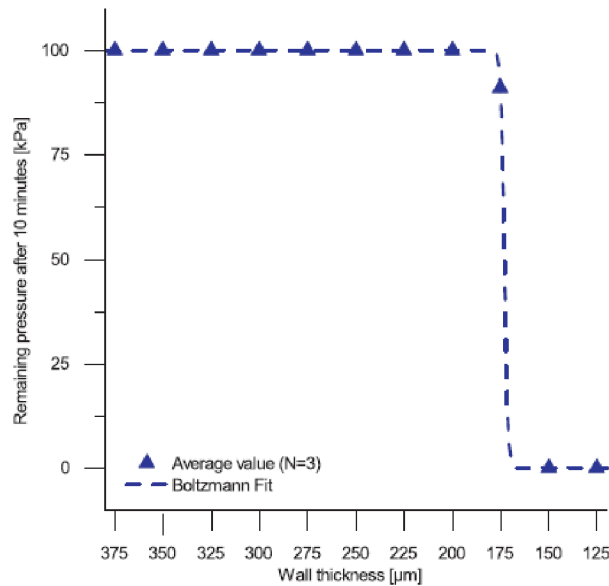
Je-li hustota energie vysoká, teplota uvnitř taveniny překročí bod varu, což vede k odpařování materiálu. V důsledku odpařování vzniká tlak a vytváří hlubokou dutinu tvaru klíčové dírky. Takovéto tavení je známé jako keyhole režim. Během tuhnutí může dojít ke vzniku nežádoucích pórů zachycením inertního plynu uvnitř dutiny. Jakmile se hustota energie snižuje, vzniká conduction režim. V případě příliš malé hustoty dochází ke ztrátě kontinuity a stěnu nelze vyrobit. Porovnáním dvou tavících režimů tenkostěnných dílů z materiálu IN718 se věnoval Yang [32]. Zjistil, že tenké stěny v keyhole režimu lze vyrobit v relativně širokém spektru procesních parametrů. Lze tedy říct, že tento režim je výhodnější z hlediska nastavení výrobního procesu. Vykazuje lépe orientované dendrity a větší množství precipitátů vytvrzujících fází (Obr. 2-19), čímž vzrůstá mikrotvrdość a samotná kvalita součásti v centrální oblasti tenké stěny.



Obr. 2-19 Tvorba vytvrzujících fází; a) keyhole režim; b) conduction režim; upraveno z [32]

Abele [33] analyzoval nejmenší tloušťku stěny s ohledem na její těsnost. Minimální tloušťka stěny byla testována za použití konstantních parametrů a dosahovala průměrných hodnot 125 až 375  $\mu\text{m}$ . Vzorky byly vyrobeny při výkonu laseru 195 W, skenovací rychlosti 1000 mm/s a tloušťkou vrstvy 20  $\mu\text{m}$ . Vyrobené stěny vykazovaly rozměrovou nepřesnost. Bylo to pravděpodobně dáno absencí contour strategie, kdy rostla tavná lázeň. Proto autor testoval parametr beam compensation za účelem dosažení přesné tloušťky stěny. Hodnota tohoto parametru vzrostla v průměru o 5  $\mu\text{m}$ .

Dále byly stěny podrobeny testu na propustnost, při kterém byl jako zkušební plyn použit vodík. Vzorek tenké stěny byl vyroben s pevným rámem. Test spočíval v umístění vzorků do plynové trubice a utěsnění pomocí O-kroužků z etylen-propylen-dienového kaučuku (EPDM) [33]. Byla použita metoda poklesu tlaku a metoda Sniffer dle normy DIN EN 1779. Zkouška byla nastavena na tlak 1 bar. Autor uvádí, že s tloušťkou stěny větší než 175  $\mu\text{m}$  lze dosáhnout těsnosti (Obr. 2-20).



Obr. 2-20 Tlakový test tenké stěny s rozdílnými tloušťkami [32]

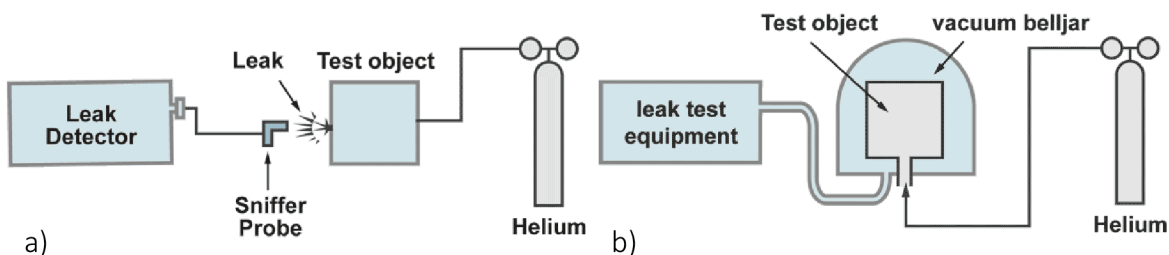
### 2.7.1 Návarové testy

Prvním krokem k optimalizaci tenkých stěn jsou testy kvality samotných návarů. Ty se liší pro každý materiál, jelikož charakteristické vlastnosti materiálu, jako je teplota tavení nebo jeho hustota, mají zásadní vliv na tvorbu rozměrů tavné oblasti. Experimentům návarů z IN718 se věnoval Balbaa [13]. Hodnotil rozměry natavené oblasti z hlediska míry provaření, resp. keyhole režimu a diskontinuity návaru. Pro testování použil kombinace parametrů výkonu laseru v rozmezí 120 až 370 W a skenovací rychlosti 400 až 1200 m/s. Tloušťka vrstvy byla nastavena na 40 µm. Nejstabilnějšího návaru s optimální geometrií bylo dosaženo v následujících kombinacích: i)  $P = 170$  W,  $v = 0,6$  m/s, a ii)  $P = 220$  W,  $v = 0,8$  m/s.

## 2.8 Měřicí metody těsnosti součástí

Netěsnost, resp. propustnost je definována jako nežádoucí vlastnost, která může vzniknout vlivem prasklin, pórovitostí nebo špatným utěsněním spojů. Zkoušky těsnosti představují kontrolu kvality součásti nebo zařízení za účelem integrity výrobního procesu. Existuje mnoho metod testování těsnosti, které se odvíjejí od velmi jednoduchých principů až po systémy komplexní využívající značkovací plyn. Liší se hlavně z hlediska citlivosti.

Nejčastěji se těsnost, resp. únik plynu ze součásti měří pomocí rozdílu tlaku. Nejjednodušší metodou je tzv. bublinková metoda. Zkušební objekt je naplněn zkušebním plynem na přetlak a poté ponořen do kapaliny. Plyn unikající ze součásti vytvoří bubliny. Výhodou této metody je její jednoduchost a nízké náklady na její realizaci. Nevýhodou je možné zablokování úniku v důsledku kapilárních sil, a hlavně časová náročnost z pohledu obsluhy. Natlakovaná součást se také může pod vysokým tlakem roztrhnout. Možnou další variantou této metody je přetlak pomocí vakua. Na povrch stěny je pak nanesen pěnotvorný roztok, který po vytvoření vakua zviditelní případnou netěsnost [34].



Obr. 2-21 Měření těsnosti; a) Sniffer metoda; b) metoda vnitřního tlaku [35]

Metoda poklesu tlaku se zakládá na principu natlakování uzavřené součásti stlačeným vzduchem. Poté je prvek izolován od přívodu tlaku a po stabilizačním období je jeho vnitřní tlak monitorován v průběhu času. Nevýhodou je, že tato metoda indukuje pouze velikost úniku, nikoli místo úniku. Konstrukčně nejjednodušší metodou měření těsnosti je Snifferova metoda (Obr. 2-21a). Z venku je ručně pomocí detektoru úniku hledána netěsnost v podobě unikajícího plynu. Jedná se o levnější variantu ve srovnání se spektrometrickými zařízeními [34]. Přesnější metodou je metoda vnitřního tlaku (Obr. 2-21b), kdy je objekt naplněn heliem a vložen do vakuové komory. V té je pomocí detektoru helia měřena případná netěsnost. Použití helia jako sensorového plynu je z důvodu, že se jedná o plyn, který se běžně nevyskytuje ve vzduchu. Má velmi malé atomy ve srovnání s jinými plyny. Takže i při malém množství v okamžiku testování projde všemi možnými prasklinami.

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Výrobci prášku dodávají se zakoupeným materiálem určité okno procesních parametrů především pro objemové díly. V kapitole současného stavu poznání bylo rozebráno víceméně zpracování niklových superslitin jako objemových dílů a převislých prvků. Tisk šikmých stěn bez využití podpůrných struktur bude stěžejní oblastí, jelikož zde dochází k rozměrovým nepřesnostem způsobeným tvorbou strusky, taktéž ovlivňující drsnost povrchu spodních ploch. Dále pak zpracování tenkostěnných prvků je z tepelného hlediska výrazně odlišné od zpracování objemových dílů. Použití konstantních parametrů v průběhu výrobního procesu nedokáže zajistit kvalitu celé součásti. Pro tenkostěnné aplikace není vždy možné použít stejné parametry jako pro objemové díly. V případě tenkých stěn materiálu IN718 existuje pouze pár publikací, ale žádná neobsahuje popis metodiky výroby a postupu odladění tavného procesu. V této části se objevuje hlavní problematika této práce. Je tedy nutné provést výzkum optimalizace procesu spočívající v kompromisu mezi optimální hustotou materiálu a drsností povrchu součástí tvořenými objemovou a tenkostěnnou geometrií.

Základní úlohu výroby objemových dílů sehrává dvojice hlavních parametrů: i) výkon laseru; a ii) rychlost skenování. Z hlediska porozity není tloušťka vrstvy důležitá. Zvyšováním výkonu laseru nebo snižováním rychlosti skenování dochází ke zvětšení šířky roztavené oblasti, a tím i šířce stopy. Ta se zvyšuje lineárně se zvyšujícím se vstupem laserové energie. Tenkostěnné díly jsou ovlivněny i tloušťkou vrstvy, zejména pak ultra tenké stěny s co nejmenší šířkou. Optimální okno procesních parametrů se tedy liší pro komponenty s různými geometriemi. Je potřeba najít jejich průnik, aby bylo možné vyrobit součást obsahující obě varianty.

## 3.2 Analýza a zhodnocení řešerše

Důležitou roli bude hrát kvalita povrchu, která spolu s mikrostrukturou a vnitřními defekty ovlivňuje výslednou pevnost materiálu. Drsnost povrchu je požadována co nejmenší, zatímco ideální hustota materiálu by měla dosahovat 100% hranice. Moussaoui [4] označil použití *VED* jako ne úplně zdařilé pro ovlivnění povrchové kvality součásti. Naopak Koutiri uvádí mírné zlepšení kvality povrchu s rostoucím *VED*. Také uvádí, že vzdálenost skenovacích stop nemá výrazný vliv na drsnost povrchu, ačkoli menším průměrem laserového paprsku 70  $\mu\text{m}$  lze získat menší drsnost oproti větším průměrům. Drsnost horního povrchu byla označena jako silně závislá na skenovací rychlosti, zatímco tisk převislých prvků závisí především na výkonu laseru. V případě příliš velkého výkonu v kombinaci s velkým stavěcím úhlem dojde k lepení okolních částic na převislý povrch, a tím roste drsnost. V Tab. 3-1 jsou porovnány parametry pro různé stavěcí úhly. Drsnosti spodních převislých ploch se pohybují od 5 do 8  $\mu\text{m}$ . Vzorky se liší svými parametry, ačkoli mají jedno společné, a to je hustota laserové energie. Ta je téměř podobná pro všechny úhly. Hodnotu 50 až 60  $\text{J}/\text{mm}^3$  lze označit jako optimální pro tisk šikmých prvků z hlediska drsnosti povrchu.

Tab. 3-1 Objemové převislé vzorky (spodní povrch)

	<i>P</i> (W)	<i>v</i> (m/s)	<i>t</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>H</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>VED</i> ( $\text{J}/\text{mm}^3$ )	<i>Sa</i> ( $\mu\text{m}$ )	úhel ( $^\circ$ )
Koutiri	180	0,5	50	120	60	6	10
Covarrubias	285	0,96	40	140	52	5,5	15
Koutiri	140	0,5	50	120	60	6	35
Covarrubias	285	0,96	40	140	52	8	40

Koutiri [23] přišel k závěru, že sklon dílů má jasný vliv na procentuální zastoupení pórů v materiálu. Větší stavěcí úhel zvyšuje průměrnou teplotu na spodní straně stěny v důsledku rostoucí tepelné koncentrace. Z jeho práce je důležité poznamenat, že se stoupajícím úhlem se snižuje prahová hodnota úplné konsolidace materiálu, což znamená výskyt minimálního množství defektů. Nejmenší porozity (0,12 %) bylo dosaženo u stavebního úhlu 35° s procesními parametry o výkonu laseru 200 W a rychlosti skenování 0,6 m/s.

Tabulka níže obsahuje souhrn studií s nejmenší dosaženou drsností horního povrchu vzorků. Nguyen [26] potvrdil, že tloušťka vrstvy je důležitým parametrem. Čím menší je tloušťka vrstvy, tím lze dosáhnout lepšího povrchu součásti. To potvrdil také Campbell [24]. Naopak na porozitu materiálu nemá tloušťka vrstvy výrazný vliv. Moussaoui [4] vyslovil závěr, že drsnost horního povrchu vzorku je silně závislá na skenovací rychlosti. Zvyšováním rychlosti a výkonu vzniká větší drsnost, zatímco nižší rychlostí lze dosáhnout lepší kvality povrchu. Skenovací strategie je důležitá spíše z hlediska porozity.

**Tab. 3-2** Objemové vzorky - drsnost horního povrchu

	<i>P</i> (W)	<i>v</i> (m/s)	<i>t</i> (μm)	<i>H</i> (μm)	<i>VED</i> (J/mm <sup>3</sup> )	<i>Sa</i> (μm)	strategie
Covarrubias	285	0,96	40	120	60	4,8	meander
Koutiri	140-180	0,5	-	70	-	6-11	stripes
Moussaoui	280	1,0	-	-	-	6,7	meander
Nguyen	285	2,5	20	50	114	5,1	hexagonal
Nguyen	285	2,5	40	50	76	8,2	hexagonal

Hustotu laserové energie lze považovat jako nejdůležitější parametr ovlivňující pórovitost vyráběných dílů. Vysoká hustota způsobuje větší roztavenou oblast, a tím dochází k lepšímu protavení mezivrstevní porozity. Carter [7] stanovil průměrnou optimální hustotu laserové energie u niklových superslitin na hodnotu 85 J/mm<sup>3</sup>. Kumar [28] zjistil, že minimalizování porozity nelineárně klesá s rostoucím výkonem laseru. Zároveň při použití menší skenovací rychlosti lze dosáhnout lepší kvality součástí. Nejmenší dosažené porozity objemových vzorků jsou zobrazeny v Tab. 3-3. Nejpoužívanější skenovací strategií je strategie meander, která se většinou používá pro tisk vzorků a tenkých dílů [12]. Koutiri [23] stanovil prahovou hodnotu konsolidace materiálu v rozsahu 30 až 40 J/mm<sup>3</sup>. Při těchto hodnotách lze dosáhnout hustoty materiálu větší než 99,5 %. Kumar [28] zjistil, že porozity menší než 1 % lze dosáhnout v rozsahu výkonu laseru od 165 do 350 W pro skenovací rychlost 0,8 m/s. Na druhou stranu je to možné i při vysoké rychlosti 2,5 m/s, ale na úkor velikosti rozsahu výkonu. Pro následující práci bude použit rozsah parametrů o výkonu 100 až 400 W a rychlosti skenování 0,5 až 1,5 m/s. Parametry budou použity zejména jako širší výběr pro návarové testy, kde dojde k jejich ověření a následnému zúžení.

**Tab. 3-3** Objemové vzorky – porozita

	<i>P</i> (W)	<i>v</i> (m/s)	<i>t</i> (μm)	<i>H</i> (μm)	<i>VED</i> (J/mm <sup>3</sup> )	hustota (%)	strategie
Kumar	330	2	40	-	-	> 99	meander
Kumar	> 165	0,8	40	-	> 100	> 99	meander
Moussaoui	150-450	-	-	50-90	61,2	99,6	meander
Koutiri	400	1	50	160	19,9	99,64	stripes
Amirja	170	0,5	30	80	-	99,9	island
Nguyen	285	2,5	20	50	114	99,98	hexagonal
Nguyen	285	2,5	40	50	57	99,34	hexagonal
Mancisidor	200	0,6-1,1	-	-	55-90	99,95	stripes

Cílem návarových testů bude také ověřit výsledek studie od Balbaa [13]. Ten provedl detailnější výzkum a dosáhl nejstabilnějších návarů s optimální geometrií v kombinacích: i)  $P = 170 \text{ W}$ ,  $v = 0,6 \text{ m/s}$ , a ii)  $P = 220 \text{ W}$ ,  $v = 0,8 \text{ m/s}$ . Ty byly stanoveny na základě procesní mapy, kde působily na hranici mezi keyhole režimem a nekontinuitou návaru.

Jak uvedl Yang [32], průměrná tloušťka stěny u single wall metody se pohybuje v rozsahu 0,15 až 0,2 mm pro všechny zkoumané parametry s tloušťkou vrstvy 40  $\mu\text{m}$ . Zkoumal vyrobiteľnosť tenkých stěn z hlediska tvaru tavícího režimu. Určil keyhole režim jako vyrobiteľnější v širokém spektru procesních parametrů a přínosnější z hlediska mikrostruktury, kdy roste mikrotvrdość.

V první řadě bude potřeba zjistit, jestli je možné tloušťku stěny 0,2 mm opravdu vyrobit a v jaké kvalitě. Výsledná šířka stěny nemusí vždy odpovídat přesným navrženým rozměrům. Abele [33] udává, že navýšením hodnoty parametru beam compensation v průměru o 5  $\mu\text{m}$  se dosáhne přesnějších hodnot. Velkou roli v rozměrové přesnosti bude hrát drsnost povrchu. Ta ovlivňuje přenos tepla a pokles tlaku u tepelných výměníků, které jsou z větší části vyráběny právě tenkými stěnami. Složitě geometrie a vnitřní kanály konformních tepelných výměníků vyžadují, aby se tyto velmi tenké části tiskly bez podpůrných struktur, protože neexistuje přístup k jejich fyzickému odstranění. Proto bude důležité optimalizovat procesní parametry bez využití podpůrných struktur tak, aby byla drsnost co nejmenší. Dále je potřeba zmínit, že tenké stěny výměníků ve vysokoteplotních aplikacích jsou vystaveny vysokému provoznímu tlaku až 50 bar [36]. Proto je nutné kontrolovat jejich těsnost. Abele [33] také zjistil, že při tlaku 1 bar je možné těsnosti dosáhnout s minimální tloušťkou stěny 0,175 mm. Pro větší tlaky neexistují žádné jiné studie, tudíž je nutné provést experimentální výzkum objasňující těsnost tenkostěnných dílů s ohledem na jejich tloušťku.

Měření těsnosti vzorků lze provést například pomocí přetlakové metody. Využívá vakuové komory, do které se vloží součást naplněná heliem a měří se pokles tlaku. V opačném případě se měří únik plynu pomocí ruční sondy. Nejjednodušší je ale využití vzduchu. Z časového hlediska je to jistě zdlouhavější proces než u předešlého plynu, a to díky velikosti jeho atomů, které musí projít i těmi nejmenšími defekty. Z druhého úhlu pohledu je tato varianta cenově nenáročná a stojí za otestování. Složitost vyrábět uzavřenou součást kvůli testování pouze jedné stěny usměrnila primární cíl na návrh zařízení s požadavkem testování samostatných vzorků tenkých stěn. Bohužel nebylo možné nalézt žádné existující zařízení. Většinou se testují celé součásti nebo sestavy. Proto bude navržen koncept zařízení na měření vzorků tenkých stěn a následně realizován. Vzorek bude uložen do tlakové komory, která bude natlakována na tlak 10 bar. Celé zařízení se vloží do nádrže s vodou a bude sledován únik tlaku pomocí unikajících bublin.

### 3.3 Cíle diplomové práce

Cílem práce je výzkum a vývoj nových procesních parametrů (dále jen PP) s ohledem na drsnost povrchu a relativní hustotu materiálu. V rámci práce jsou zkoumány PP geometrických prvků tenkostěnných dílů z materiálu Inconel 718, jako jsou: i) tenké stěny, a ii) objemové prvky. Podmínkou je dosažení co nejtenčí stěny s co nejmenší drsností povrchu, a následné využití PP pro objemové díly, kde je požadována hustota větší než 99 % a opět nejmenší drsnost bez tepelné úpravy. Testována bude i výroba šikmých stěn, které budou vyráběny bez podpůrných struktur.

Díličními cíli práce jsou experimentální stanovení optimálních PP pro zpracování jednotlivých geometrií a následně hledání průniku parametrů pro tisk dílů kombinující obě varianty. Dále pak vytvoření a realizace konceptu zařízení pro testování těsnosti tenkostěnných vzorků. Požadavkem zařízení je dosažení testovacího tlaku 10 bar. Ověření získaných PP bude provedeno na testovacím dílu.

Pro splnění dílčích cílů je potřeba ověřit chování rozměrů tavné lázně pro různé PP a získané poznatky využít pro vytvoření optimálních parametrů tenkých stěn.



### 3.4 Vědecké otázky a hypotézy

V literatuře technologie selektivního laserového tavení se nevyskytuje procesní nastavení materiálu Inconel 718 pro tenkostěnné díly. Většina studií se zabývá objemovými díly, ale žádná se nevěnuje kombinaci tenkostěnné a objemové geometrie. Výrobce prášku neudává vhodné nastavení, proto je potřeba procesní parametry upravit tak, aby byly tenké stěny či kanály vyrobitelné.

Pro nalezení vhodné kombinace parametrů určených pro výrobu komplexních tenkostěnných dílů a pro jejich využití v oblasti výroby tepelných výměníků byly zformulovány vědecké otázky a hypotézy k ověření.

V literatuře [33] je uvedeno, že je možné vyrobit tenkou stěnu o nejmenší tloušťce 0,2 mm. Dále firma EOS udává, že je možné ji vyrobit o minimální šířce 0,3 až 0,4 mm. Ovšem není uvedeno, jak velkými defekty je stěna ovlivněna. Proto je nutné ověřit jaké nejmenší tloušťky bez defektů je možné dosáhnout.

*Vědecká otázka 1:*

- Jakým způsobem lze dosáhnout výroby co nejtenčí stěny?

*Hypotéza 1:*

Použitím parametru focus offset, resp. změnou velikosti laserového bodu, je možné dosáhnout menší tloušťky stěny se stejnou nebo dokonce lepší kvalitou povrchu než u nulové hodnoty zaostření.

Kvalita tenké stěny je závislá na rozměrech natavené oblasti jednotlivých skenovacích stop a vzájemného protavení spodní vrstvy. Výběrem vhodných parametrů a aplikováním parametru focus offset zůstane kvalita stěny podobná, ovšem s menší tloušťkou.

*Vědecká otázka 2:*

- Jaké parametry by mohly tvořit průnik tenkostěnné a objemové geometrie?

Výrobní proces tenkých stěn se výrazně liší od objemových dílů, a to převážně z tepelného hlediska. Odvod tepla do prášku je odlišný od vedení do již ztuhlé části kovu. Ovšem objemové prvky lze optimalizovat skupinou parametrů kontury, kdy krajní stopy lze vyrobit jinými parametry než samotné jádro.

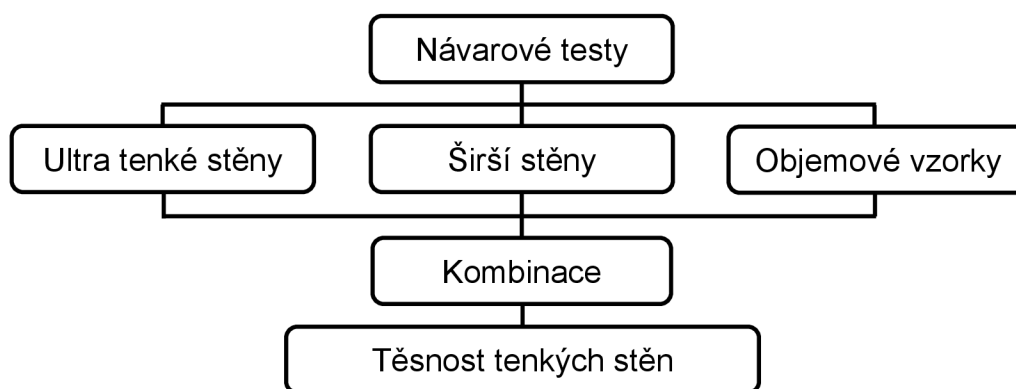
*Hypotéza 2:*

Použití PP tenkých stěn právě na oblast kontury by mohlo být efektivní z hlediska optimálních rozměrů návaru a jejich vrstvení v oblasti bočního povrchu.

## 4 MATERIÁL A METODY

V této kapitole je uveden způsob řešení a technologie, které byly použity při řešení diplomové práce. Také jsou zde popsány experimenty, které byly navrženy s ohledem na informace získané ze současného stavu poznání a problémy vyskytlé během řešení. Dále je zde popsán koncept zařízení na testování těsnosti, který bude při řešení práce použit.

### 4.1 Postup řešení



Obr. 4-1 Schéma experimentálního cyklu

Postup řešení diplomové práce lze rozdělit na 5 hlavních částí (Obr. 4-1). První byla zaměřena na návarové testy, kde byly testovány parametry výkonu laseru a skenovací rychlosti získané z analýzy současného stavu poznání. Jednotlivé hodnocení návarů proběhlo z hlediska kontinuity s měřením jejich šířky z horního pohledu. Dále došlo k rozřezání, vybroušení, a pomocí optického mikroskopu se zkoumal jejich tvar a rozměry. Výsledkem bylo ověření chování geometrie návaru s rozdílnou hustotou laserové energie a následné rozdělení do několika kategorií podle kritérií výroby technologií SLM. Tyto poznatky bylo možné využít při návrhu parametrů následujících testů tenkých stěn.

Další etapou jsou testy tenkých stěn. Ty byly tvořeny z počátku jedním návarem vrstvicím se na sebe a poté i většími šířkami. Analýza TS spočívala v měření šířky stěny a drsnosti povrchu. Drsnost byla posuzována využitím optického mikroskopu. Vstupní procesní parametry byly zvoleny s ohledem na výsledky návarových testů a jejich optimalizací byla hledána kombinace pro výrobu stěny o nejmenší možné šířce bez defektů. Stěny by měli mít homogenní strukturu, resp. by měli vykazovat vhodné vrstvení samotných návarů na sebe, čímž nedochází k přerušení stěny. Specifickým experimentem byla výroba stěn se změnou laserového zaostření. Tato část práce směřuje na hypotézu č. 1. Tím by mohlo být dosaženo ještě menší tloušťky stěny.

Složité geometrie a vnitřní kanály tepelných výměníků vyžadují, aby se tyto velmi tenké části tiskly bez podpůrných struktur, protože nelze aplikovat fyzické odstranění. Proto je potřeba zvolit procesní parametry bez využití podpůrných struktur tak, aby bylo možné stěnu vyrobit s co nejmenší drsností. V této části byly stěny vyrobeny pod úhlem 45° bez podpůrných struktur s využitím získaných parametrů z testu kolmých stěn. Na spodním povrchu se očekávala vyšší drsnost v porovnání s kolmými stěnami. Pozornost byla opět věnována měření tloušťky stěn. Cílem bylo zjistit, zda je možné získanými parametry stěnu pod úhlem postavit a s jakou kvalitou. Výsledkem je společná kombinace parametrů použitelná pro kolmé i šikmé stěny.

Speciálním experimentem je test stěn o šířce 0,5, 1 a 2 mm. Vzorky byly postaveny kolmo k platformě, ale i pod úhlem jako v předchozím testu. Důvodem je ověření možného využití parametrů TS získaných z předchozích testů, zejména na oblast kontury což vede k hypotéze č. 2. Posuzovala se opět drsnost povrchu a nově také porozita. K tomu bylo využito metody metalografického výbrusu, kde je proveden řez vzorkem, následné broušení a vyhodnocení opět optickým mikroskopem.

Poté byly provedeny testy objemových vzorků. Hlavním úkonem bylo ověření parametrů od dodavatele SLM Solutions a porovnání se vzorky, na které byly aplikovány PP z předchozího experimentu. Snahou bylo dosáhnout, co nejlepší struktury a kvality povrchu s možnými společnými parametry tenkostěnné a objemové geometrie. Posuzovala se drsnost horního i bočního povrchu a relativní hustota materiálu. Cílem bylo zjistit, zda je možné použít parametry souboru obrysových kontur TS i pro objemové díly. K tomu se také váže vyslovená hypotéza č. 2.

Výsledkem celého výzkumu je možná existence průniku parametrů, zejména hlavních parametrů jako je výkon laseru a rychlost skenování, pro rozdílné geometrie jako jsou: i) tenké stěny; a ii) objemové díly. Jestliže existuje, bude možné ho aplikovat na díl kombinující obě geometrie. V opačném případě je variantou CAD model virtuálně rozdělit na separátní modely tenkých stěn a objemových prvků a těm přiřadit rozdílné materiálové soubory.

Jak již bylo řečeno v analýze práce, tenké stěny je potřeba zkontrolovat z hlediska těsnosti. Proto poslední etapa byla zaměřena na výrobu vzorků tvořených tenkou stěnou a následným měřením těsnosti. K tomu bylo použito navržené a zrealizované tlakové zařízení využívající tlakového kompresoru. Došlo k měření poklesu tlaku v tlakové komoře způsobeným únikem plynu skrz defekty ve vzorku. Cílem bylo zjistit, jestli jsou zvolené PP vhodné pro aplikace TS vystaveným přetlakům. To by mohlo přinést výhodné poznatky při návrhu tepelného výměníku. Po úspěšných testech těsnosti byly dále PP ověřeny na reálné součásti.

## 4.2 Prášek Inconel 718

Použitým práškem je IN718 od firmy *Carpenter Additive* s označením CT 718-AGEA. Prášek má velice vysokou kvalitu sférických částic. Výrobce udává velikost částic v rozmezí 15-53  $\mu\text{m}$ .

## 4.3 Použité zařízení a postupy

### 4.3.1 SLM 280 HL

Experimenty probíhaly na stroji pro aditivní výrobu s označením SLM 280<sup>HL</sup> od firmy SLM Solution GmbH. Zařízení disponuje pracovní oblastí o rozměrech 280 x 280 x 350 mm. Součásti lze tisknout i na menší stavební plochu o velikosti 100 x 100 mm, kterou lze aplikovat pomocí redukčního rámečku. Stavební komora je naplněna inertním plynem argonem nebo dusíkem. Ve výrobní komoře je nainstalován samostatný vláknový laser o maximálním výkonu 400 W. Detailní parametry zařízení jsou v Tab. 4-1. Pro přípravu dat k tisku byl použit software Materialise Magics s doplňkem Materialise Build Processor 3.0 sloužícím k úpravě procesních parametrů a generování SLM souboru.



Obr. 4-2 Zařízení SLM 280<sup>HL</sup> [37]

### 4.3.2 KEYENCE VHX-6000

Digitální optický mikroskop KEYENCE VHX-6000 s optikou VH-Z250R umožňuje přiblížení 250 x až 2500 x. Jeho předností je široké spektrum funkcí a možností měření jak materiálových vlastností, tak vlastností materiálu.

Tab. 4-1 Výrobní parametry stroje SLM 280 HL [37]

Stavěcí prostor	(mm)	280 x 280 x 350 (X,Y,Z)
Výkon laseru	(W)	400
Max. skenovací rychlost	(m/s)	15
Průměr laserového paprsku	μm	80 - 115
Tloušťka vrstvy	μm	20 - 100
Produktivita	cm <sup>3</sup> /h	20
Hmotnost	kg	1000

### 4.3.3 SAPHIR 250 A2-ECO

Metalografická leštička SAPHIR 250 A2-ECO je dvoukotoučová bruska a leštička s pracovními disky o průměru 250 mm. Zařízení je možné využít pro ruční broušení i automatický režim. Při leštění je využíváno dávkovací jednotky pro přesné dávkování leštící pasty.

## 4.4 Návarové testy

Návarový test je počáteční experiment výzkumu parametrů jakéhokoli materiálu. Probíhá s konstantní tloušťkou nanesené vrstvy. Na základně literatury byl původní rozsah hodnot výkonu laseru a skenovací rychlosti stanoven na 100 až 400 W a 0,5 až 2 m/s. Cílem bylo stanovit procesní mapu kvality návaru se všemi možnými kombinacemi. Vzhledem k velkému počtu vzorků došlo ke zúžení nevhodné kombinace vykazující nedostačující nebo příliš vysokou hodnotu energie laseru. To vystihuje mapa procesních parametrů na Obr. 4-3.

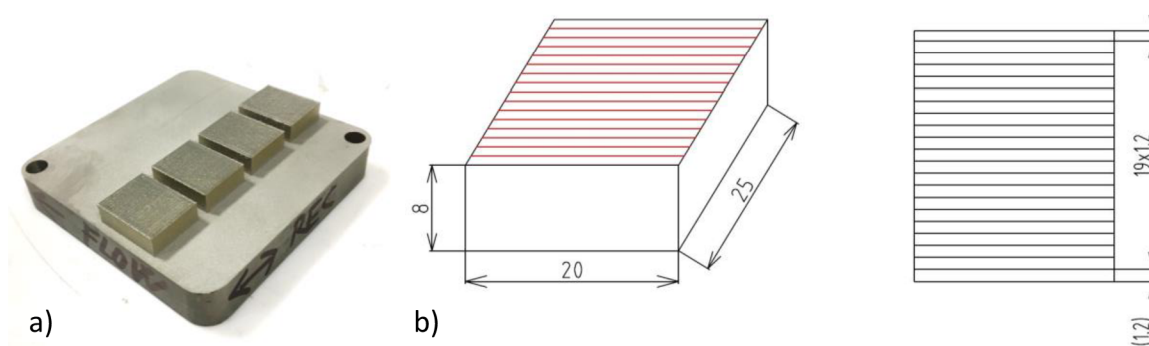
E [J/mm <sup>2</sup> ]	v [mm/s]																
	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
P [W]	100	4,0	3,3	2,9	2,5	2,2	2,0	1,8	1,7	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	
	150	6,0	5,0	4,3	3,8	3,3	3,0	2,7	2,5	2,3	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5
	200	8,0	6,7	5,7	5,0	4,4	4,0	3,6	3,3	3,1	2,9	2,7	2,5	2,4	2,2	2,1	2,0
	250	10,0	8,3	7,1	6,3	5,6	5,0	4,5	4,2	3,8	3,6	3,3	3,1	2,9	2,8	2,6	2,5
	300	12,0	10,0	8,6	7,5	6,7	6,0	5,5	5,0	4,6	4,3	4,0	3,8	3,5	3,3	3,2	3,0
	350	14,0	11,7	10,0	8,8	7,8	7,0	6,4	5,8	5,4	5,0	4,7	4,4	4,1	3,9	3,7	3,5
	400	16,0	13,3	11,4	10,0	8,9	8,0	7,3	6,7	6,2	5,7	5,3	5,0	4,7	4,4	4,2	4,0

Oblast 1  
 Oblast 2  
 Oblast 3  
 zvolené parametry

Obr. 4-3 Mapa vybraných procesních parametrů pro návarové testy

**Oblast 1** [13] se vyznačuje příliš velkou skenovací rychlostí. Hodnota energie se v tomto případě pohybuje do  $3 \text{ J/mm}^2$ , což způsobuje nekontinuitu návaru. **Oblast 2** je podle studie Balbaa [13] naopak oblast s příliš velkou hustotou energie. Jedná se o oblast malých rychlostí s výkony nad 250 W. Dochází zde ke značnému provaření, a tím tvorbě defektů v podobě keyhole porozity. **Oblast 3** [32] je nevhodná z hlediska tvorby trhlin u tenkých stěn. Velkou roli hraje poměr hloubky průvaru k šířce návaru, který v souladu s nedostatečným chlazením natavené oblasti může zapříčinit nedokonalé provaření a tvorbu oddělených částic kovu. To je dáno právě velkou skenovací rychlostí. Ovšem není vyloučeno, že tyto parametry jsou taktéž nevhodné pro výrobu objemových dílů. Podle Kumara [28] je možné optimalizovat výrobu právě pro vysoké rychlosti a docílit minimální porozity. Proto byla tato oblast zahrnuta do testovaných parametrů návarů. Oblasti 1 až 3 byly tedy předem zamítnuty, čímž došlo ke zúžení rozsahu parametrů. Celkem bylo v první testovací sadě vyrobeno 70 kombinací procesních parametrů.

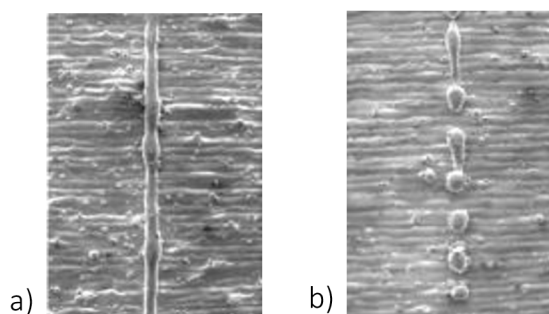
Používaný software Magics neumožňuje pohyb laseru pouze v jedné skenovací stopě. Umožňuje pouze tzv. remelting, kdy laser projede skenovací stopu dvakrát (tam a zpátky) v každé vrstvě. To ovšem ovlivní již jednou nanesenou stopu opětovným protavením. V tomto případě je možné nastavit odsazení kontury směrem ke středu vzorku a vypnutí jednoho přejezdu. Variantou je použití metody jednoho návaru tvaru obdélníku, kdy je vnitřní šrafování vypnuto, tudíž zůstane jen kontura s prázdnou vnitřní výplní. To znamená dva stejné návary pro každou kombinaci parametrů. Navíc je získáno dvojnásobného množství statistických dat. Z důvodu analýzy samostatných návarů bez opětovného natavení byla zvolena varianta obdélníku. Jednotlivé návary byly umístěny na podstavu o výšce 8 mm (Obr. 4-4b). Podstava byla vyrobena základními parametry uváděnými dodavatelem. Výkon laseru byl nastaven na 275 W a rychlost skenování na 760 mm/s. Vzdálenost skenovacích šraf byla  $120 \mu\text{m}$ . Z důvodu budoucího testování parametrů od výrobce v oblasti objemových vzorků, byla také vyhodnocena porozita podstav a následně využita v kap. 5.4.



**Obr. 4-4** a) Rozložení vzorků na platformě; b) Rozložení 20 návarů na jednom vzorku (10 kombinací parametrů)

#### 4.4.1 Kontinuita návaru

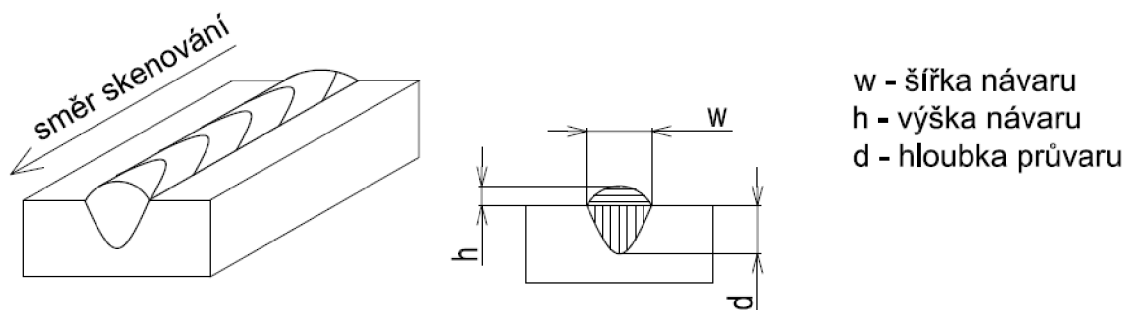
Prvním vyhodnocením návarů je vizuální hodnocení kontinuity stopy po celé její délce. Ta je důležitá z důvodu natavení laserem vždy stejně velké oblasti. Rozdílná hodnota laserové energie vykazuje dvě možné kategorie návarů. Skupina nevyrobitelných návarů (balling efekt) obsahuje návary, které díky příliš vysoké skenovací rychlosti vypadají přerušovaně (Obr. 4-5b). V opačném případě se podařilo návar vyrobit relativně konstantní a je možné měřit jeho šířku a rozměry tvaru natavené oblasti. Cílem bylo vybrat vhodný rozsah parametrů, které nevykazují velké množství sintrovaných částic kolem svaru. Ty mají vliv na výslednou drsnost povrchu.



Obr. 4-5 a) Kontinuita návaru; b) balling efekt; upraveno z [13]

#### 4.4.2 Geometrie návaru

Analýzou parametrů návaru se rozumí geometrie návaru v jeho řezu (Obr. 4-6). Konkrétně se měří šířka návaru  $w$ , výška návaru  $h$  a hloubka průvaru  $d$ . Jak je popsáno v literatuře, tvar návaru neboli tvar natavené oblasti, lze rozdělit na dva tavící režimy: i) keyhole režim, ii) conduction režim [32]. Liší se velikostí přivedené laserové energie. Při příliš vysoké energii dojde k provaření do velké hloubky, a tím tvorbě defektů. Poměr hloubky k šířce je moc velký. Naopak při nedostatečné hodnotě energie nemusí dojít k dostatečnému provaření s předchozí vrstvou. Také šířka návaru by neměla být menší než tloušťka vrstvy.



Obr. 4-6 Geometrie návaru

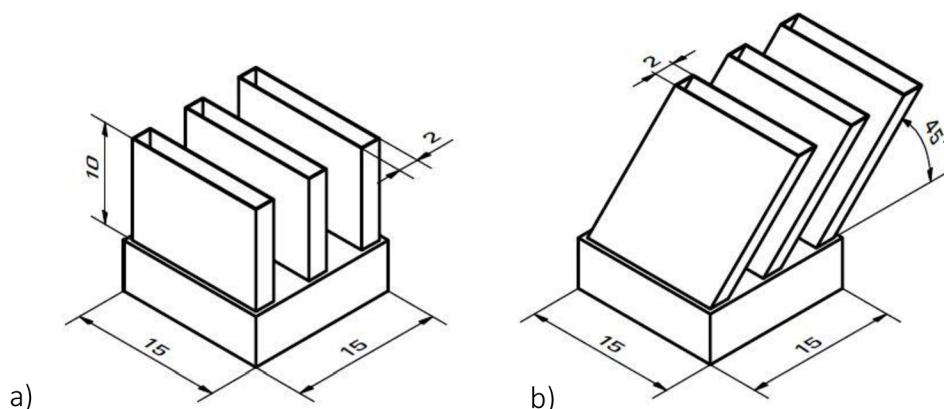
Jednotlivé vzorky s návarý byly rozříznuty a následně byly zkoumány jejich metalografické výbrusy optickým mikroskopem. Z naměřených dat bylo možné sestavit optimální skupinu parametrů, které vykazují vhodné rozměry natavené oblasti pro následné vrstvení skenovacích drah na sebe. Dále bylo možné stanovit vzdálenost skenovacích stop. To je zásadní parametr ovlivňující relativní hustotu objemových dílů. Získané kategorie návarů přinesly optimální rozsah parametrů, který byl použit jako vstupní prvek pro testy tenkých stěn.

## 4.5 Testy tenkých stěn

Jak již bylo zmíněno, cílem práce je stanovit procesní parametry tenkostěnných dílů. Tenkou stěnou lze nazvat stěnu o tloušťce od 0,1 do 4 mm. Z literatury vyplývá, že kvalita součástí je ovlivněna jejich geometrií a odvodem tepla. Tenké stěny (dále jen TS) jsou ovlivněny horším odvodem tepla než objemové části. Oproti návarovému testu, kde byl odvod tepla do samotné objemové podstavy, jsou jednotlivé návarý vrstveny na sebe. Tudíž po stranách je pouze prášek, který tomuto odvodu tepla brání.

### 4.5.1 Tenké stěny tvořené jedním návarem

Výrobou nejtenčí možné stěny se rozumí tzv. metoda single wall. Spočívá v pohybu laseru pouze jedním návarem. Jedná se o vrstvení návarů na sebe. Použit byl stejný přístup jako u návarových vzorků. Stěny byly stavěny na podložku vyrobenou plným materiálem. Tato konfigurace respektuje vhodné podmínky pro následující operace jako je snadné odříznutí od platformy, zalití vzorků do puků a broušení. Na Obr. 4-7a je zobrazen vzorek obsahující tři tenké stěny pro tři různé kombinace parametrů. Jedná se o obdélníkový návar, kde je použita pouze strategie kontury. Podobně jako tomu bylo u návarových testů, naměřené hodnoty byly průměrovány.



Obr. 4-7 Vzorek tenkých stěn tvořených jedním návarem se stavebním úhlem: a) 90°; b) 45°

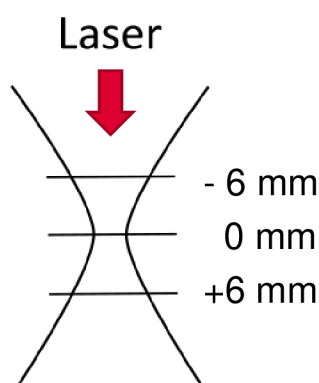


První etapa byla zaměřena na ověření rozsahu parametrů získaných na základě návarového testu. Cílem tohoto testu bylo ověření kvality stěn. V druhé etapě došlo k optimalizaci parametrů, resp. hledání optimální kombinace parametrů, kterou lze dosáhnout výroby nejtenčí možné stěny. Hodnotícím kritériem byla tloušťka jednotlivých stěn určená ze snímků výbrusů pořízených optickým mikroskopem. Stěny byly také analyzovány ze snímku horního pohledu. Tím bylo možné získat informaci o kontinuitě stopy a množství nalepených částic v jejím okolí. Dále byla měřena drsnost povrchu. K tomu sloužily pouze vnější plochy vzorku. Tím, že jsou stěny od sebe vzdálené 2,5 mm, nejsou vzájemně ovlivněny a je pravděpodobné, že vnitřní plochy mají podobnou drsnost jako vnější. Výstupem těchto měření je kombinace nejlepších parametrů jednotlivých oblastí.

#### 4.5.2 Experiment zaostření laserového paprsku

Dalším experimentem byla změna zaostření laserového paprsku. Parametr zaostření popisuje vzdálenost, o kterou se posune ohnisková rovina nad nebo pod uživatelem kalibrovanou nulovou rovinu systému. Pozitivní změna posune stavební rovinu pod nulovou ohniskovou rovinu (zvětšená vzdálenost od laseru), zatímco negativním posunem se posune nad nulovou hodnotu, jak je znázorněno na Obr. 4-8. Posunem stavební plochy od ohniskové roviny dochází ke zvětšení velikosti laserového bodu. Změna ohniskové výšky tudíž bude mít za následek snížení hustoty energie [29]. Zaostřením laserového paprsku, resp. změnou posunutí zaostření, lze významně ovlivnit morfologii natavené oblasti. Opačné vzdálenosti zaostření mají rozdílný vliv na tvar taveniny, a to při stejných parametrech i průměru paprsku. Cílem tohoto experimentu bylo zjistit vliv posunu laserového zaostření na kvalitu povrchu a šířku tenké stěny.

V první části tohoto experimentu bylo aplikováno posunutí zaostření v rozsahu  $-6 \div 6$  mm s odstupňováním po 1 mm. Použity byly parametry získané z testu tenkých stěn. Hodnotící parametry byly stejné jako v případě přechozích experimentů.



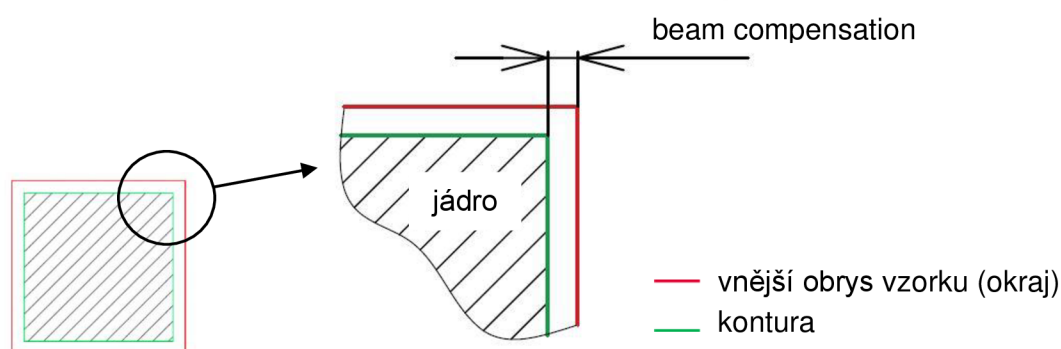
Obr. 4-8 Zaostření laserového paprsku

### 4.5.3 Test stěn pod úhlem

Další část výzkumu spočívala v testování šikmých stěn (Obr. 4-7b). Testování proběhlo na odladěných parametrech kolmých stěn z měřicí etapy č. 2. V tomto experimentu bylo ověřeno, zda je možné stěny tvořené jedním návarem vyrobit. Testován byl především stavební úhel  $45^\circ$  vůči základní desce. To je teoreticky maximální sklon převíslé plochy vyrobitelné bez strukturálních podpor. Zároveň je zde očekáváno nejhorší kvality povrchu. Příliš velká energie zvyšuje velikost natavené oblasti, což se negativně projevuje na době tuhnutí. Současně může dojít k protavení vrstvy příliš hluboko, což způsobuje lepení okolních částic na převíslý povrch.

### 4.5.4 Test kvality stěn větších šířek

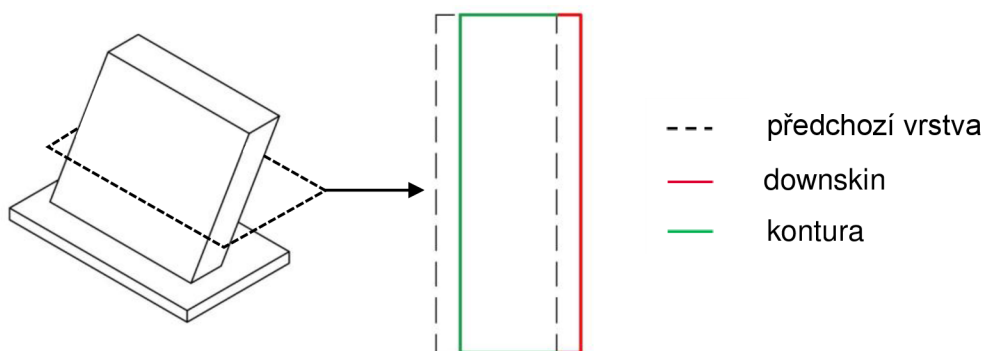
Druhá etapa TS je věnována výrobě stěn větších šířek. Na jednu platformu byly vyrobeny sady vzorků o tloušťkách 0,5, 1 a 2 mm. U takovýchto tlouštěk stěn je možné aplikovat jiné parametry na jádro a na konturu. Na základě položené hypotézy č. 2 byl testován soubor parametrů kontury, zejména její kompenzační parametr nazývaný „beam compensation“, (dále jen *BC*). To je odsazení skenovací stopy okraje stěny za účelem dosažení co nejvíce homogenní struktury (Obr. 4-9). Rozdílové může být i množství kontur, které hraje roli v odvodu tepla, což bylo také testováno. Vstupními parametry byly parametry TS na oblast kontury. Jako skenovací strategie byla aplikována strategie meander.



Obr. 4-9 Parametr beam compensation

Podobně jako tomu bylo i u stěn tvořených jedním návarem, dodatečným experimentem byla výroba šikmých stěn pod stavebním úhlem  $45^\circ$ . I v tomto případě byla sledována kvalita spodního i horního povrchu. U vzorků se opět vyhodnocována drsnost povrchu, a nově také porozita. K tomu bylo použito metody metalografických výbrusů, kde došlo k libovolnému řezu vzorkem, následnému broušení a vyhodnocení optickým mikroskopem. Výsledkem tohoto experimentu bylo ověření možné kombinace parametrů ultratenkých stěn v případě větších šířek, resp. jejich využití v oblasti kontury.

Z rešeršní části práce plyne, že tisk převislých stěn je ovlivněn převážně výkonem laseru. Proto další část byla zaměřena na optimalizaci a zlepšení kvality spodní převislé plochy, na kterou byl aplikován parametr downskin (Obr. 4-10). Ten umožňuje naskenovat oblast spodní plochy jinými parametry, než je zbytek vzorku. Použitým parametřům předcházely předchozí experimenty, zejména v porovnání s parametry od výrobce SLM Solutions. V obou částech byly vzorky analyzovány pomocí mikroskopu, kde byla navíc měřena jejich tloušťka, tj. rozměrová přesnost.



Obr. 4-10 Rozdělení skenovací oblasti parametrem downskin v rámci jedné vrstvy

## 4.6 Testy objemových vzorků

Na základě hodnot šířky návaru je možné stanovit parametr vzdálenosti skenovacích stop ( $H$ ). V tomto testu byly vytvořeny malé objemové vzorky o velikosti 10 x 10 x 10 mm. Cílem byla zjistit kvalitu dílů za použití základních parametrů od SLM Solutions. Dále proběhlo opět testování parametrů TS na oblast kontury. Tloušťka nanášené vrstvy byla konstantní 50  $\mu\text{m}$  stejně jako u všech předchozích experimentů. Podobně tomu bylo se vzdáleností skenovacích stop. V první řadě byla měřena drsnost bočního povrchu, a poté taky porozita. Její měření bylo provedeno pomocí metalografických výbrusů na metalografické brusce s následným focením a vyhodnocením optickým mikroskopem. Výsledkem je výběr vhodných parametrů kontury pro objemové díly za využití parametrů TS. Jestliže bude nalezeno vhodné využití parametrů TS, je možné ho označit jako průnik tenkostěnné a objemové geometrie.

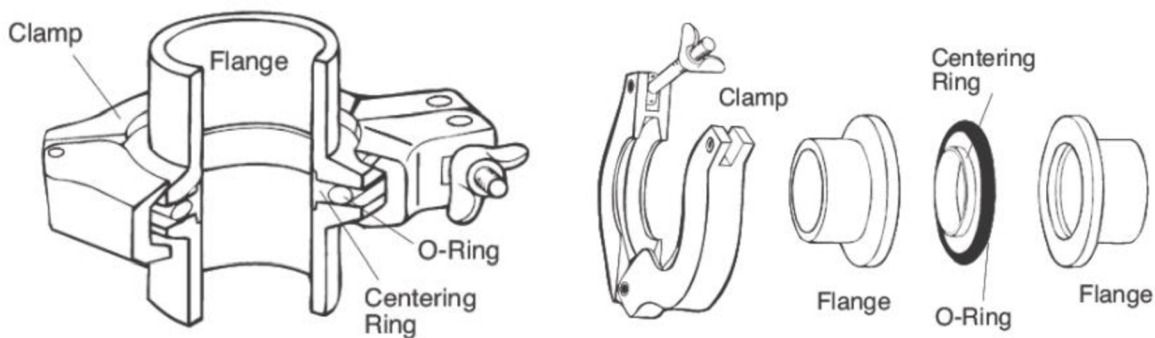
## 4.7 Testy těsnosti

Těsnost stěn je jeden z důležitých úkonů při návrhu tepelných výměníků nebo jiných tvarově složitých součástí podrobených přetlaku. Samotná odolnost neboli propustnost závisí především na kvalitě vyrobené součásti. Zejména porozita a drsnost povrchu hrají velkou roli. Defekty vznikající při výrobě způsobují únik plynu, a také pokles tlaku. Výsledkem je špatná funkce zařízení. Je logické, že se zvyšující se tloušťkou stěny se minimalizuje možnost úniku plynu. Ovšem i zde v případě velkého množství vnitřních defektů to není plně zaručeno. Proto je snahou dosáhnout co nejlepší kvality součásti s minimální tloušťkou stěny. Cílem tohoto experimentu bylo najít nejmenší možnou šířku stěny, která bude vykazovat těsnost tlaku 10 bar. K tomu bylo využito tlakového zařízení, které v rámci této práce vzniklo. Označení stěny za těsnou je možné po době 10 minut bez poklesu tlaku. Následující podkapitola je věnována navrženému zařízení.

### 4.7.1 Zařízení na měření těsnosti

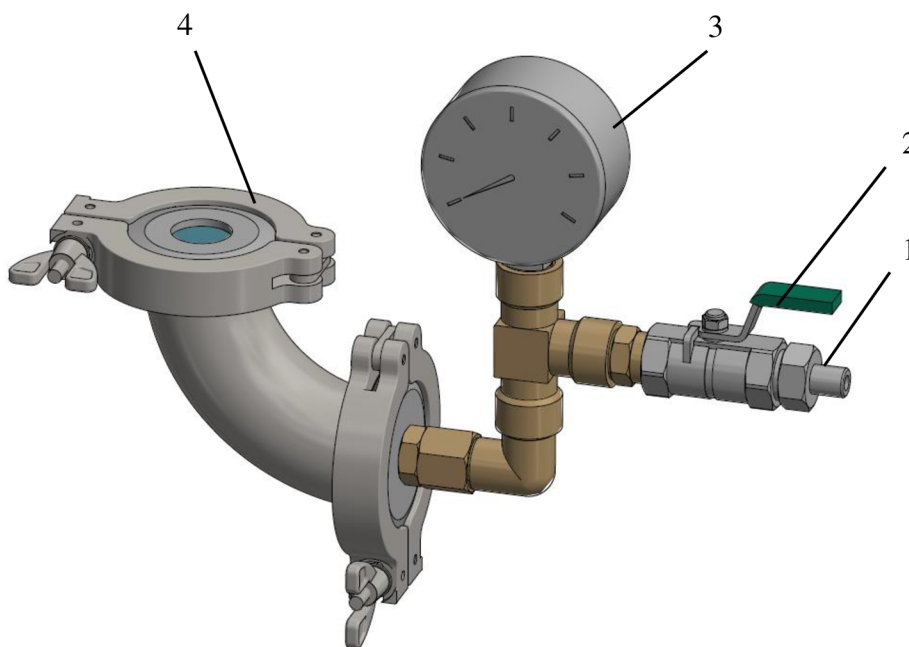
Pro získání charakteristického chování těsnosti tenkých stěn neexistuje v současné době žádné zařízení. Proto byl navržen koncept měřicího zařízení s realizací konkrétního výstupu. Nejjednodušší metodou je přetlaková metoda, která využívá vytvoření přetlaku. Měří se pokles tlaku a s tím spojený únik. Jak je uvedeno v současném stavu poznání, nejefektivnější měření těsnosti spočívá ve využití helia jako zkušební plynu. Uzavřená komora se vzorkem je natlakovaná na potřebný tlak a pomocí ruční detekční sondy se detekuje únik plynu. Tato metoda je vhodná spíše pro malé defekty, kterými dokáže helium svými molekulami proniknout. Druhou možností je využití vzduchu dodávaného do komory pomocí kompresoru. Natlakované zařízení se ponoří do nádrže s vodou a sleduje se únik bublin unikajících ze vzorku. V našem případě bylo zařízení navrženo jako univerzální, a to jak pro helium, tak pro vzduch.

Hlavním cílem návrhu tlakové jednotky je jednoduchost a variabilita tvaru. K tomu byly vybrány normalizované vakuové a vodovodní armatury. Systém ISO KF (Obr. 4-11) se vyznačuje širokým portfoliem dílů používaných mimo jiné i u zařízení SLM. Jeho předností je jednoduchá a rychlá montáž. Mezi čelní plochy speciálních přírub se vloží středový prsten s těsněním, a následným zajištěním objímkou dojde k pevnému těsnému spoji. Přírubu lze zaměnit za ucpávací víčko a tím se spoj uzavře. A právě využití tohoto víčka a jeho modifikace je součástí tohoto konceptu.

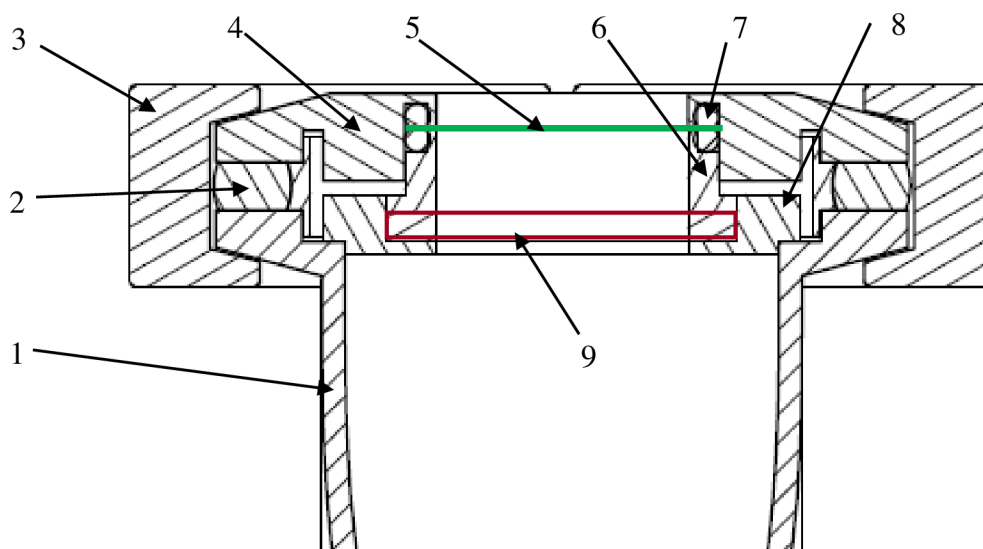


Obr. 4-11 ISO KF systém; upraveno z [38]

Na Obr. 4-12 je zobrazen detailní pohled na navržené konceptní řešení. Vstupní částí tlakové jednotky je sestava složená z vodovodních armatur. Plyn je dovnitř zaveden pomocí průmyslové rychlospojky (1). Tlak je kontrolován analogovým manometrem (3). Po natlakování na potřebný tlak dojde k ručnímu uzavření kohoutu (2). V tomto okamžiku je možné zařízení vložit do vody a pozorovat únik plynu. V opačném případě použití detekční sondy pro únik helia. Tlaková komora (4) má svém konci pevně uložen vzorek tenké stěny. Vzorek je vložen mezi přírubu a upravené víčko. Detailní pohled na uložení vzorku je zobrazen na Obr. 4-13. Velikost vzorků je 24 x 24 mm. Zařízení je navrženo na tloušťky stěn 0,1 až 2,5 mm. Použitím vymezovacích kroužků u nejtenčích stěn je dosaženo potřebného přitlaku jako u stěny o 2,5 mm.



Obr. 4-12 Schéma zařízení na měření těsnosti; 1 – rychlospojka; 2 – kohout; 3 – manometr; 4 – tlaková komora



**Obr. 4-13** Detailní pohled na držák vzorku; 1 – trubka; 2 – centering ring; 3 – clamp; 4 – horní víko; 5 – vzorek; 6 – horní doraz; 7 – O-kroužek; 8 – spodní doraz; 9 – vymežovací kroužky DIN 988

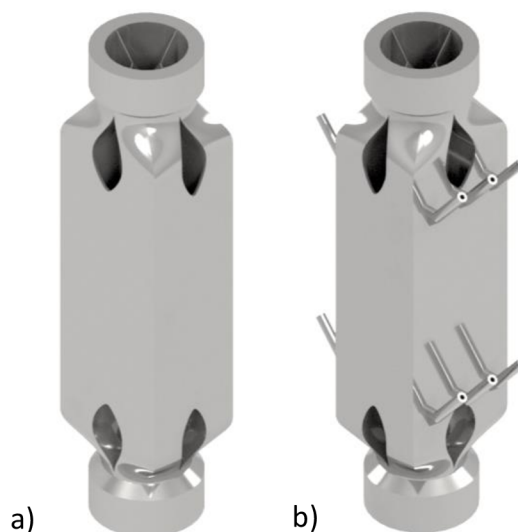
## 4.8 Ověření získaných procesních parametrů

Ve spolupráci s Ing. Martinem Zimou vznikl koncept tepelného výměníku. Tato součást je navržena s ohledem na požadavky tlakové zkoušky a měření tlakových ztrát. V rámci této práce tlaková zkouška sloužila k ověření získaných procesních parametrů.

### 4.8.1 Návrh testovací součásti

Součást byla navržena ve dvou variantách. První z nich je výměník zobrazený na Obr. 2-14a, který disponuje jednoduchou geometrií. Na každém konci je navržena tvarová příruba sloužící pro připojení armatur s dodávkou vzduchu. Do přírub součásti byl vyřezán vnější trubkový závit  $G1/2$ . Druhý koncept (Obr. 4-14b) obsahuje navíc pruty, resp. místa odběru statického tlaku z několika vnitřních kanálů. Tyto pruty byly dále samostatně otestovány v kap. 5.6.2. Tělo výměníku je dále navrženo s ohledem na aditivní výrobu s úplnou absencí podpurných struktur. Detailní pohled na vnitřní stavbu výměníku je v příloze 4.

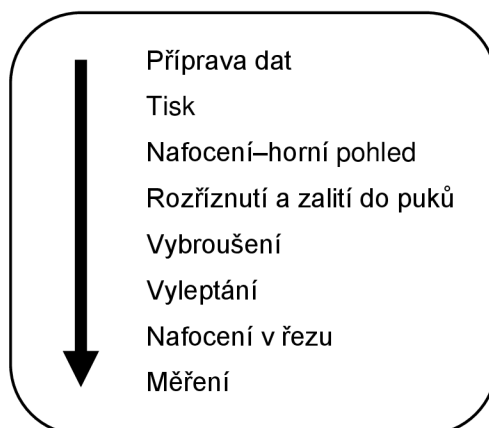
Vnitřní kanály lze rozdělit na dvě skupiny: i) testované kanály; a ii) netestované. Testované kanály jsou uzpůsobeny z hlediska měření tlakových ztrát do tvaru obdélníku a v oblasti přírub se transformují do zaobleného tvaru. Je to dáno potřebou mít plynulou změnu tvaru k dosažení rovnoměrně rozloženého vzduchu mezi všechny kanály. Netestované kanály jsou označeny jako neprůchozí z důvodu napojení na okolní atmosférický tlak. Velikost jednoho kanálu je  $7 \times 6$  mm. Tloušťka vnitřních stěn je uvažována co nejmenší a odvíjí se od parametrů získaných v rámci tohoto výzkumu. Vnější stěny mají šířku 0,6 mm.



Obr. 4-14 a) Jednoduchá varianta navrženého výměníku; b) varianta s pruty pro odběr statického tlaku

## 4.9 Pracovní postup metalografických úprav

Vzorky podrobené měření porozity nebo rozměrů natavené oblasti musely být metalograficky upraveny. Celý pracovní cyklus je zobrazen na Obr. 4-15. Po odříznutí vzorků z platformy elektrojiskrovou řezačkou bylo potřeba vzorky nafotit a připravit na metalografický proces úprav. Poté byly vzorky rozříznuty v požadovaném místě a zality do puků. Následně bylo možné vzorky vybrousit. K tomu bylo využito ručního broušení na zařízení SAPHIR 250 A2-ECO. Postupně byly použity brusné papíry se zrnitostí 600 až 4000. Po odstranění všech škrábanců bylo aplikováno leštění. Byla použita diamantová suspenze se zrnitostí 3 a 1  $\mu\text{m}$  v kombinaci se smáčedlem na bázi alkoholu. V případě návarových testů bylo potřeba dále vzorky vyleptat. Tím došlo ke zviditelnění metalografické struktury a také k možnému měření natavených oblastí. K tomu bylo využito leptadlo Marble ( $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ). Leptání bylo prováděno za laboratorní teploty ponořováním vzorku do roztoku leptadla.



Obr. 4-15 Pracovní postup

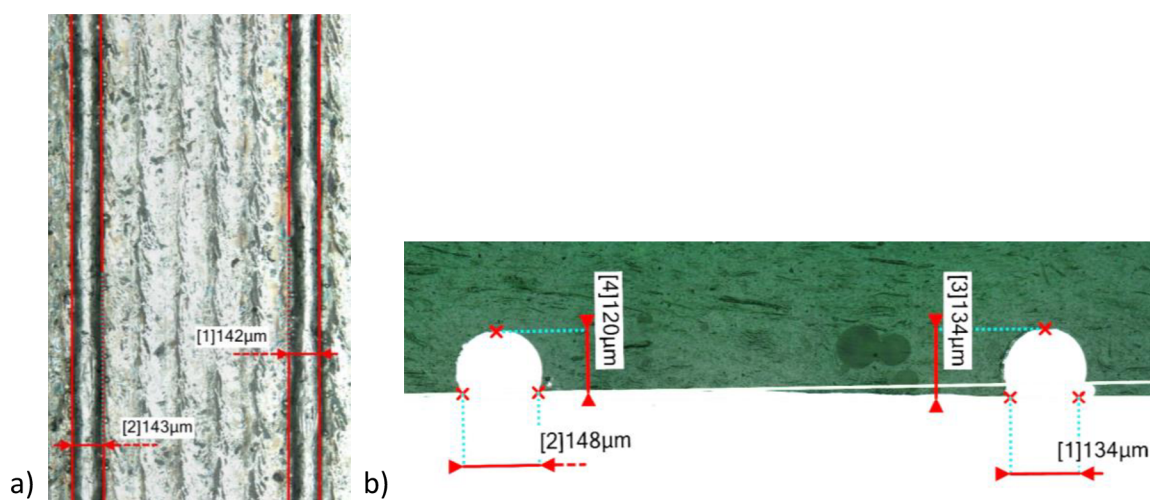
## 4.10 Metody vyhodnocení

Tato kapitola je věnována postupu vyhodnocení jednotlivých experimentů. Hustota materiálu byla posuzována destruktivní metodou metalografických výbrusů. Naopak drsnost povrchu byla měřena pouze opticky pomocí mikroskopu.

### 4.10.1 Postup vyhodnocení geometrie jedné skenovací stopy

Geometrie návarů i tenkých stěn byla hodnocena na optickém mikroskopu KEYENCE. K tomu lze využít dva možné přístupy. První variantou je 3D snímek, kdy zařízení nasnímá vzorky s určitým přiblížením v několika rovinách a poté je spojí dohromady. V tomto případě je možné měřit rozměry návaru v libovolném počtu míst, zejména v horní pohledu. Díky rychlejšímu získání dat s výhodou například většího statistického souboru, je naopak přesnější metodou použití 2D snímku metalografických výbrusů. Zde jsou rozměry návaru měřeny pouze v řezu vzorkem, který byl metalograficky upraven. Hodnotí se výška návaru, šířka návaru a hloubka průvaru.

Šířka skenovací stopy tvořená jedním návarem byla měřena z pěti různých míst rozmístěných po její délce (Obr. 4-16a). Na jedné straně návaru bylo označeno 5 bodů a těmito místy byla proložena přímka. To samé se provedlo na druhé straně návaru. Poté se pomocí střední hodnoty vzdálenosti těchto přímek určila průměrná šířka návaru. Pro zjištění šířky návaru bylo použito jak metody měření po délce návaru, tak i metalografického výbrusu (Obr. 4-16b). Cílem je porovnání přesnosti obou variant. Tím, že každá kombinace parametrů je vyrobena dvěma návary, byly obě hodnoty průměrovány.



Obr. 4-16 Měření šířky návaru; a) po délce návaru; b) metalografický výbrus



## 4.10.2 Měření šířky tenké stěny

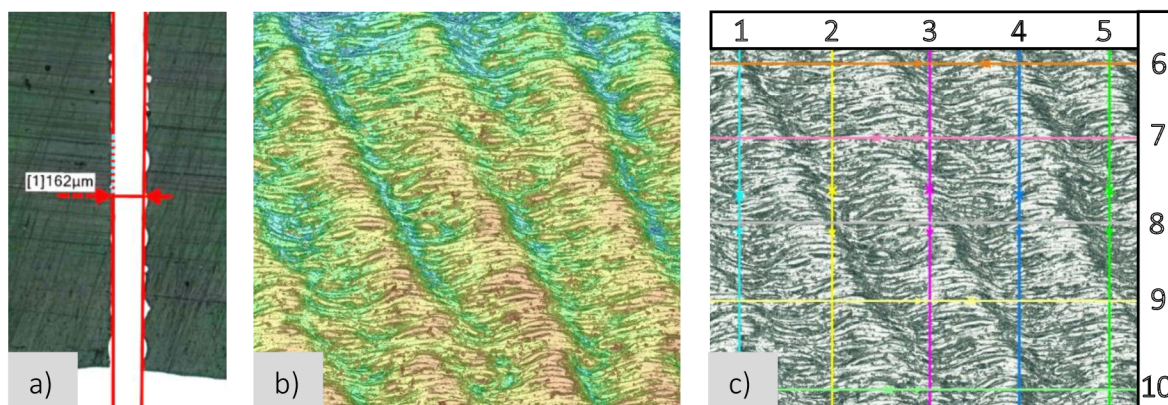
V tomto případě potřeba rozlišit dva přístupy měření šířky. První možností je měřit šířku po délce stopy, druhou po výšce stěny. Druhá zmíněná metoda je citlivější na volbu daného řezu, ale zároveň je přesnější oproti první, z důvodu analýzy celého průřezu stěny. Měření po výšce (Obr. 4-17a) probíhalo podobně jako u měření šířky samotných návarů. V řezu metalografického výbrusu byla měřena stěna v pěti náhodných místech a poté spočtena průměrná hodnota.

## 4.10.3 Vyhodnocení drsnosti povrchu

Drsnost povrchu stěn i bočních povrchů objemových vzorků bylo provedeno také na optickém mikroskopu KEYENCE, který umožňuje měření struktury povrchu pomocí 3D snímku. Spočívá v nastavení spodní a horní hladiny zaostření čočky, kdy dojde k vytvoření několika snímků a následného spojení do jednoho, čímž vznikne trojrozměrný snímek (Obr. 4-17b). Existují dva možné přístupy měření drsnosti ze získaného snímku: i) měření lineární drsnosti; a ii) měření plošné drsnosti povrchu. Pro lepší představu o drsnosti a eliminování případně nevhodných nastavení filtrů, bylo použito obou metod. Velikost měřené oblasti byla pro všechny vzorky 4000 x 4000  $\mu\text{m}$ .

### Měření lineární drsnosti

Tato metoda spočívá v aplikování libovolného počtu profilových čar na 3D snímek (Obr. 4-17c). Čáry je možné umístit kamkoli do měřené oblasti. Každá křivka má tedy daný vlastní profil struktury povrchu. Následným aritmetickým průměrem všech čar je možné získat celkovou drsnost povrchu. Ovšem přesnost je závislá na celkovém počtu křivek. Čím více získaných hodnot, tím přesnější měření. Pro měření bylo celkem použito členění do 10 profilových čar.



Obr. 4-17 a) Měření šířky stěny po výšce; b) 3D snímek drsnosti; c) měření drsnosti profilovými čarami

## Plošná drsnost povrchu

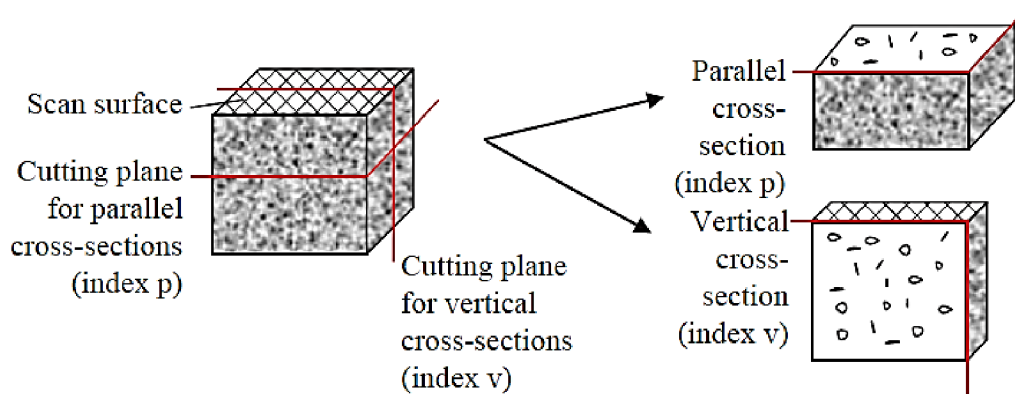
Druhou metodou je měření povrchu vybrané plošné oblasti. Zvolením vhodných hodnot filtračních parametrů lze eliminovat extrémní hodnoty, které by jinak ovlivnily drsnost v celé ploše. Toto měření drsnosti je časově méně náročné než předchozí, ale nevhodně zvolené filtry mohou znehodnotit výsledné hodnoty. Naopak správnou kombinací ji lze považovat za přesnější metodu. Proto byla tato metoda použita nejprve jako orientační, kdy získaná hodnota posloužila jako vstupní parametr pro volbu filtračních hodnot v měření profilovými čarami. Jakmile se hodnoty obou metod téměř shodovaly, bylo možné výsledek z této metody označit jako správný.

### 4.10.4 Vyhodnocení porozity

Metody pro vyhodnocení porozity lze rozdělit na dvě základní skupiny: i) destruktivní; a ii) nedestruktivní. V této práci bylo využito metody metalografických výbrusů.

Za nedestruktivní metodu se považuje počítačová tomografie ( $\mu$ CT), vytvářející trojrozměrné reprezentace povrchu. Vzniká pořizováním několika rentgenových obrazů kolem osy otáčení a za použití algoritmů vytvoří snímek. Nevýhodou je omezené použití pro materiály s vysokou hustotou porozity, které vyžadují delší expoziční dobu pro dosažení potřebného kontrastu [39].

Metoda metalografických výbrusů (Obr. 4-18) je destruktivní měřicí metoda. Vzorek je rozříznut v rovině řezu a následně je vybroušen a vyleštěn. V této rovině se pořídí snímek pomocí optického mikroskopu a hodnotí se poměr světlých a tmavých částí. To znamená poměr defektů vůči celé ploše řezu. Tato metoda se používá pouze pro měření porozity v daném řezu, ne v celém objemu. Oproti předchozí metodě lze lokalizovat póry ve vzorku za účelem odhadu jejich velikosti. Vyhodnocení procentuálního zastoupení defektů v rovině řezu bylo provedeno v softwaru ImageJ, kde byl nejdříve snímek převeden na 8-bitový rastr a poté s využitím funkce Threshold bylo možné rozdělit barevné oblasti na světlé a tmavé části.



Obr. 4-18 Cross section metoda [40]

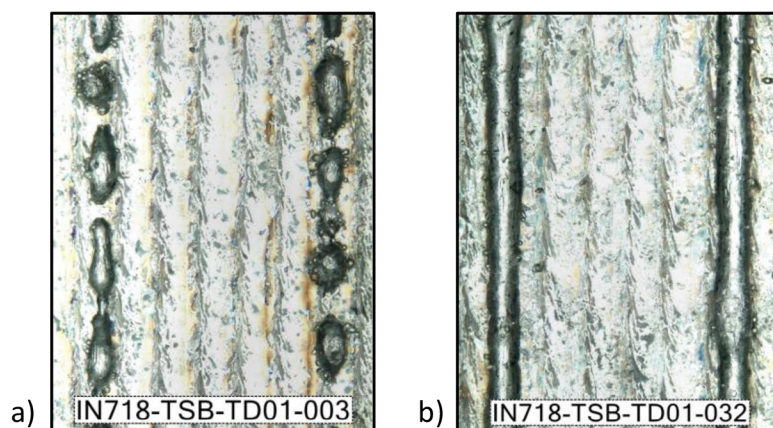
## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Vyhodnocení návarových testů

Návary byly nejdříve podrobeny morfologické analýze, resp. kontrole kontinuity stop pomocí optického mikroskopu. K tomu bylo použito pohledu ze shora. Poté byly návary rozříznuty kolmo na směr skenování a pomocí metody metalografického výbrusu byly analyzovány konkrétní rozměry natavené oblasti.

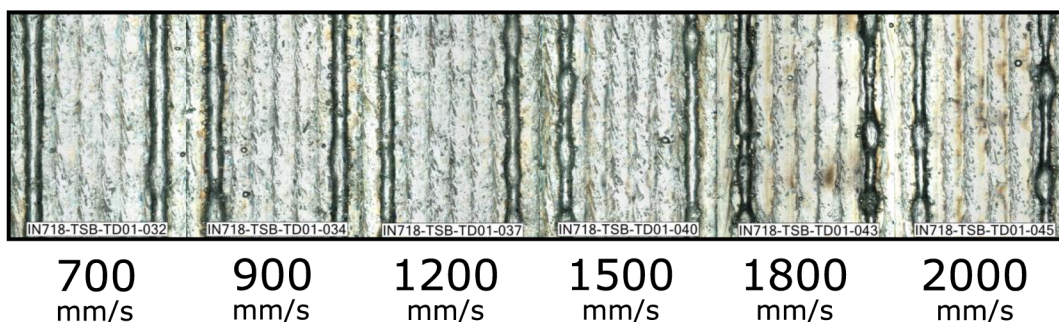
#### 5.1.1 Analýza horního pohledu

Kompletní mapa s horními pohledy vyrobených návarů pro rozdílné procesní parametry je zobrazena v příloze 1. Je patrné, že s nízkou hodnotou energie, resp. malým poměrem výkonu laseru a rychlosti skenování, dochází k nekontinuitě natavené oblasti v podobě přerušované stopy jako například pro výkon 100 W. To je také ukázáno na Obr. 5-1a. Tento jev je také pozorován pro vysoké rychlosti, kde už je i maximální výkon 400 W nedostatečný. Většina návarů je podrobena nerovnoměrné šířce po jeho délce. Z hlediska rostoucí skenovací rychlosti dochází k poklesu stability natavené oblasti, což způsobuje přerušování pravidelné šířky návaru (Obr. 5-2). Vizuálně nejpravidelnější se jeví stopy se skenovací rychlostí 500 až 800 mm/s pro výkon 200 až 300 W (Obr. 5-1b).



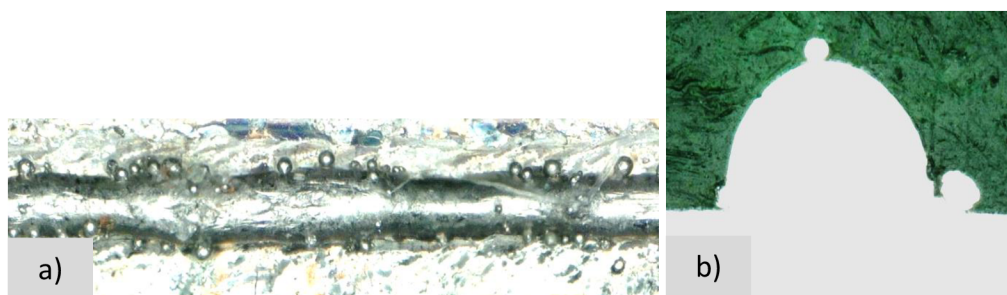
**Obr. 5-1** a) Přerušovaná stopa - vzorek 003 ( $P=100$  W,  $v= 600$  mm/s); b) nejpravidelnější stopa – vzorek 032 ( $P=300$  W,  $v= 700$  mm/s)

Ovšem nerovnoměrnost natavené oblasti vznikající za vysokých rychlostí nemusí být základem pro vyřazení v eliminačním procesu výběru procesních parametrů. Je to dáno absencí efektu šrafovacích rozměrů, resp. vzdálenosti skenovacích stop, na konsolidaci materiálu objemových dílů. Proto je potřeba se zaměřit na metodu metalografických výbrusů a analýzu natavené oblasti jednotlivých stop.



Obr. 5-2 Ztráta kontinuity návaru s rostoucí skenovací rychlostí;  $P=300$  W

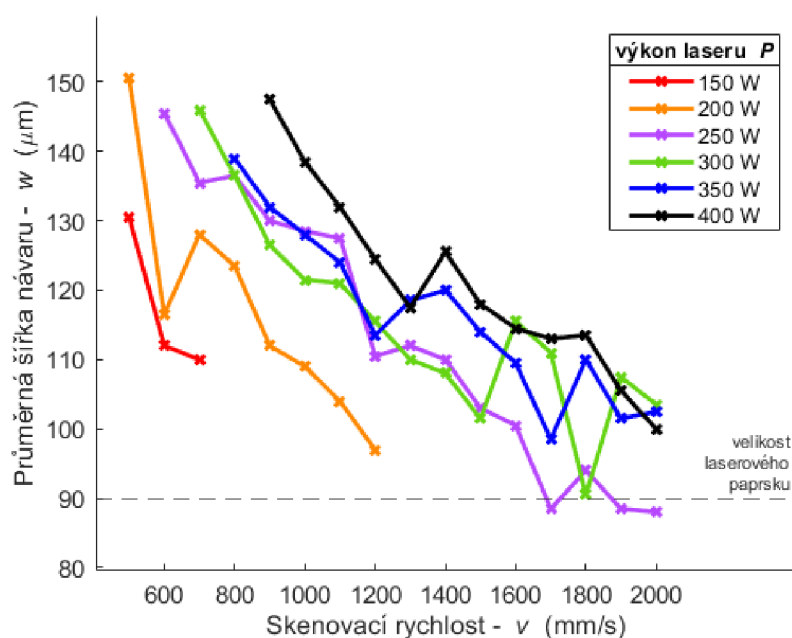
Faktor, který ovlivňuje některé z rovnoměrnějších stop, je přítomnost kuliček (balling efekt), které mírně zvětšují střední šířku návaru. Tyto kuličky jsou malé skupiny částic, které se odlomí od roztaveného kovu a ztuhnou podél stopy ve směru skenování (Obr. 5-3). Tento jev kuličkování neboli tvorba sintrovaných částic, je zodpovědný za vytvoření dílu se špatnou povrchovou úpravou. Návary vytvořené s nižší rychlostí skenování obecně vedly k menšímu množství tvorby kuliček, což by mohlo být způsobeno tendencí taveniny k dosažení vyšší teploty natavené oblasti. Bylo prokázáno, že kuličkování se zvyšuje s nadbytkem roztaveného materiálu nebo když je viskozita v tavenině příliš nízká [41]. Vytvoření těchto částic roztaveného materiálu pomáhá omezit kolísání povrchového napětí taveniny [42]. Díky tomu může dojít k negativnímu dopadu na kvalitu konečné součásti. Ovšem může to mít vliv i na vytvoření navazujících vrstev objemových dílů. Dochází k natavení většího množství materiálu a tím vzniká větší šířka stopy. To se může projevit změnou vzájemného prolnutí sousedních stop a také v odlišném protavení do předchozí vrstvy, čímž může vznikat pórovitost.



Obr. 5-3 Tvorba sintrovaných částic; a) pohled shora; b) metalografický výbrus

Při pohledu na horní plochu vzorků s návaru (Příloha 1) není zcela jasné, jak nanesené stopy interagují s povrchem vzorku, nicméně poskytují mnohem reprezentativnější průměrnou šířku návaru než samotný průřez (kap. 5.1.2). Kromě toho jsou schopny zobrazit účinky kuličkového jevu po celé délce stopy.

Průměrná šířka návaru porovnává šířku stopy s konstantní navrženou šířkou 90  $\mu\text{m}$ . Tento parametr je udáván jako hodnota průměru laserového bodu. Nejpřesněji vytvořené stopy s hodnotami blízkými 90  $\mu\text{m}$  byly obecně vytvářeny pomocí vyšších rychlostí nad 1500 mm/s (viz Obr. 5-4). Experimentální data naznačují, že bez ohledu na výkon laseru, průměrná šířka stopy klesá s rostoucí skenovací rychlostí, jak bylo očekáváno. Největší změna šířky je pozorována při výkonu laseru 250 W, kdy při skenovací rychlosti 1100 mm/s dojde k rapidnímu poklesu téměř o 20  $\mu\text{m}$ . Tato experimentální data jsou závislá na přesném místě řezu. Může totiž dojít ke zkreslení, kdy u méně stabilních návarů je řez proveden v zúžené oblasti návaru nebo naopak. Efekt rychlosti skenování je nejvýznamnější v oblasti rychlostí do 1200 mm/s. Zde šířka návaru klesá s rostoucí rychlostí rychleji než v případě větších rychlostí. To by mohlo naznačovat, že pomalejší rychlosti skenování budou mít výraznější vliv na množství roztaveného prášku než výkon laseru.

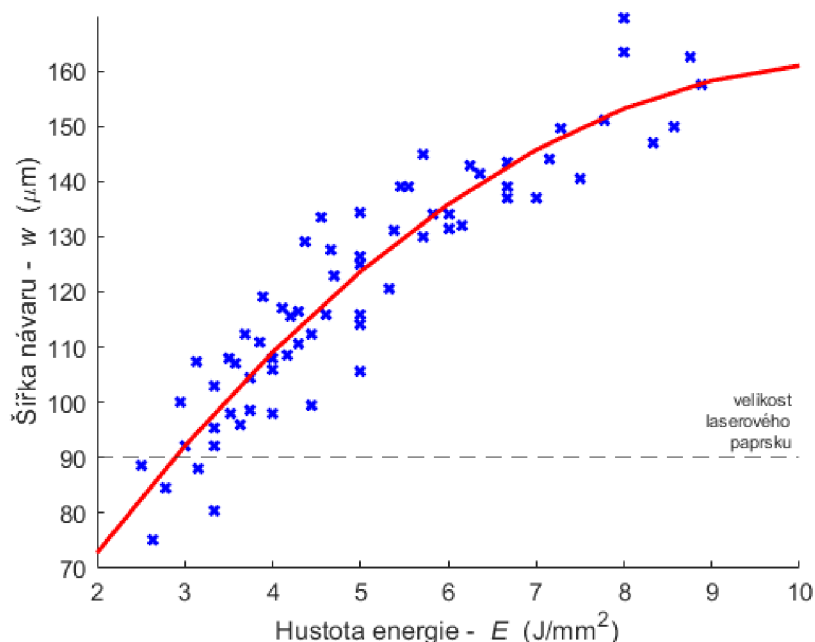


Obr. 5-4 Průměrná šířka návaru v závislosti na rychlosti skenování (horní pohled)

Výkon laseru a rychlost skenování mají výrazný vliv na stabilitu skenovacích stop a tedy i na konstrukci tenkých stěn a jejich rozměry. Avšak jejich poměr vyjádřený jako lineární energie ( $P/v$ ), stejně jako objemová hustota energie, jak označil i Moussaoui [4], není schopen poskytnout informace o složitosti tvorby taveniny. Hustota nezachycuje kinetiku taveniny, a proto nedokáže přesně popsat mnoho dalších vlastností, jako je tvar natavené oblasti (výška a hloubka) a výsledný režim tavení. Výsledky získané z návarových testů poskytují potvrzení. Např. návary 002, 016, 026 a 043 mají stejnou hustotu energie 3,3 J/mm<sup>2</sup>, ale mají odlišnou morfologii stopy.

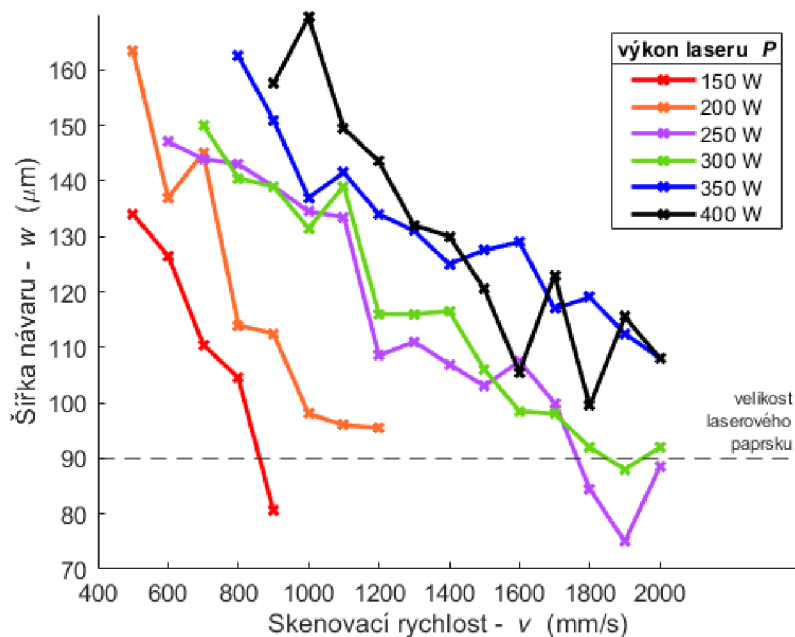
## 5.1.2 Geometrie návarů

Pro detailnější analýzu kvality návarů byly stopy podrobeny měření rozměrů v jejich řezu (Příloha 2). Pořízení snímků průřezových oblastí umožňuje nahlédnout do oblasti taveniny. Tyto fotografie ovšem ukazují pouze jednu instanci v čase a nemusí odrážet průměrnou hodnotu defektů po celé délce skenování. Každá kombinace parametrů je tvořena dvěma snímky návaru. Ty se liší protilehlým směrem skenování. Podle Kumara [28] šířka návaru lineárně roste se stoupající hustotou energie v rozsahu 2 až 10 J/mm<sup>2</sup>. Ovšem vykazující experimentální hodnoty se mírně liší. Na Obr. 5-5 je patrné, že z počátku šířka roste téměř lineárně, ale přibližně od 4 J/mm<sup>2</sup> se trend křivky mění a zvyšující se šířka stopy už není tak výrazná. Šířka návaru pořízena ze snímků v řezu se mírně liší od průměrné šířky po celé délce stopy (Obr. 5-6). Je to dáno již zmíněnou nepravidelností a provedení řezu právě v místě, kde není stopa kontinuální. Proto nelze kombinovat přesné hodnoty získané z pohledu shora a ze samotného řezu.

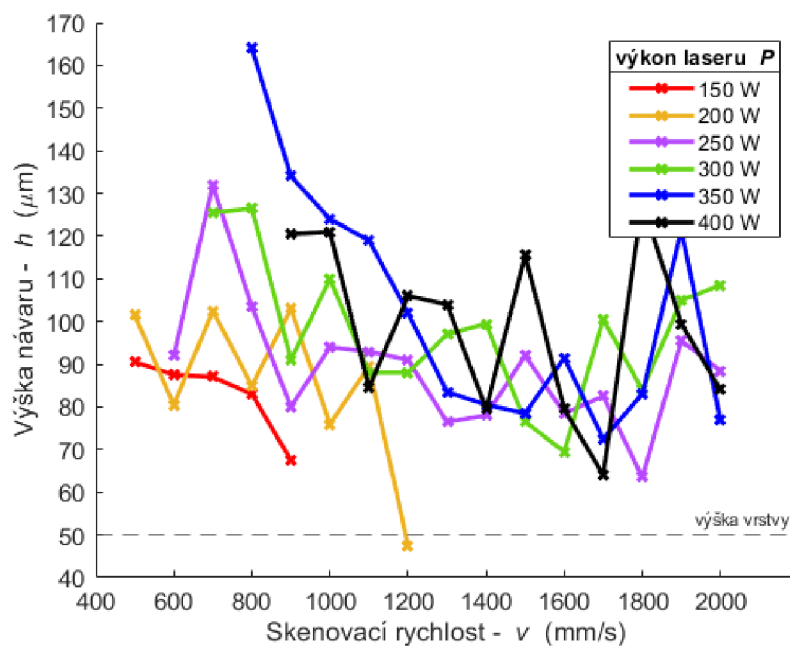


Obr. 5-5 Závislost šířky návaru na hustotě energie

Na Obr. 5-7 je závislost výšky návaru na rychlosti skenování. Z grafu je patrné, že víceméně pro všechny výkony laseru se tato hodnota pohybuje okolo 80 až 100 μm. To je téměř dvojnásobek výšky vrstvy. Lze to vysvětlit rostoucí absorbovanou energií se schopností taveniny vtáhnout do sebe okolní částice prášku. Čímž dochází ke zvětšení výšky stopy. Dále každá vrstva podstavy vzorku prošla mírným poklesem výšky vrstvy. Tuhnutím materiálu dochází k jeho smrštění, tím pádem velikost nanesení následující vrstvy musí být vyšší právě o hodnotu smrštění. To znamená, že i poslední vrstva s návaru je o tuto hodnotu ovlivněna.

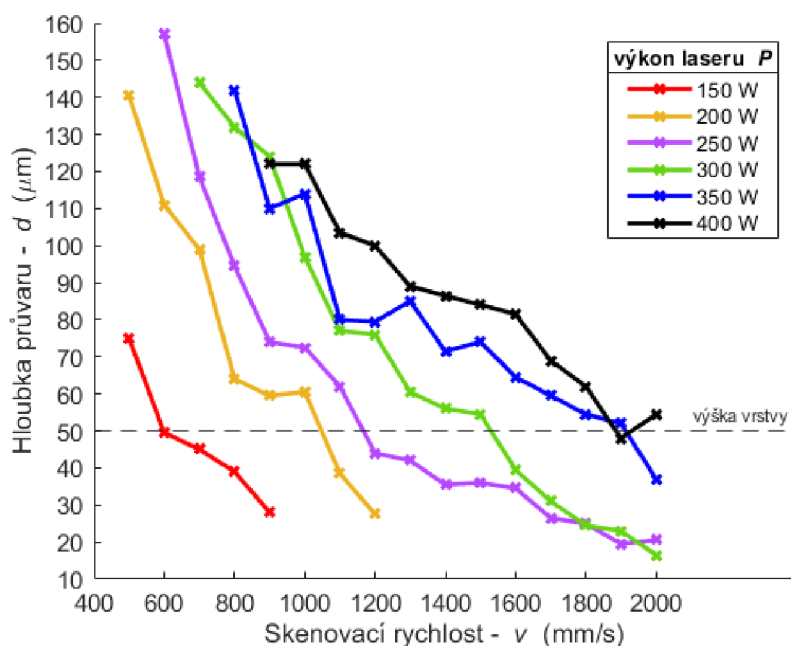


Obr. 5-6 Šířka návaru v závislosti na rychlosti skenování (výbrus)



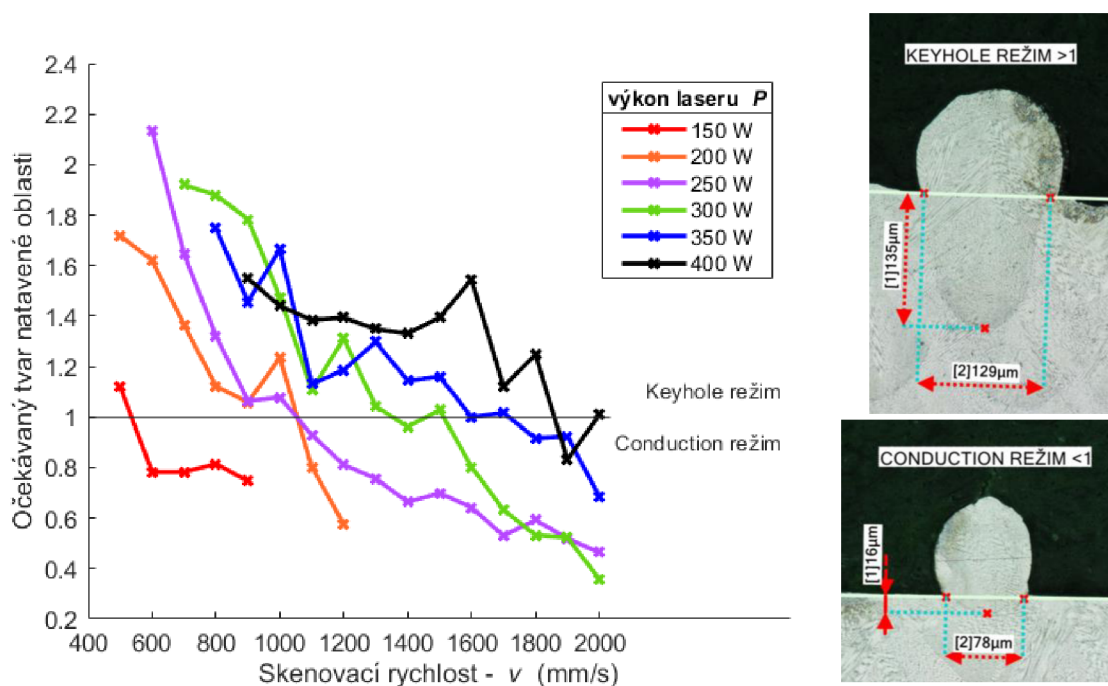
Obr. 5-7 Závislost výšky návaru na rychlosti skenování

Hloubka taveniny je poslední analýzou uvažovanou v tomto experimentu a její chování lze najít na Obr. 5-8. Hloubku natavené oblasti výrazně ovlivňuje doba, po kterou je paprsek v jedné poloze, tj. rychlost skenování. Hodnota protavení je důležitým faktorem, který je potřeba vzít v úvahu, protože následné vrstvení materiálu je ovlivněno roztavením již vytvořené vrstvy. Tento proces vede k nepředvídatelné tvorbě mikrostruktur a tvorbě dutin při vyšších výkonech. Jak je zřejmé grafu, většina parametrů vykazuje větší hodnoty průvarů, než je samotná výška vrstvy. Zejména u nižších a středních rychlostí. To znamená alespoň částečné provaření předchozí vrstvy. Toto provaření by mělo být přibližně 1,5x násobek výšky vrstvy.



Obr. 5-8 Závíslost hloubky průvaru na rychlosti skenování

Podle studie Yanga [32] lze rozdělit průvaru na základě typu tavicího režimu. Hranicí mezi keyhole režimem a conduction režimem je hodnota poměru průvaru ku polovině šířky návaru rovna jedné. Na základě tohoto poměru bylo možné aplikovat rozdělení průvarů i na provedené testy. To lze vidět na Obr. 5-9. Podobně jako tomu bylo u Yanga [32], výsledný trend potvrzuje větší oblast průvarů vykazujících keyhole režim. Opačná oblast je přiřazena víceméně k nepravidelným návarům s příliš velkou skenovací rychlostí. Žádný návar nebyl vystaven kritické hodnotě keyhole režimu, která činí poměr větší jak 2,5. To je hodnota, při které se začíná tvořit keyhole porozita z důvodu příliš vysoké energie [43].

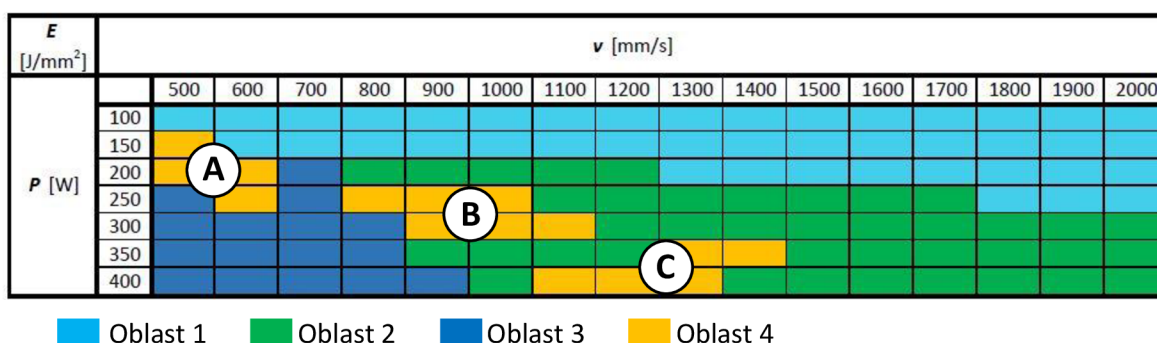


Obr. 5-9 Tvar natavené oblasti v závislosti na rychlosti skenování



### 5.1.3 Perspektivní oblast parametrů

Procesní mapu parametrů (Obr. 5-10) lze rozdělit na čtyři hlavní oblasti. Jelikož byla testovací sada parametrů navržena se zúžením o nevhodné parametry vykazující nedostatečnou hustotu energie, nebyl žádný vyrobený návar zařazen do kategorie silně diskontinuální. Tato kategorie se vyznačuje téměř chybějící stopou s občasně rozpoloženými kuličkami. Oblasti porovnávají jak kontinuitu stopy, tak rozměry návaru vhodné pro vrstvení stop na sebe.



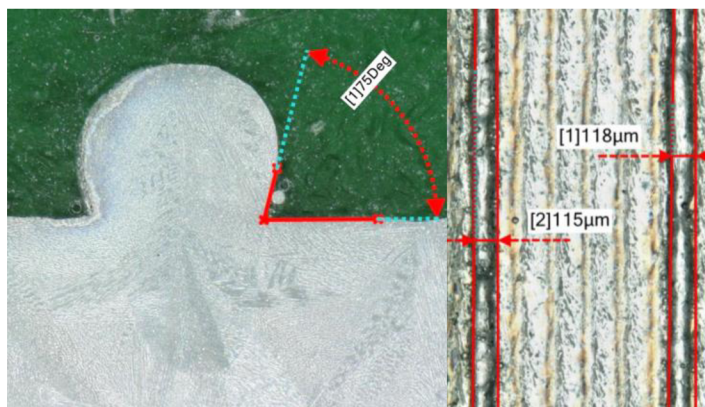
Obr. 5-10 Mapa procesních parametrů návarů

**Oblast 1 - nepravidelný tvar** – Bylo dosaženo částečného vytvoření stopy kvůli nedostatečné hustotě energie. V některých částech je stopa tvořena balling efektem. Je to dáno vysokou rychlostí skenování pro daný výkon.

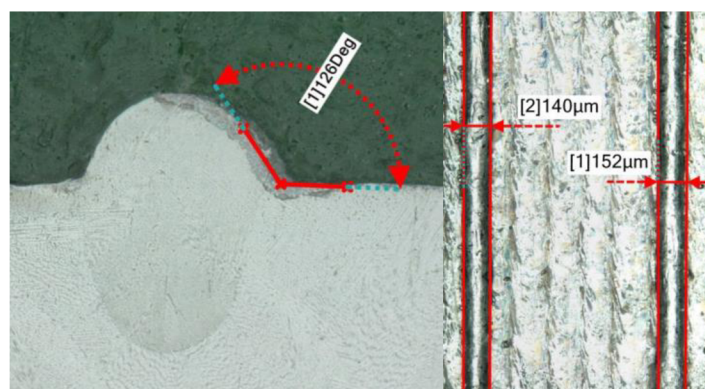
**Oblast 2 - kontinuální, ale nepravidelný tvar** – Výsledná stopa je silně ovlivněna změnou rozměrů natavené oblasti. Je to dáno velkou skenovací rychlostí. Oba návary vyrobené stejnými parametry se většinou tvarově lišily. Navíc při nízké úrovni výkonu laseru bylo v blízkosti stopy nalezeno mnoho částečně roztavených částic. Tyto návary nejsou vhodné pro tvorbu tenkých stěn.

**Oblast 3 - pravidelný a uzavřený tvar** (Obr. 5-11) – Šířka stopy byla stabilní s větší šířkou než průměr laserového paprsku. Úroveň vysokého výkonu v kombinaci se středními až nízkými rychlostmi podporovala stabilní fond taveniny. Rozměry natavené oblasti vykazovaly vhodnou hloubku průvaru, resp. keyhole režim, což by mohlo vést k dobrému provaření předchozí vrstvy. Bohužel tvar návaru nebyl vhodný z hlediska úhlu, který svírá se základnou. Tento úhel by měl být větší než 90°. Menší hodnota by způsobila špatné vrstvení skenovacích stop na sebe. Tudiž tato oblast není dále částí tohoto výzkumu.

**Oblast 4 - pravidelný a otevřený tvar** (Obr. 5-12) – Stopa byla souvislá, tvarově podobná předchozí oblasti. Avšak tvar návaru vykazoval vhodný stavební úhel, který je větší než 90°. Je to úhel, který je perspektivní z hlediska vrstvení návarů na sebe. Tato oblast parametrů se jeví jako nejvhodnější. Jak je ukázáno v mapě procesních parametrů (Obr. 5-10), oblast 4 lze dále kvantifikovat na tři podoblasti. Tyto jednotlivé kategorie budou použity pro další část výzkumu.



Obr. 5-11 Kandidát za oblast 3 (vzorek 032)

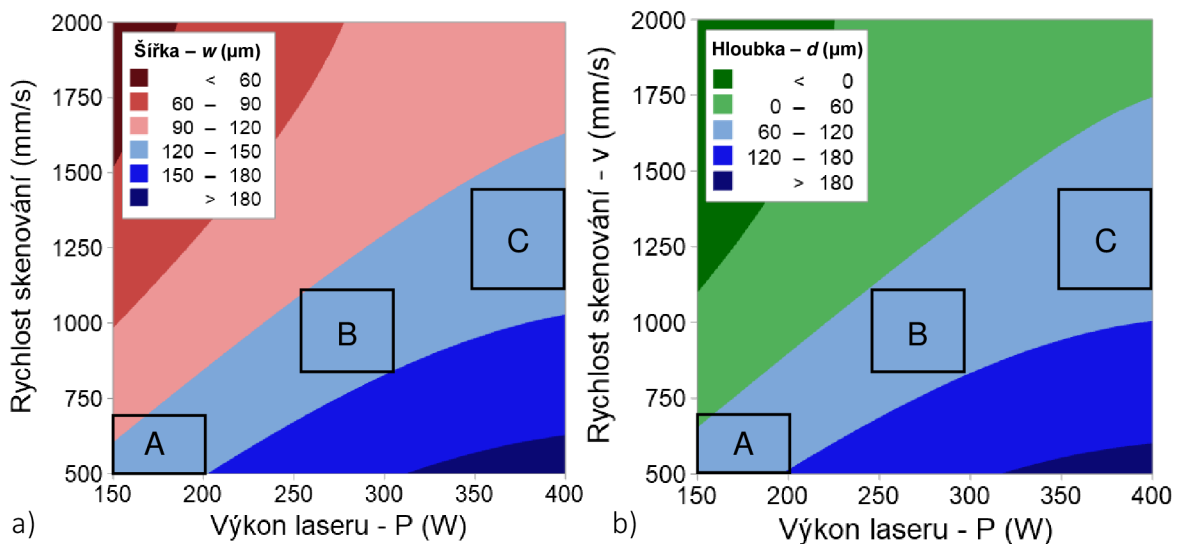


Obr. 5-12 Kandidát na oblast 4 (vzorek 010)

Výsledky naznačují, že nejstabilnějších návarů je možné dosáhnout v podoblasti **A**. To je skupina menších výkonů s malými skenovacími rychlostmi. Důležité je poznamenat, že podle studie Balbaa [13] je tato oblast perspektivní z hlediska stabilní tvorby stop. On sám nejlepší výsledků dosáhl pro hodnoty 220 W a rychlosti 500 mm/s.

Podoblast **B** zasahuje do středních výkonů a středních rychlostí. Návary se v této oblasti jeví jako pravidelné, s menší šířkou stopy než v případě přechozí podoblasti. To by mohlo být efektivní z hlediska výroby nejtenčí možné stěny s ohledem na její kvalitu. Proto bude dále tato oblast použita a otestována na tenkých stěnách. Zároveň do této oblasti spadá část hatching parametrů od SLM Solutions použitých na výrobu podstavy [37]. Rychlost skenování 760 mm/s a výkon laseru 275 W.

Poslední podoblast **C** je určena velkými výkony. Zde se stopy jeví už jako mírně nepravidelné, resp. alespoň jedna stopa ze dvou byla ovlivněna lehkými odchylkami. Naopak svým tvarem utvrdily své místo v další testovací sadě. Cílem je otestovat vyšší rychlosti tisku návarů za účelem urychlení výroby.



**Obr. 5-13** Rozměry návarů pro zvolené podoblasti kombinací parametrů; a) šířka návaru; b) hloubka průvaru

Zvolené podoblasti respektují požadavky pro výrobu kvalitních návarů a všechny se pohybují v podobném rozsahu rozměrů. Na Obr. 5-13a je vyznačena předpokládaná šířka návaru, pohybující se v rozsahu 120 až 150  $\mu\text{m}$ . Hloubka průvaru (Obr. 5-13b) se bude pohybovat od 60 do 120  $\mu\text{m}$ . To znamená, že provaření bude větší než výška vrstvy, ale nebude dosahovat větších rozměrů příslušných silnému keyhole provaření.

## 5.2 Tenké stěny tvořené jedním návarem

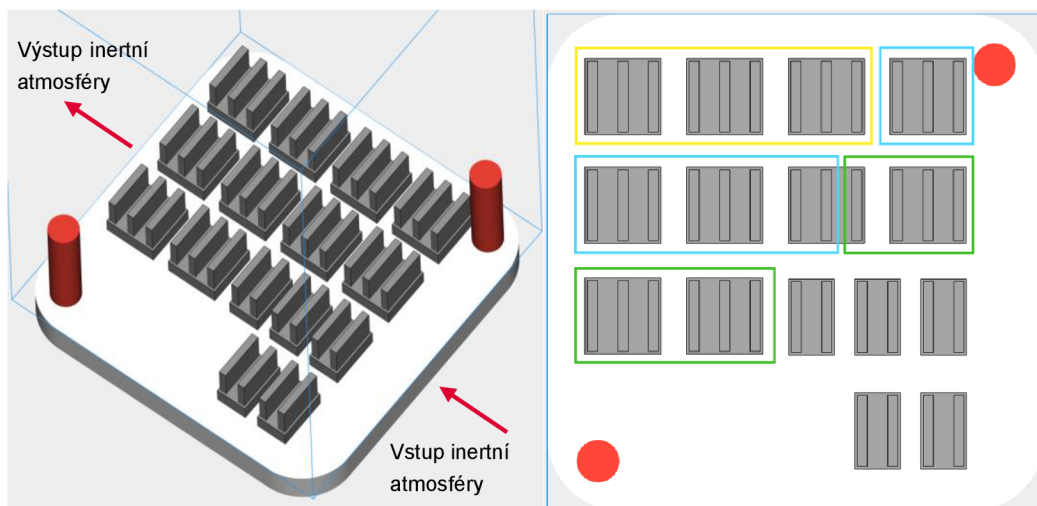
Částí této podkapitoly je vyhodnocení stěn tvořených jedním návarem. Šířka stěny je měřena v rámci metalografických výbrusů a drsnost povrchu pomocí optického mikroskopu. Dodatečným experimentem je statistická analýza DoE, aplikovaná za účelem predikce optimálních parametrů.

### 5.2.1 Vstupní parametry

Na základě perspektivní oblasti parametrů získaných v návarových testech (kap. 5.1.3), byly vybrány tři menší podoblasti. Z důvodu detailnějšího průzkumu těchto kombinací došlo k jemnějšímu rozčlenění rozsahů parametrů (Obr. 5-14). Jednalo se především o výkon laseru, který více ovlivňuje natavenou oblast, resp. hloubku průvaru. Výsledkem je výběr vhodných kandidátů z každé oblasti a následné využití v dalších experimentech. V prvním experimentu tenkých stěn bylo vyrobeno celkem 30 vzorků různých kombinací. Jejich rozložení na stavební platformě je vyobrazeno podle oblastí na Obr. 5-15. Podobně jako tomu bylo u návarových vzorků, orientace stěn byla ve směru pohybu nanášecího systému. Důvodem je minimalizování možnosti utržení stěny zarovnávacím břítem během výstavby.

Oblast A					Oblast B					Oblast C						
$E$ (J/mm <sup>2</sup> )	$v$ (mm/s)				$E$ (J/mm <sup>2</sup> )	$v$ (mm/s)				$E$ (J/mm <sup>2</sup> )	$v$ (mm/s)					
		500	600	700			800	900	1000		1100		1100	1200	1300	1400
$P$ (W)	150	6,0	5,0	4,3	$P$ (W)	250	6,3	5,6	5,0	4,5	$P$ (W)	350	6,4	4,2	3,8	3,6
	175	7,0	5,8	5,0		275	6,9	6,1	5,5	5,0		375	6,8	4,6	4,2	3,9
	200	8,0	6,7	5,7		300	7,5	6,7	6,0	5,5		400	7,3	5,0	4,6	4,3

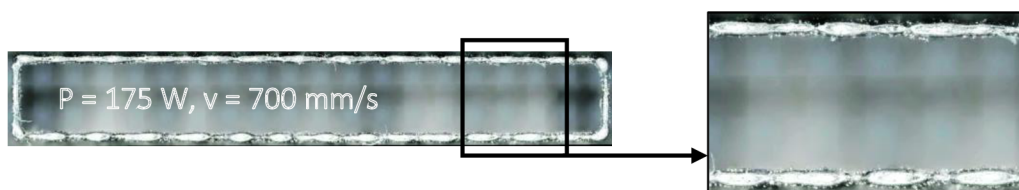
Obr. 5-14 Parametry pro test tenkých stěn



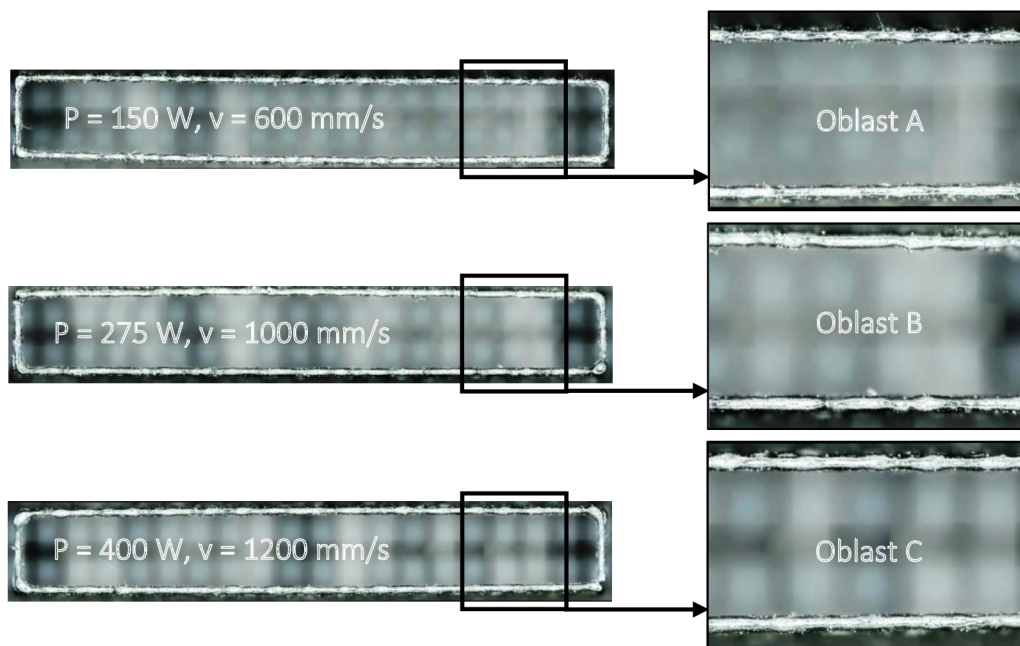
Obr. 5-15 Rozložení vzorků na platformě - test tenkých stěn 1 (vlevo); horní pohled (vpravo)

## 5.2.2 Analýza posledních návarů

Po odříznutí vyrobených vzorků z platformy byly nejprve pořízeny snímky z horního pohledu. Jednalo se o vyhodnocení kvality tvaru horního, resp. posledního návaru. Kvalita byla posuzována z hlediska kontinuity návaru a množství natavených částic v okolí stopy. Částí této analýzy by mohlo být i měření šířky stěny, ovšem z důvodu přesnějších výsledků byla použita pouze metoda metalografických výbrusů. Tím, že byly zvolené oblasti parametrů vybrány na základě výsledků návarových testů, dalo se očekávat, že většina stěn bude vykazovat kontinuitu posledního návaru. Na Obr. 5-17 jsou zobrazeny vizuálně nejkratnější poslední návary pro jednotlivé oblasti. Na základě pořízených snímků bylo možné odhadnout, u kterých stěn bude kvalita stěn vykazovat větší hodnoty drsnosti. Je to dáno rostoucí skenovací rychlostí, kdy je patrná mírná ztráta kontinuity a tvorba nepravidelných návarů, jako je zobrazeno na Obr. 5-16.



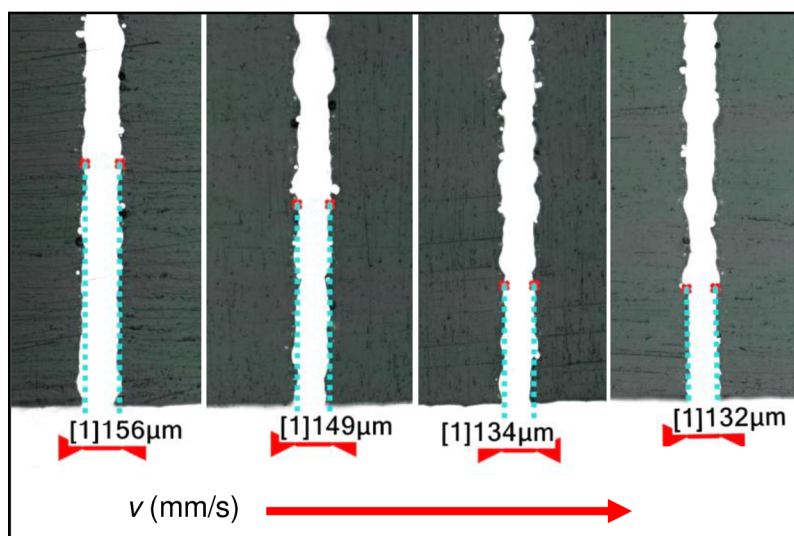
Obr. 5-16 Vzorek s nejhorší kvalitou horního návaru - TD01-006



Obr. 5-17 Vzorky s vizuálně nejlepší kvalitou horního návaru; (Oblast A - TD01-002; Oblast B - TD01-016; Oblast C - TD01-027)

### 5.2.3 Vyhodnocení šířky stěny

Podobně jako tomu bylo u návarových testů, metoda měření šířky stopy v rámci metalografických výbrusů je citlivá na volbu daného řezu a kvalité vytvořených ploch. Taktéž je ale možné v této analýze objevit defekty nacházející se uvnitř stěny, zejména porozitu materiálu. Z pořízených snímků bylo detekováno minimální množství sintrovaných částic okolo jednotlivých návarů. Pravděpodobně je to dáno opětovným roztavením při skenování nové vrstvy, což se samozřejmě mohlo projevit v mírném nárůstu šířky stěny. Hodnoty naměřených šířek stěn jsou zobrazené na Obr. 5-19. Průměrná hodnota šířky stěny je 153,4  $\mu\text{m}$ .

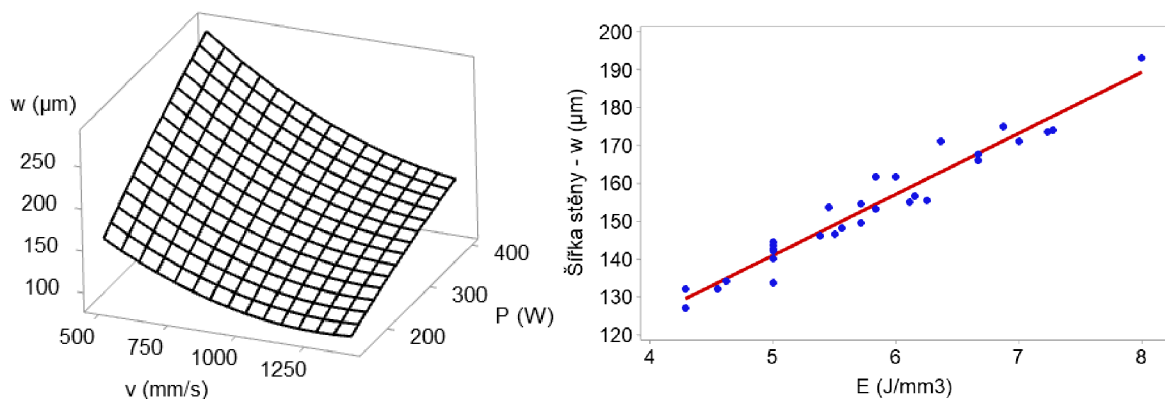


Obr. 5-18 Změna šířky stěny s rostoucí skenovací rychlostí pro  $P=250$  W

Region A					Region B					Region C						
$w$ ( $\mu\text{m}$ )	$v$ (mm/s)				$w$ ( $\mu\text{m}$ )	$v$ (mm/s)				$w$ ( $\mu\text{m}$ )	$v$ (mm/s)					
$P$ (W)		500	600	700	$P$ (W)		800	900	1000	1100	$P$ (W)		1100	1200	1300	1400
	150	162	143	127		250	156	148	134	132		350	171	153	146	145
	175	171	162	144		275	175	155	147	140		375	172	160	152	148
	200	193	166	155		300	186	174	166	162		400	174	168	157	150

Obr. 5-19 Naměřená šířka stěn testu TS č. 1

Dále lze na Obr. 5-20 vlevo pozorovat, že šířka stěny se zvyšuje s výkonem laseru a snižuje s rostoucí skenovací rychlostí. Bylo očividné, že šířka stěny bude mít podobně rostoucí trend jako v případě samotných návarů (kap. 5.1.2). To je také dokázáno na Obr. 5-20 vpravo, kde šířka stěny lineárně koreluje s rostoucí hustotou energie. Energie dodávaná do prášku a energie z předchozích vrstev přispívá k vyšší teplotě taveniny. To pozitivně ovlivňuje tavení okolního prášku v důsledku špatného vedení tepla a následuje přilepení okolních částic prášku. Tím roste šířka stěny, a také drsnost povrchu. Nicméně šířka stěny se pohybuje v rozsahu 130 až 190  $\mu\text{m}$ . To je více než samotné návary, což se dalo očekávat. Podobně jako tomu bylo ve studii Yanga [32], je možné dosáhnout výroby šířky stěny 0,15 mm.



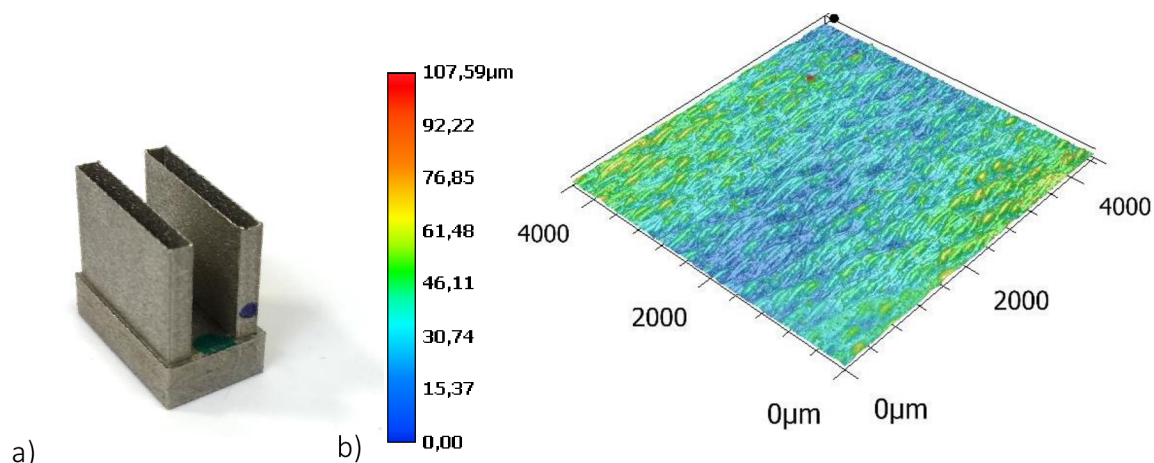
Obr. 5-20 Plošný graf závislosti šířky stěny (vlevo); Závislost šířky stěny na hustotě energie (vpravo)

## 5.2.4 Drsnost povrchu

Pro každý vzorek bylo zhotoveno měření drsnosti povrchu. K tomu bylo využito 3D snímku získaného optickým mikroskopem KEYENCE. Naměřené drsnosti povrchu pro jednotlivé parametry jsou na Obr. 5-21. Je patrné, že výkon laseru značně ovlivňuje drsnost. Pouze v jednom případě bylo dosaženo horší drsnosti než 12  $\mu\text{m}$ . Nejlepší drsnosti 6,7  $\mu\text{m}$  bylo dosaženo v oblasti B s výkonem laseru 250 W a rychlostí 800 mm/s (Obr. 5-22). Naopak rychlost 1100 mm/s v této oblasti vykazuje rapidní zhoršení drsnosti, což bylo očekáváno. Celkem nejstabilnějších hodnot kvality povrchu v rámci změny rychlosti skenování bylo dosaženo u výkonu 275 W a 350 W. Jelikož ze získaných hodnot nelze sestavit pravidelný trend, podle kterého bude možné určit relativně pravdivou predikci, byl navržen dodatečný experiment s využitím statistické analýzy Design of Experiment.

Oblast A					Oblast B					Oblast C						
$Sa$ ( $\mu\text{m}$ )	$v$ (mm/s)				$Sa$ ( $\mu\text{m}$ )	$v$ (mm/s)				$Sa$ ( $\mu\text{m}$ )	$v$ (mm/s)					
	500	600	700			800	900	1000	1100			1100	1200	1300	1400	
$P$ (W)	150	7,2	7,1	11,0	$P$ (W)	250	6,7	11,9	7,7	7,9	$P$ (W)	350	7,9	8,4	7,8	8,6
	175	10,3	8,6	8,2		275	7,1	7,5	7,7	16,1		375	8,1	7,8	8,4	11,2
	200	10,2	13,8	8,6		300	7,9	7,8	8,4	12,4		400	8,0	8,0	12,4	8,9

Obr. 5-21 Drsnost povrchu testu TS č .1



Obr. 5-22 a) vzorek TD01-010 s drsností povrchu 6, 7  $\mu\text{m}$ ; b) barevný snímek povrchu

## 5.2.5 Design of Experiment (DoE)

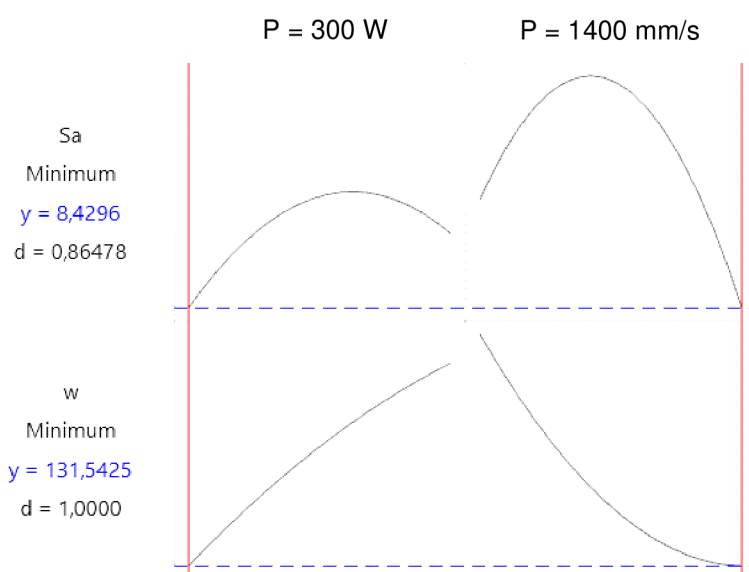
DoE neboli plánování experimentů, je matematická disciplína využívající statistická data k vytvoření experimentálních závislostí a následné predikce optimálních parametrů. Cílem tohoto experimentu je vytvoření závislosti a následné predikce drsnosti povrchu a šířky stěny s vytvořením minimálního počtu vzorků. Původně zkoumané parametry byly zahrnuty do tří oblastí získaných na základě návarových testů. Parametry mimo tyto oblasti nejsou vhodné pro výrobu tenkých stěn. Proto by nemělo smysl aplikovat DoE na všechny možné kombinace. Tudiž výsledkem jsou tři samostatné závislosti pro jednotlivé oblasti. Výstupem bude optimální kombinace parametrů pro každou oblast, jestliže existuje.

Konkrétní použitou metodou byla metoda Surface response design (SRM), kde hlavními vstupujícími faktory jsou výkon laseru a rychlost skenování. S využitím dat získaných v předchozím testu, bylo dále potřeba vyrobit pouze 12 vzorků, aby matice získaných dat byla relevantní. Nově vyrobené stěny byly podrobeny měření šířky a drsnosti povrchu. Za použití softwaru Minitab byla provedena analýza možných variací parametrů.

**Tab. 5-1** Získané kombinace parametrů s jejich predikcí

		Optimální parametry		Predikce	
		$P$ (W)	$v$ (mm/s)	$Sa$ ( $\mu\text{m}$ )	$w$ ( $\mu\text{m}$ )
Oblast A	(min. $Sa$ , min. $w$ )	171	700	9,1	142
	(min $Sa$ )	170	600	8,3	159
Oblast B	(min. $Sa$ , min. $w$ )	256	1036	8,9	137
	(min $Sa$ )	239	738	5,7	162
Oblast C	(min. $Sa$ , min. $w$ )	300	1400	8,4	132
	(min. $Sa$ )	400	1100	7,6	177

Výše uvedená tabulka vystihuje volbu ideálních parametrů a jejich predikce. Každá oblast vykazuje tvarově podobnou závislost, jak je názorně ukázáno na Obr. 5-23. Predikce spočívala v okrajových podmínkách, kdy pro jednotlivé oblasti byla aplikována nejmenší drsnost povrchu a nejmenší šířka stěny. V opačném případě pouze nejmenší drsnost. Z tabulky je patrné, že v oblasti B při parametrech  $P = 239$  W,  $v = 738$  mm/s lze dosáhnout ještě lepší drsnosti povrchu. Údajně lze také dosáhnout výroby stěny o šířce 132  $\mu\text{m}$ . Parametry získané v oblasti A jsou stejné, jako ty kterých dosáhl Balbaa [13] jako nejlepších v návarových testech. Tyto parametry byly dále ověřeny.

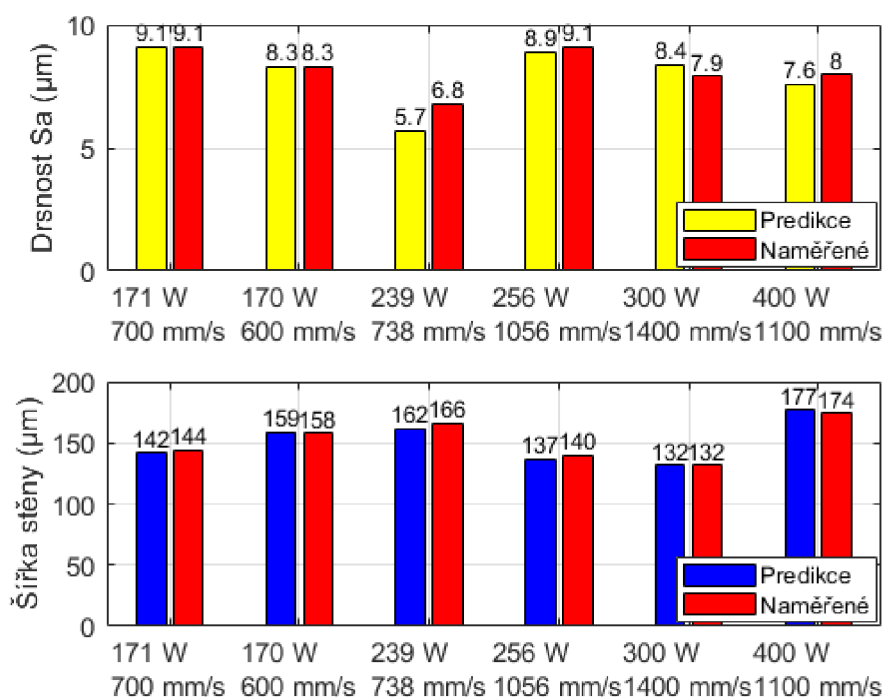


**Obr. 5-23** Predikce optimálních parametrů – oblast C (minimální  $Sa$ , minimální  $w$ )



## 5.2.6 Ověření predikce DoE

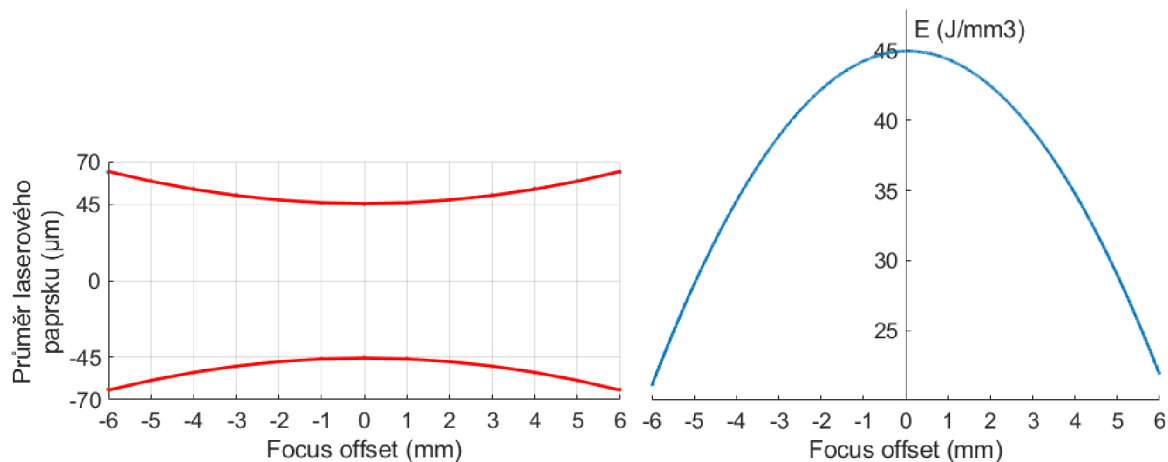
Porovnání predikovaných hodnot drsnosti povrchu a naměřených hodnot je na Obr. 5-24. Většina hodnot byla predikovaná s velkou přesností. U nejsledovanějších parametrů, které měly vykazovat nejlepší drsnost povrchu, nebylo dosaženo předpokládané drsnosti 5,7  $\mu\text{m}$ , ale pouze 6,8  $\mu\text{m}$ . Stále se ale jedná o nejlepší kombinaci parametrů. Proto pro následující testy je využito dvou kombinací, které vykazují nejlepší výsledky: i) 250 W, 800 mm/s; a ii) 238 W, 738 mm/s. Dále je možné vyrobit stěny o tloušťce 132  $\mu\text{m}$  s drsností přibližně 8  $\mu\text{m}$ . Což je tenčí stěna, než které bylo dosaženo v práci Yanga [32].



Obr. 5-24 Ověření predikce optimálních parametrů

## 5.2.7 Experiment zaostření laserového paprsku

V rámci dalšího experimentu byl zkoumán vliv posunutí laserového zaostření na tvar a kvalitu tenké stěny. Změnou hodnoty parametru focus offset došlo ke změně velikosti laserového bodu, kterým je kovový prášek taven. Změna průměru paprsku je zobrazena na Obr. 5-25 vlevo. Hodnota posunutí ohniska o 6 mm způsobí zvětšení průměru o téměř 40  $\mu\text{m}$ . Ovšem změna posunutí ovlivní i množství energie dodávané do prášku. Podle Obr. 5-25 vpravo je změna energie v rámci desítek  $\text{J}\cdot\text{mm}^{-3}$ . To by mohlo výrazně ovlivnit šířku stěny. Pro experiment byly zvoleny parametry  $P = 250 \text{ W}$  a  $v = 800 \text{ mm/s}$ .

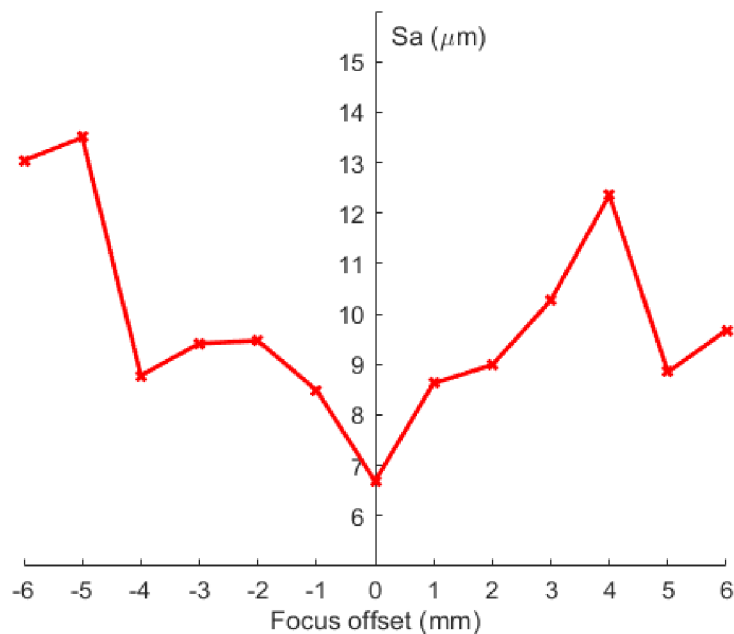


Obr. 5-25 Závislost průměru laserového paprsku (vlevo), a hustoty energie (vpravo) na parametru zaostření

Tab. 5-2 Zaostření laserového paprsku

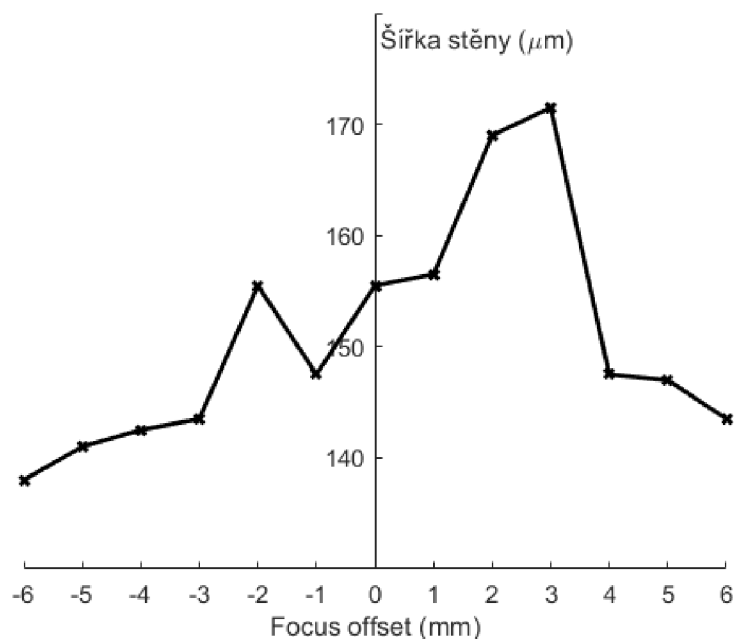
Focus offset (mm)	Průměr laserového paprsku (mm)
± 6	127,864
± 5	117,595
± 4	108,472
± 3	100,808
± 2	94,956
± 1	91,264
0	90

Získané drsnosti pro různá zaostření laseru jsou na Obr. 5-26. Je patrné, že pozitivní, ale i negativní posun ohniskové roviny nemá pozitivní vliv na kvalitu povrchu. Největší drsnosti bylo dosaženo pro zaostření -6 mm, kdy hodnota vzrostla téměř dvojnásobně. Oblast zaostření ±2 mm vypadá symetricky. V porovnání s Obr. 5-25 lze konstatovat, že se snižující hustotou energie roste drsnost povrchu. To lze vysvětlit větším laserovým bodem, který taví částice prášku v okolí skenovací stopy, čímž dochází k jejich přilepení na povrch. Tím pádem se mění i samotná šířka stěny. Hustota energie v případě tloušťky stěny nemá podobný význam na opačné zaostření jako u drsnosti povrchu. Změnou zaostření bylo dosaženo rozdílného chování vrstvení návarů na sebe, kvůli čemuž se stěny tvořily s různými tloušťkami.



Obr. 5-26 Drsnost povrchu se změnou zaostření (parametry  $P=250$  W,  $v= 800$  mm/s)

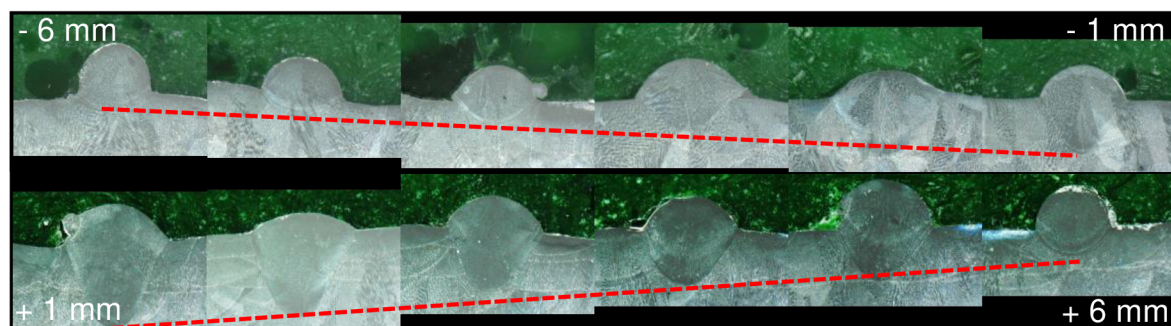
Na Obr. 5-27 je viditelná změna šířky stěny s měnícím se zaostřením. Pozitivním posunutím ohniskové roviny (-6 až -1 mm) lze dosáhnout menší šířky stěny než v případě s nulovým zaostřením. Negativní posun (+1 až +6 mm) nejprve vede k rostoucí šířce stěny, a od hodnoty +4 mm je stěna opět tenčí než s nulovým posunutím. To směřuje na hypotézu č. 1, která nebyla potvrzena z důvodu nedosažení stejné nebo lepší drsnosti povrchu. Pro lepší pochopení byl experiment doplněn o samostatné návary. Cílem bylo analyzovat tvar natavené oblasti pro různé změny zaostření.



Obr. 5-27 Šířka stěny se změnou zaostření (parametry  $P=250$  W,  $v= 800$  mm/s)

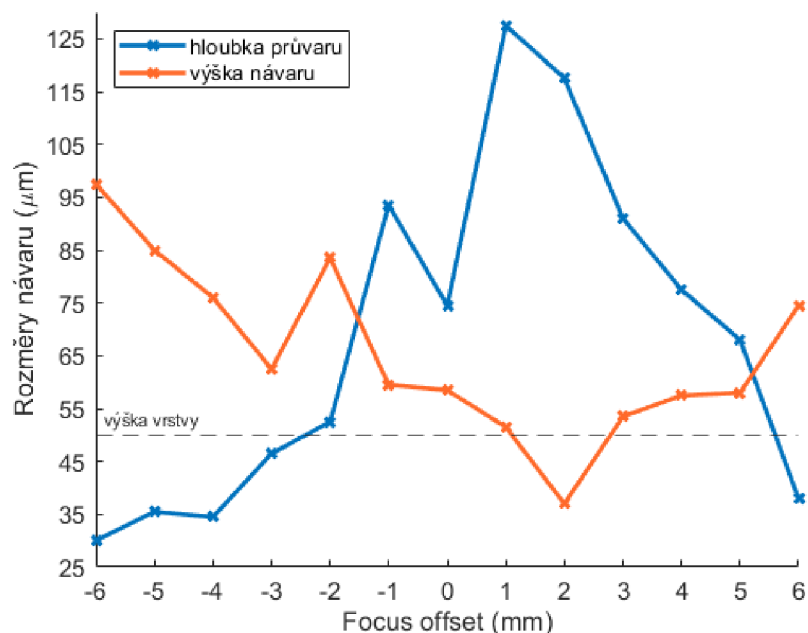
## 5.2.8 Návary se zaostřením

Z důvodu posouzení stability natavené oblasti byly vytvořeny návary se změnou zaostření. Jak je znázorněno na Obr. 5-28, výsledná morfologie taveniny se může výrazně lišit při opačných vzdálenostech zaostření, a to i navzdory identickému výkonu laseru i rychlosti skenování.



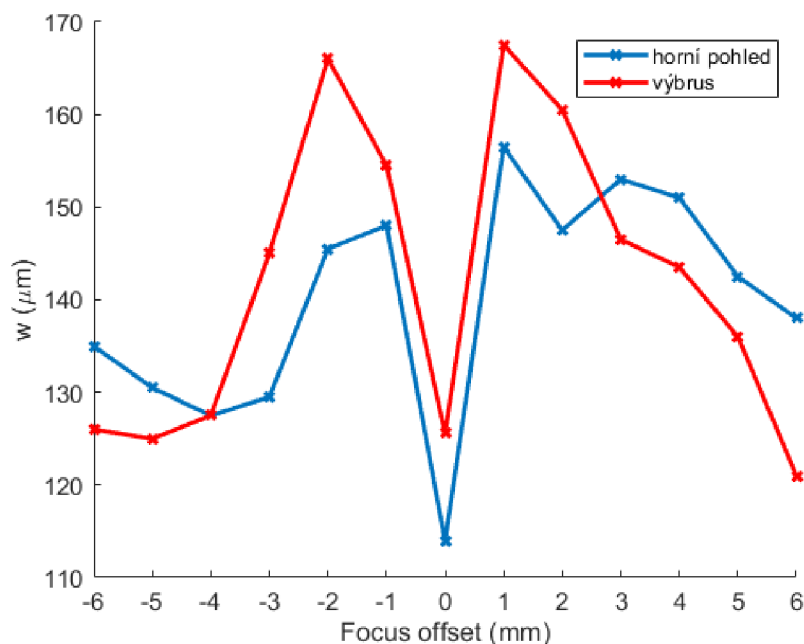
Obr. 5-28 Změna morfologie návaru se změnou zaostření

Pozitivní zaostření vede ke stabilní natavené oblasti v conduction režimu, zatímco negativní posun vytvořil hluboký keyhole průvar. Žádný z návarů nevykazoval viditelnou pórovitost. Porovnáním hloubky průvaru se změnou zaostření (Obr. 5-29), vede negativní zaostření k výrazně hlubšímu provaření, až na 2,5x násobek výšky vrstvy. To má za následek větší akumulaci tepla díky většímu dosahu natavené oblasti. S ohledem na šířku stěny (Obr. 5-27), lze konstatovat, že tak velké provaření pravděpodobně ovlivňuje i samotnou šířku stěny, která je této v oblasti také na vzestupu.



Obr. 5-29 Rozměry návaru se změnou zaostření

Na rozdíl od hloubky průvaru se zdá, že šířka návaru nemá výrazný vliv na šířku stěny. Vzhledem ke konstantnímu výkonu laseru a skenovací rychlosti je očekávána změna šířky návaru se změnou hustoty energie. Podle Obr. 5-30 se šířka návaru mění podobně pro stejné hodnoty rozdílného typu zaostření. Nejmenší šířky návaru bylo dosaženo pro nulové zaostření. S posunem ohniskové roviny do  $\pm 2$  mm šířka roste, a poté rapidně klesá. A právě na hodnotě  $\pm 2$  mm je možné identifikovat téměř 1,5x násobek šířky návaru s nulovým zaostřením.



Obr. 5-30 Šířka návaru se změnou zaostření

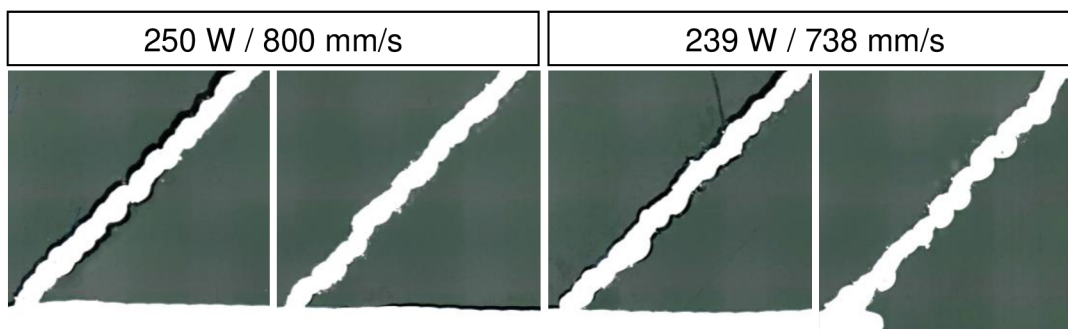
### 5.2.9 Test stěny pod úhlem

Další část práce byla věnována analýze stěn svírajících s platformou stavební úhel  $45^\circ$ . Cílem bylo ověřit využití získaných parametrů z testu kolmých stěn. Testovanými kombinacemi parametrů byly: i) 250 W, 800 mm/s; a ii) 239 W, 738 mm/s. Tyto parametry vykazovaly nejlepší výsledky pro kolmé stěny. Jak je vidět na Obr. 5-31, stěny se podařilo vyrobit bez výrazných defektů. Kvalita posledního návaru odpovídá podobnému tvaru a kontinuitě jako v případě kolmých stěn. Z prvního pohledu je možné usoudit, že stěnu pod úhlem  $45^\circ$  je možné vyrobit, aniž by došlo k propadu nějakého návaru do prášku, čímž by došlo k destrukci celé stěny.

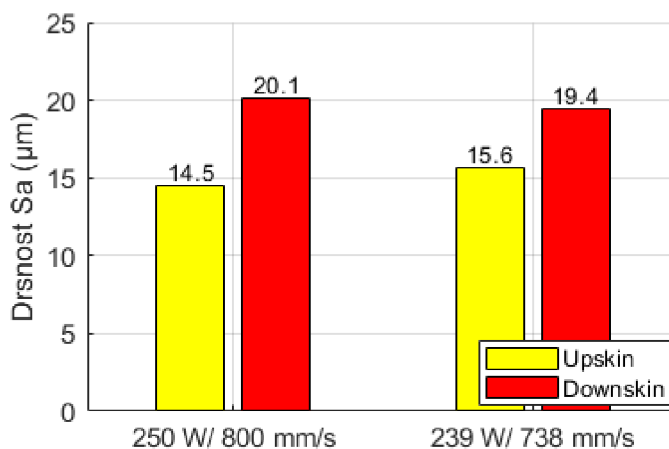


Obr. 5-31 Tenká stěna pod úhlem 45°

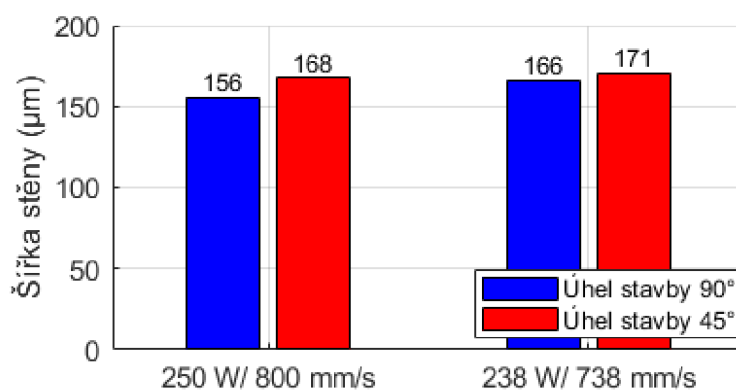
Kvalita stěny je viditelná na výbrusu na Obr. 5-32. V žádném místě stěny nedošlo k přerušení návaru či velkému propadu do prášku. Stěny také neobsahují žádnou viditelnou porozitu. Drsnost povrchu byla měřena na spodní ploše (downskin) a horní ploše (upskin). Porovnání obou drsností je na Obr. 5-33. Jak bylo předpokládáno, spodní plocha vykazuje horší kvalitu povrchu. V porovnání s kolmou stěnou drsnost povrchu vzrostla o 7, resp. 14  $\mu\text{m}$ . Samozřejmě se stavebním úhlem 45° se předpokládá největší drsnost povrchu. Tudíž s větším úhlem je očekáváno značné zlepšení kvality. V případě menších úhlů je pak vyžadováno využití podpurných struktur. Průměrná šířka stěny pro obě kombinace parametrů se pohybuje okolo 170  $\mu\text{m}$ . V porovnání s kolmými stěnami se nejedná o velký rozdíl (Obr. 5-34). Mírný nárůst je očekáván z důvodu propadu natavené oblasti do prášku.



Obr. 5-32 Metalografický výbrus stěny pod úhlem 45° tvořené jedním návarem



Obr. 5-33 Analýza drsnosti povrchu pro TS pod úhlem 45°



Obr. 5-34 Porovnání tloušťky stěny vzorků stavěných kolmo a pod úhlem

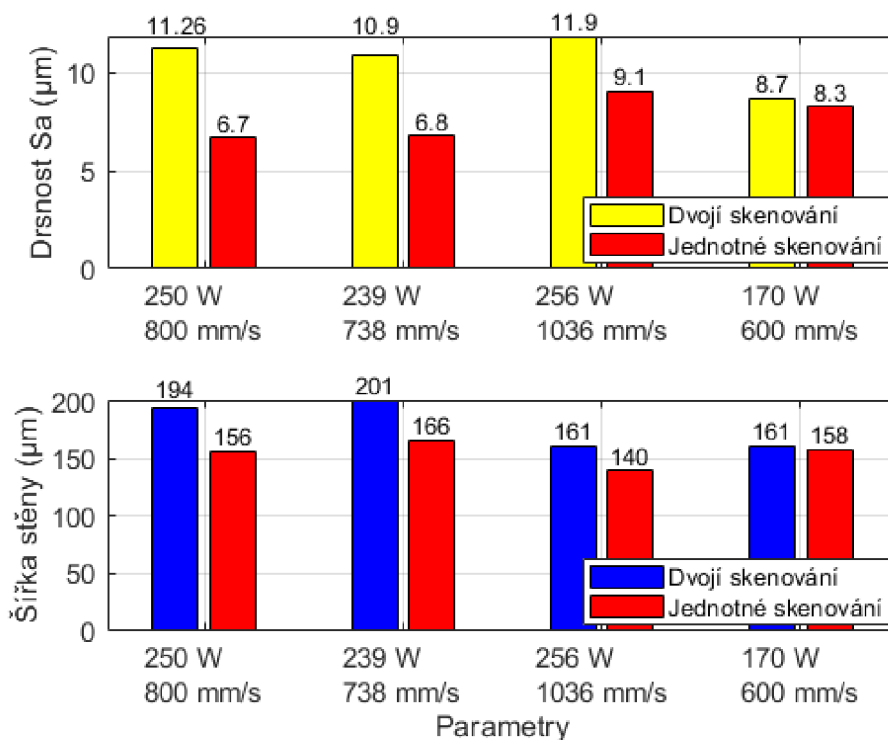
### 5.2.10 Stěna tvořená dvojím skenováním laseru

Jelikož software používaný pro generování výrobních dat neumožňuje lehce aplikovat stěnu tvořenou jedním návarem, resp. jednotným skenováním, na díl obsahující složité komplexní geometrie, byl navržen experiment na výrobu stěny pomocí dvojího skenování. To znamená projetí laseru dvakrát jednou skenovací stopou. Očekává se změna morfologie stopy z důvodu opětovného protavení. Tím dojde k růstu teplotního gradientu a natavení větší oblasti. Čímž by mohlo dojít k pozitivnímu ovlivnění šířky stěny a také drsnosti povrchu. Testovanými parametry byly kombinace získané v kap. 5.2.5.

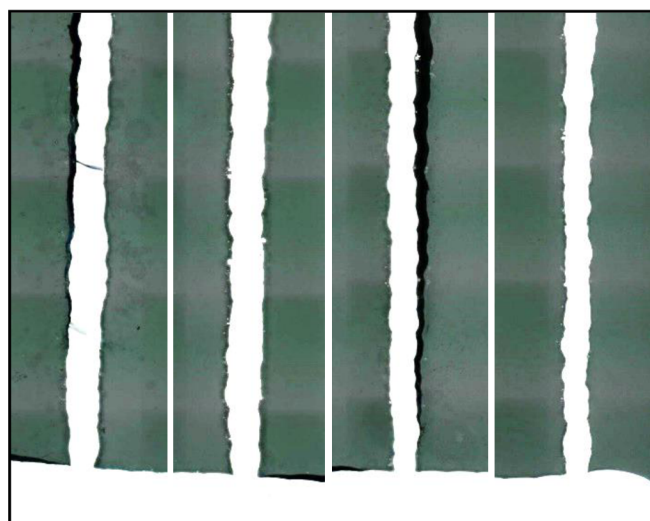


Obr. 5-35 Stěna tvořená dvojím skenováním laseru

Na Obr. 5-35 je ukázka vyrobené stěny dvojím skenováním. Na první pohled je vidět výrazný rozdíl v drsnosti povrchu. To je také dokázáno na Obr. 5-36 nahoře. Zde je patrný značný nárůst drsnosti v porovnání se stěnami tvořenými pouze jedním skenováním. Dále je vidět nárůst šířky stěny. Dvojí skenování způsobilo kumulaci většího množství energie a tím tvorbu větší natavené oblasti. To ukazují také hodnoty na Obr. 5-36 dole. Pro první dvě kombinace parametrů přineslo dvojí skenování nárůst tloušťky téměř o 40 μm. To lze vysvětlit množstvím hustoty energie dodávané do prášku o velikosti přibližně 6,4 J/mm<sup>2</sup>, což je více než u zbylých dvou kombinací. Metalografickým výbrusem (Obr. 5-37) nebyla zjištěna porozita vznikající při dvojím natavení.



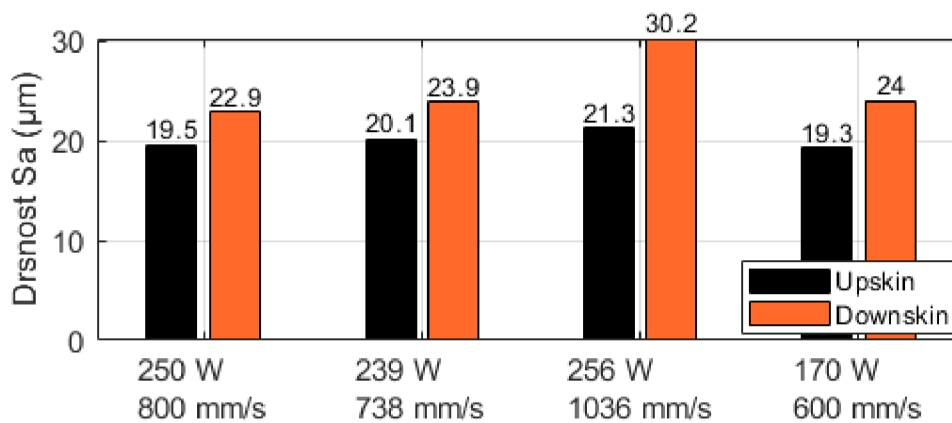
Obr. 5-36 Porovnání kolmých stěn tvořených dvojitým a jednotným skenováním z hlediska drsnosti povrchu a šířky stěny



Obr. 5-37 Metalografický výbrus stěny tvořené dvojitým skenováním

Stěny tvořené dvojitým skenováním byly také podrobeny změnou stavebního úhlu. Podobně jako v kap. 5.2.9 byl použit úhel  $45^\circ$  vzhledem k platformě. Na Obr. 5-38 jsou naměřené drsnosti povrchu pro opačné plochy. V porovnání s kolmými stěnami horní plocha vykazuje téměř dvojnásobek hodnoty drsnosti. Spodní plocha ještě o trochu více. Zajímavé je, že spodní plocha má v porovnání se stěnou tvořenou jedním skenováním podobnou kvalitu povrchu. Naopak horní plocha je dvojitým skenováním ovlivněna více.



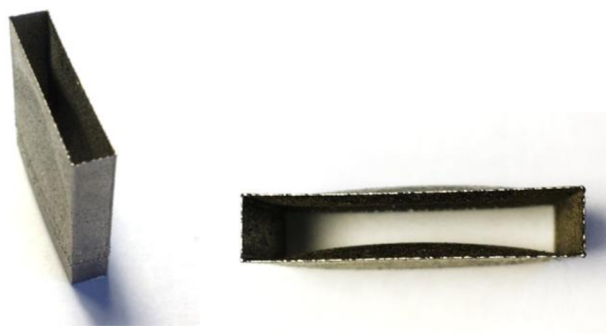


Obr. 5-38 Analýza drsnosti spodní a horní plochy stěn tvořených dvojím skenováním

### 5.2.11 Experiment délky skenování

Tento dodatečný experiment byl stanoven na základě výsledné analýzy testovacího vzorku pro tlakovou zkoušku. Vzorek tenké stěny obdélníkového tvaru o velikosti 24 x 24 mm byl podroben značně velké plastické deformaci. Stěny obou návarů, jak ukazuje Obr. 5-39, jsou vybočeny do stran. Pravděpodobně je to dáno příliš velkou laserovou energií, kdy vzniká velký teplotní gradient a v důsledku nedostatečného chladnutí dochází k vnitřnímu pnutí a následné deformaci. Chlazení je ovlivněno také tloušťkou stěny. Čím větší je šířka, tím lepší je odvod tepla a celkové chladnutí natavené oblasti.

Tento jev by mohl mít výrazný vliv na návrh tenkostěnných struktur s delšími stěnami. Snížením laserové energie by mohlo dojít k menším deformacím, ovšem z důvodu již odladěných parametrů nelze tuto hodnotu měnit. Další variantou je změnit dobu chladnutí každé naskenované vrstvy. To lze aplikovat pouze manuálně přímo při výrobě. Po skenování každé vrstvy by byla nastavena určitá prodleva. Za tuto dobu by mohlo dojít k tvorbě menšího tepelného gradientu, a nemuselo by docházet k deformacím. Původní vzorek byl vyroben s nanášecí dobou 11 sekund a skenovacím časem 6 sekund. To je celkem 17 sekund na jednu vrstvu. Dále byl proveden experiment maximální možné délky skenování. Celkem byly porovnány různé délky stěn pro rozdílné šířky za účelem analyzování příčiny vzniku deformace a její možné minimalizace.



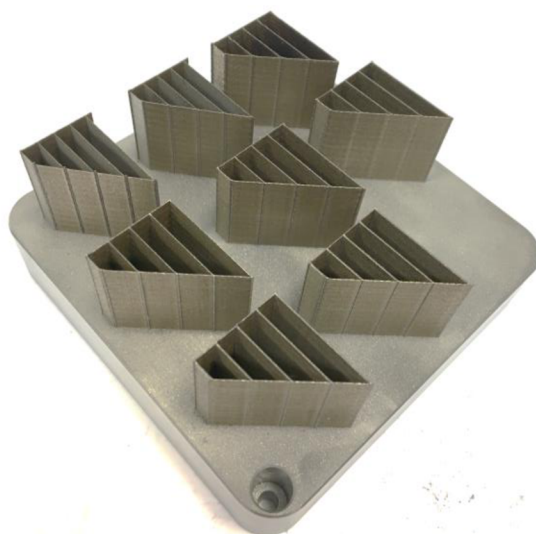
Obr. 5-39 Deformace tenké stěny

Experiment spočívá ve výrobě samostatných stěn délky 5 až 25 mm s roztečí 5 mm a výšce 25 mm. Testované parametry s předem definovanými tloušťkami stěn jsou v Tab. 5-3. V rámci dvou parametrů bylo použito jednotné i dvojité skenování. Větší šířky byly vyrobeny s vnitřním šrafováním (viz kap. 5.3). Cílem je nalézt maximální možnou délku stěny o různých šířkách. Dále analyzovat chování šířky stěny s rozdílnou délkou stěny a její potenciální deformací. To by mohlo přinést použitelné informace při návrhu tenkostěnných dílů. Analýza proběhla pouze vizuálně na stavební platformě ihned po stavbě.

**Tab. 5-3** Vstupní parametry pro experiment maximální délky skenování

Šířka stěny (mm)	Skenovací strategie	Parametry kontury (W / mm/s)
0,13	jednotné	300/1400
0,15	jednotné	250/800
0,16	dvojité	170/600
0,25	kontura + jádro	250/800
0,3	kontura + jádro	250/800
0,35	kontura + jádro	250/800
0,4	kontura + jádro	250/800
0,45	kontura + jádro	250/800

První stavba nepřinesla očekávané výsledky. Bylo zjištěno, že tak tenké stěny o výšce 25 mm není možné postavit. Od neurčité výšky docházelo k vyhnutí stěny do strany, a tím k nesprávnému skenování nové vrstvy. Laser naskenoval danou vrstvu a při následujícím nanesení nového prášku byla ztuhlá část odejmuta břitem pryč z platformy. To také ovlivnilo ostatní vzorky. Proto byl experiment opakován s přidáním výztuh. Tím bylo dosaženo dostatečné tuhosti stěny a bylo možné je vyrobit. Na Obr. 5-40 je pohled na stavební platformu s vyhotovenými vzorky.

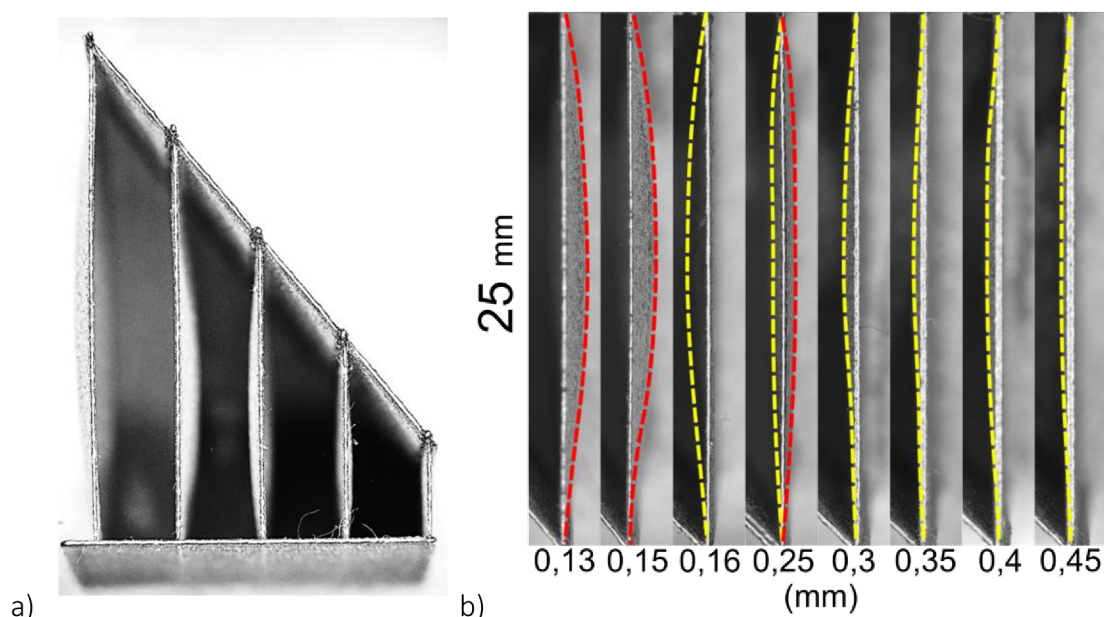


**Obr. 5-40** Přidané výztuhy tenkých stěn

Skenovací čas byl 11 sekund a doba nanášení nové vrstvy prášku 16 sekund. V porovnání s minulou stavbou se jedná o 11sekundovou prodlevu. Ovšem nebyl prokázán výrazný vliv doby chladnutí na deformaci stěny. Hlavní rozdíl byl identifikován v tloušťce stěny. Na Obr. 5-41a je pohled na nejvíce deformované stěny s tloušťkou 0,13 mm. Je patrné, že dochází k deformaci v rámci všech testovaných délek. Spolu s Obr. 5-41b je možné vidět, že s rostoucí šířkou stěny dochází ke zmenšení průhybu, jak se očekávalo. V příloze 3 jsou pak zobrazeny snímky horního pohledu na všechny testované stěny.

Výsledky naznačují, že nezdeformované stěny je možné dosáhnout s délkou 20 mm od šířky 0,3 mm. Delší stěny jsou vždy podrobeny plastické deformaci. Naopak s nejtenčí možnou stěnou 0,13 mm dochází k deformaci už při délce 10 mm. Délka stěny okolo 5 mm je dostatečná pro všechny testované šířky. Řešením delších stěn by mohlo být přidání výztuh, a tím zkrácení její délky. Zajímavým úkazem je formování deformace stěny šířky 0,16 mm, která byla vyrobena dvojím skenováním. Zde dochází k menší deformaci než v případě stěny 0,25 mm. Pravděpodobně je to dáno opětovným protavením materiálu, kdy dochází ke zvýšení meze kluzu. Při návrhu tenkostěnných součástí je potřeba vzít v úvahu výše uvedené poznatky.

Na základě analýzy možných důvodů vzniku deformací byla vyslovena hypotéza, která poukazuje na iniciaci deformace stěny až po její výrobě. V případě deformace stěny již v průběhu stavby, by nebylo možné stěnu vyrobit v důsledku nepravidelného vrstvení návarů na sebe. K tomu ovšem nedošlo. Stěny vykazují pravidelné návary, jak je vidět na Obr. 5-41b. Proto lze připsat okamžik deformování do časového úseku až po dokončení stavby, kdy by mohla hrát hlavní roli kombinace teploty a brzkého vytažení ze stavební komory. V tomto momentu pravděpodobně došlo k relaxaci vnitřního pnutí ve formě průhybu stěny. Tuto hypotézu již nelze v rámci této práce ověřit.



Obr. 5-41 a) Vzorek se šířkou stěn 0,13 mm; b) deformace stěny délky 25 mm pro rozdílné šířky (pohled shora)

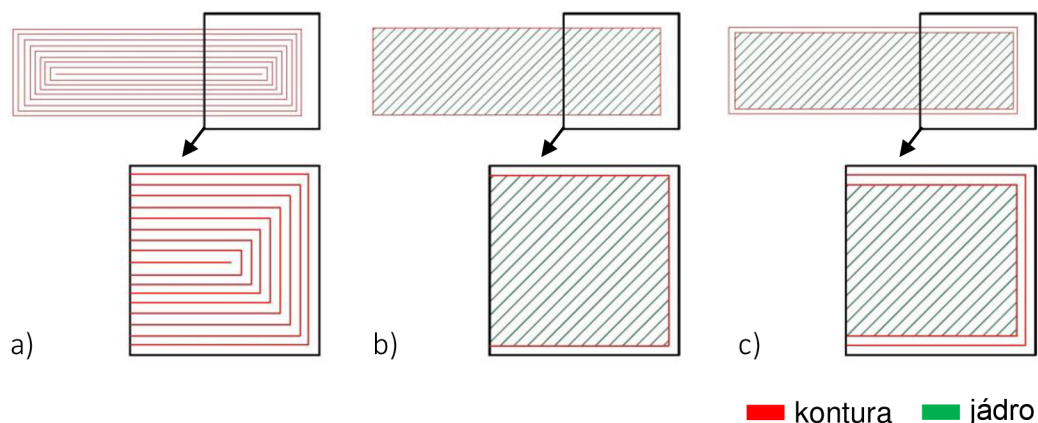
## 5.3 Testy stěn větších šířek

V rámci hledání průniku parametrů tenkostěnné a objemové geometrie, sloužící pro komplexní geometrie, byly testovány parametry TS také na stěny větších šířek. Jednalo se zejména o oblast kontury, kde by mohly být tyto parametry použitelné z hlediska nízké drsnosti povrchu jako v případě tenké stěny tvořené jedním návarem.

### 5.3.1 Příprava a popis experimentu

Zkoumány byly celkem tři různé konfigurace skenovacích strategií pro šířky stěn 0,5, 1 a 2 mm (Obr. 5-42). Skenovací strategií jádra byla použita strategie meander. Rozdíly obrysových strategií se liší z hlediska počtu kontur. Dodané parametry od SLM Solutions pro materiál IN 718 používají dvě kontury a vnitřní šrafovaní strategií stripes. Vliv počtu kontur může mít vliv na kvalitu stěn z důvodu rozdílného odvodu tepla z natavené oblasti v kontaktu s práškem. Jelikož vnější obrysová kontura je skenována jako poslední, zbytek skenovacího vzoru může ovlivnit i kvalitu povrchu.

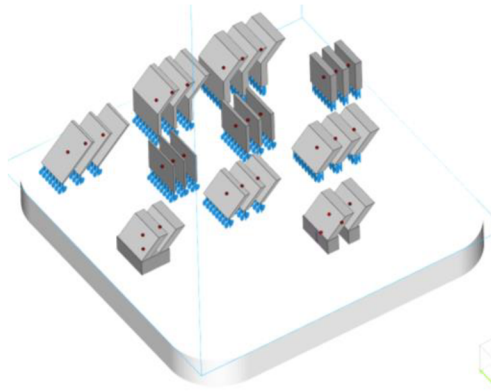
Použité procesní parametry jsou zobrazeny v Tab. 5-4. Odsazení mezi konturami je definováno parametrem beam compensation (dále jen *BC*). Příliš velké odsazení zvyšuje množství podpovrchové porozity v důsledku špatného překrývání mezi stopami jádra a obrysovými konturami. To by mohlo poškodit mechanické vlastnosti součásti. Proto byla aplikována hodnota  $BC = 0,08$  mm, která činí polovinu průměrné šířky návaru získané v kap. 4.4.2. Tím je dosaženo dostatečného překrytí drah. Parametry jádra byly stavěny s parametry dodanými výrobcem SLM Solutions, kde se se šrafovací vzdáleností  $H = 0,12$  mm vyskytuje porozita menší než 0,15 %. Skenovací strategie *O/I* (*Outer/Inner*) znamená aplikování kontur bez vnitřního šrafovaní. Mezi testované geometrie byly zařazeny i šikmé stěny, resp. stěny pod stavebním úhlem  $45^\circ$ . Zde se předpokládá horší kvalita na spodním povrchu. Pohled na stavební platformu a rozložení vzorků testovací sady č. 3 je na Obr. 5-43.



Obr. 5-42 Příklad rozdílných skenovacích strategií; a) pouze kontury; b) 1 kontura; c) 2 kontury

Tab. 5-4 Parametry pro test stěn o šířce 0,5; 1; a 2 mm

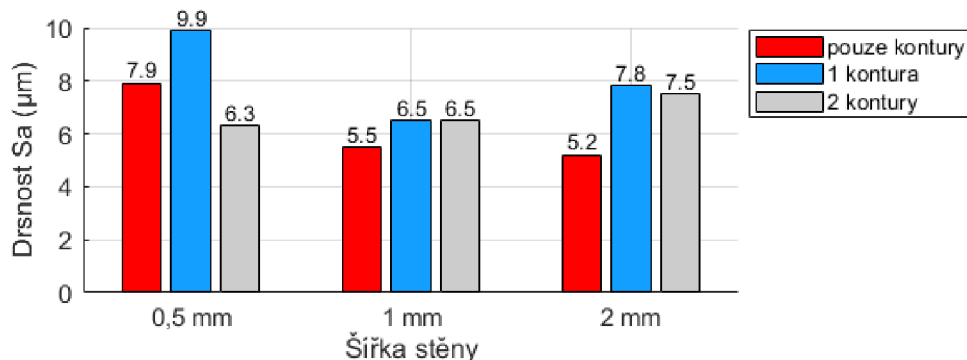
	Skenovací strategie/ počet kontur	Parametry kontury			Parametry jádra		
		Výkon laseru - $P$ (W)	Rychlost skenování - $v$ (mm/s)	Beam compensation - $BC$ ( $\mu\text{m}$ )	Výkon laseru - $P$ (W)	Rychlost skenování - $v$ (mm/s)	Šrafovací vzdálenost - $H$ ( $\mu\text{m}$ )
a	O/1	250	800	80	-	-	-
b	1	250	800	80	275	760	120
c	2	250	800	80	275	760	120



Obr. 5-43 Rozložení vzorků na platformě - test TS č. 3

### 5.3.2 Analýza drsnosti povrchu kolmé stěny

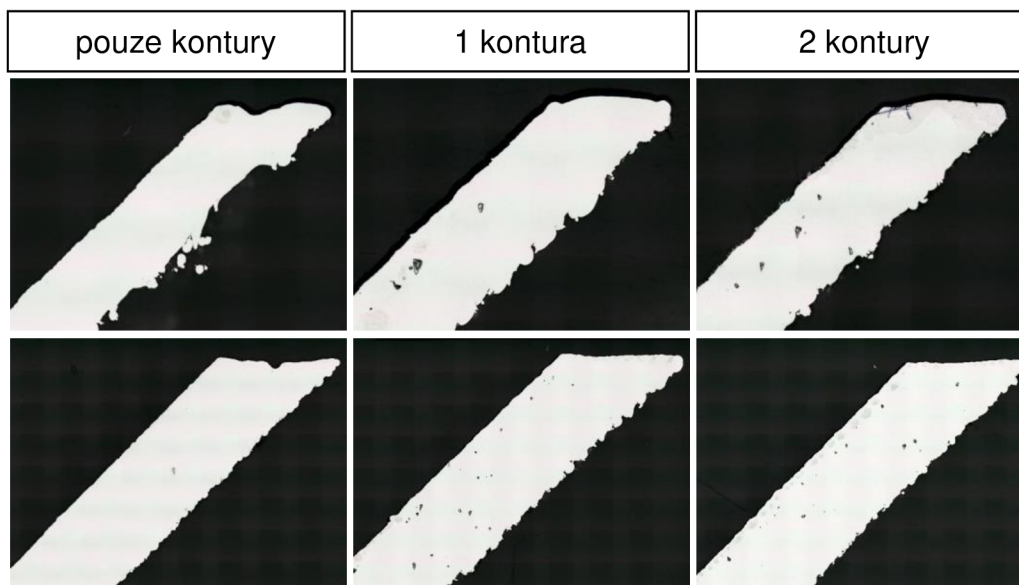
Naměřené drsnosti povrchu kolmých stěn pro rozdílné skenovací strategie jsou na Obr. 5-44. Šířka stěny 0,5 mm vykazuje horší kvalitu povrchu oproti větším šířkám. Pravděpodobně je to dáno horším odvodem tepla, čímž dochází k akumulaci energie v rámci malé oblasti. Strategie tvořená pouze konturami vykazuje nejlepší drsnost ze všech testovaných strategií, zejména pro šířku 1 a 2 mm. To by mohlo být dáno rovnoměrným rozložením odvodu tepla při skenování rovnoběžných stop. Ve strategii s jádrem tento jev není, protože dochází k pravidelné změně směru laseru v oblasti kontury z důvodu počáteční rotace vnitřního šrafování. Dále rozdíl mezi počty kontur se nezdá být významný. Využití konturové strategie se jeví jako efektivní při výrobě součástí se stěnami většími než 1 mm. Ovšem pro menší tloušťky se zdá být tato strategie nevhodná.



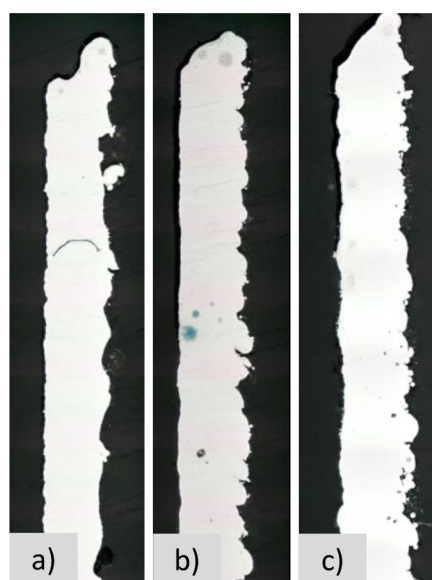
Obr. 5-44 Drsnost povrchu kolmých stěn pro rozdílné šířky a strategie

### 5.3.3 Analýza drsnosti povrchu šikmé stěny

Měření drsnosti povrchu stěny pod úhlem  $45^\circ$  přineslo výrazné zhoršení kvality spodní plochy. Porovnání metalografických výbrusů pro šikmé stěny je na Obr. 5-45 a Obr. 5-46. Již od pohledu je patrné, že krajní stopy jsou ovlivněny tvorbou strusky a jejího propadu do podkladového prášku v důsledku vysoké absorpce hustoty energie. V případě skenovací strategie tvořené pouze konturami je povrch výrazně nejhorší pro stěny 0,5 a 1 mm. Naopak pro šířku 2 mm vypadá spodní plocha nejlépe. Vizuálně nejlepšího povrchu bylo dosaženo pro šířku stěny 2 mm v rámci všech skenovacích strategií.

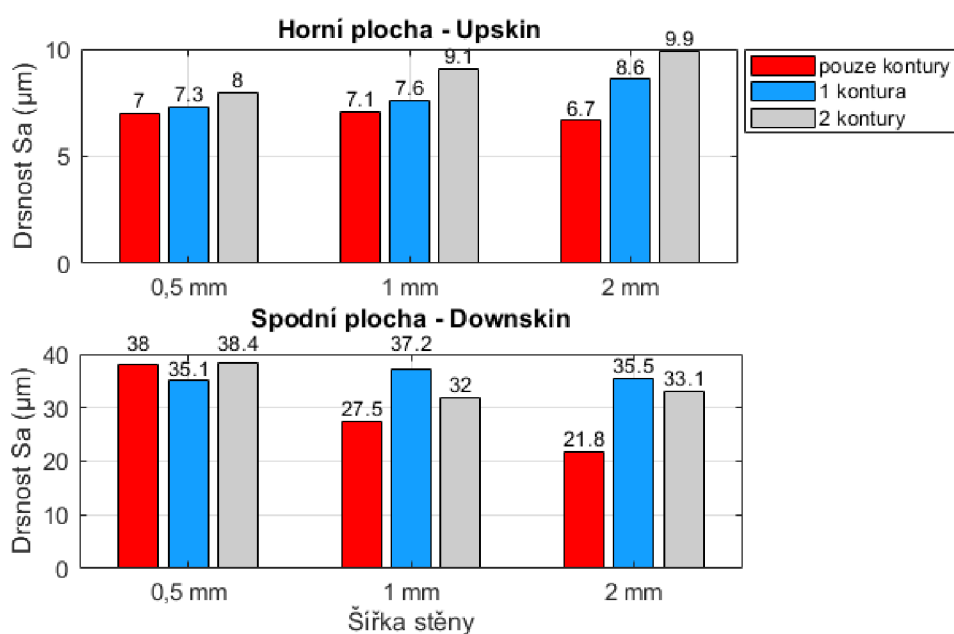


Obr. 5-45 Výbrus stěny šířky 1 mm (horní řada) a 2 mm (spodní řada) s rozdílnými strategiemi



Obr. 5-46 Výbrus stěny šířky 0,5 mm pro strategie: a) pouze kontury; b) jedna kontura; c) dvě kontury

V porovnání s naměřenými drsnostmi (Obr. 5-47) je opět konturová strategie nejlepší pro horní plochy stěn, kde bylo dosaženo nejmenší drsnosti ze všech použitých strategií. Průměrná drsnost horní plochy se pohybuje, podobně jako tomu bylo u kolmých stěn, v rozsahu 7 až 10  $\mu\text{m}$ . Pro všechny testované šířky stěny se použití jedné obrysové kontury jeví jako efektivnější z hlediska kvality horní plochy. Opakem je spodní plocha, kde tato strategie vykazuje horší drsnost. Použitím dvou kontur je možné dosáhnout lepšího odvodu tepla, a tím tvorby menšího množství strusky. Variantou je také optimalizace oblasti spodní převislé plochy a tím snížení drsnosti. Proto byl dále proveden experiment optimalizace spodního povrchu parametrem downskin na vzorky s jednou konturou.



Obr. 5-47 Drsnost spodní a horní plochy stěn pod úhlem pro rozdílné šířky a strategie

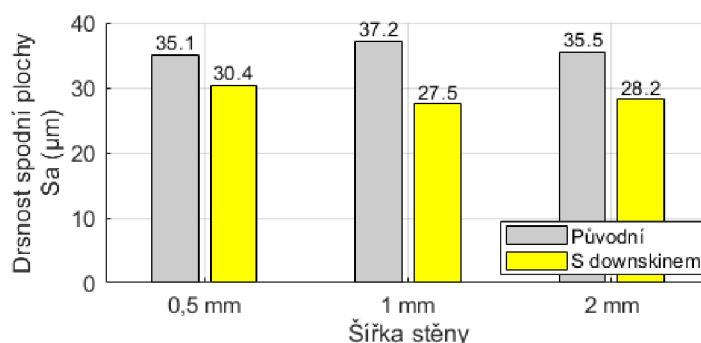
### 5.3.4 Optimalizace kontury parametrem downskin

Potenciálního zlepšení povrchu je možné dosáhnout naskenováním převislé oblasti jinými parametry než v případě zbylé části součásti. Skupina parametrů downskin byla nastavena podle parametrů od dodavatele SLM Solutions. Jejich zobrazení je v Tab. 5-5. Tyto parametry jsou určeny hustotou energie 28  $\text{J}/\text{mm}^3$ , což je oproti konturové strategii o 40  $\text{J}/\text{mm}^3$  méně. Na základě rešerše by to mohlo být efektivní pro zlepšení kvality povrchu. Cílem optimalizace je najít vhodné využití v kombinaci s parametry obrysové kontury a následného zdokonalení povrchu.

Porovnání nově získaných hodnot drsností s původními hodnotami bez optimalizačního parametru je na Obr. 5-48. Je patrné, že nově aplikovaný soubor parametrů downskin přispěl k mírnému zlepšení kvality povrchu. Průměrná drsnost klesla o 5 až 10  $\mu\text{m}$ . V porovnání se strategií dvou kontur bylo dosaženo lepší kvality povrchu. Proto je dále využití jedné kontury výhodnější jak pro kolmé stěny, tak i pro šikmé z pohledu horní i spodní plochy.

Tab. 5-5 Downskin parametry od výrobce

Výkon laseru <i>P</i> (W)	Rychlost skenování <i>v</i> (mm/s)	Layer reference (-)	Hatch offset <i>HO</i> (μm)
100	1200	3	60



Obr. 5-48 Naměřené drsnosti s parametrem downskin

### 5.3.5 Rozměrová přesnost kolmých stěn

S drsností povrchu souvisí i rozměrová přesnost vzorků. Zejména pak u šikmých stěn, kde je povrch ovlivněn struskou. Naměřené hodnoty šířek pro kolmé stěny jsou v Tab. 5-6 a pro šikmé stěny v Tab. 5-7. Nejvíce ovlivněnými stěnami jsou kolmé stěny o šířce 0,5 a 1 mm tvořené pouze konturami. Zde je šířka stěny téměř o 0,1 mm menší. V oblasti 2 mm stěny je šířka pro všechny strategie podobná s rozdílem pouze pár setin milimetru. U kolmých stěn se vždy jedná o menší naměřenou hodnotu, a to pravděpodobně díky smrštění materiálu. Pro dosažení přesnějších hodnot by bylo možné zvětšit hodnotu *BC*. Ovšem příliš velká hodnota může způsobit nedostatečné překrytí kontur, a tím tvorbu podpovrchové porozity. Naopak u šikmých stěn šířky přesahují požadovanou hodnotu. Eliminací tohoto jevu je snížení drsnosti povrchu. Pro řešení této práce jsou hodnoty dostačující a není dále řešena jejich optimalizace.

Tab. 5-6 Naměřené šířky kolmých stěn

Skenovací strategie/ počet kontur	Šířka stěny		
	0,5 mm	1 mm	2 mm
O/I	0,410	0,848	1,945
1	0,463	0,952	1,953
2	0,464	0,951	1,956

Tab. 5-7 Naměřené šířky stěn pod úhlem 45°

Skenovací strategie/ počet kontur	Šířka stěny		
	0,5 mm	1 mm	2 mm
O/I	0,440	0,860	2,008
1	0,563	1,073	2,052
2	0,520	1,026	2,002



### 5.3.6 Vyhodnocení relativní hustoty materiálu stěn

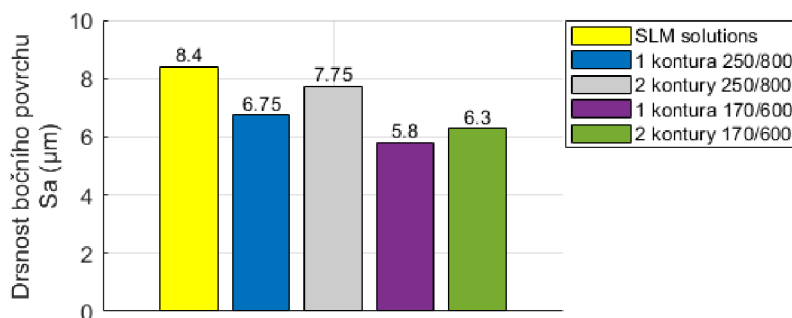
Měření porozity v metalografickém výbrusu (Obr. 5-45) ukázalo, s jakou kvalitou materiálu byly vzorky vyrobeny. Cílem bylo identifikovat možnou podpovrchovou porozitu např. z důvodu špatně zvolené vzdálenosti mezi konturami (*BC*) nebo nedostatečným překrytím vnitřní kontury a jádra. V některých místech stěn se vyskytují viditelně velké póry o velikosti až 70  $\mu\text{m}$ . To lze připsat výrobnímu procesu, kdy došlo k výraznému zhoršení kvality filtru oběhového systému, a tím i k horšímu odvodu spalin. Tento fakt byl potvrzen v kap. 5.4.2, kde s pohlídaným stavem filtru během výstavby se již póry neobjevily. Podpovrchová porozita nebyla dále identifikována, a proto je možné označit  $BC = 0,08 \text{ mm}$  jako dostačující. Celková hustota všech vzorků tenkých stěn se pohybuje okolo 99,76 %.

## 5.4 Vyhodnocení objemových vzorků

Z důvodu možného průniku parametrů tenkostěnné a objemové geometrie byly testovány parametry tenkých stěn na oblast kontury objemových dílů. To by mohlo být efektivní pro společný soubor parametrů, který je možné aplikovat na celou komplexní součást tvořenou oběma geometriemi.

### 5.4.1 Porovnání s parametry od dodavatele

Podobně jako tomu bylo v kap. 5.3, byly testovány dvě skenovací strategie obrysových kontur lišící se pouze v jejich počtu. Parametr „fill contour“, kterým lze opětovně natavit oblast kontaktu kontury a jádra, byl stejně jako u stěn vypnutý. Pro stěny větších šířek se jeví použití jedné kontury lépe z hlediska drsnosti jak kolmých, tak šikmých stěn. Proto je očekáváno podobného výsledku i u objemových vzorků. Drsnost povrchu objemových dílů vytvořených parametry od SLM Solutions dosahuje hodnoty 8,4  $\mu\text{m}$ . Porovnání s parametry TS definovaných na oblast kontur je na Obr. 5-49. Všechny nové obrysové skenovací strategie dosahují lepší kvality povrchu. Použitím jedné kontury bylo opět dosaženo nejlepších výsledků. Naměřena byla i drsnost horního povrchu, která činí 6,2  $\mu\text{m}$ .

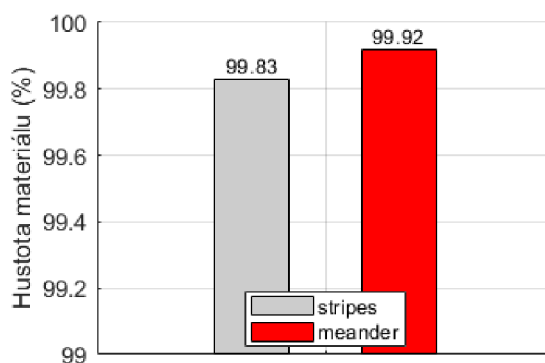


Obr. 5-49 Porovnání bočního povrchu objemových vzorků s parametry od dodavatele

Během řešení této práce bylo zjištěno softwarové omezení výroby tenkých stěn složitých geometrií. Nelze aplikovat jednotné skenování do společného souboru parametrů. Proto bylo v následující kapitole využito nejlepší kombinace parametrů dvojího skenování získané v kap. 5.2.10. Jedná se o parametry kontury: i)  $P = 170 \text{ W}$ ; a ii)  $v = 600 \text{ mm/s}$ . Je zde očekávána stejná tloušťka stěny jako v případě jednotného skenování a mírné zhoršení povrchu. Proto byly tyto parametry otestované i na oblast kontury objemových vzorků (podobně jako v kap. 5.4). Drsnost povrchu strategie s jednou konturou je  $5,8 \mu\text{m}$  (Obr. 5-49). Dále nebyla nalezena žádná podpovrchová porozita. Tudiž je možné tyto parametry využít.

## 5.4.2 Hustota materiálu s rozdílnou skenovací strategií

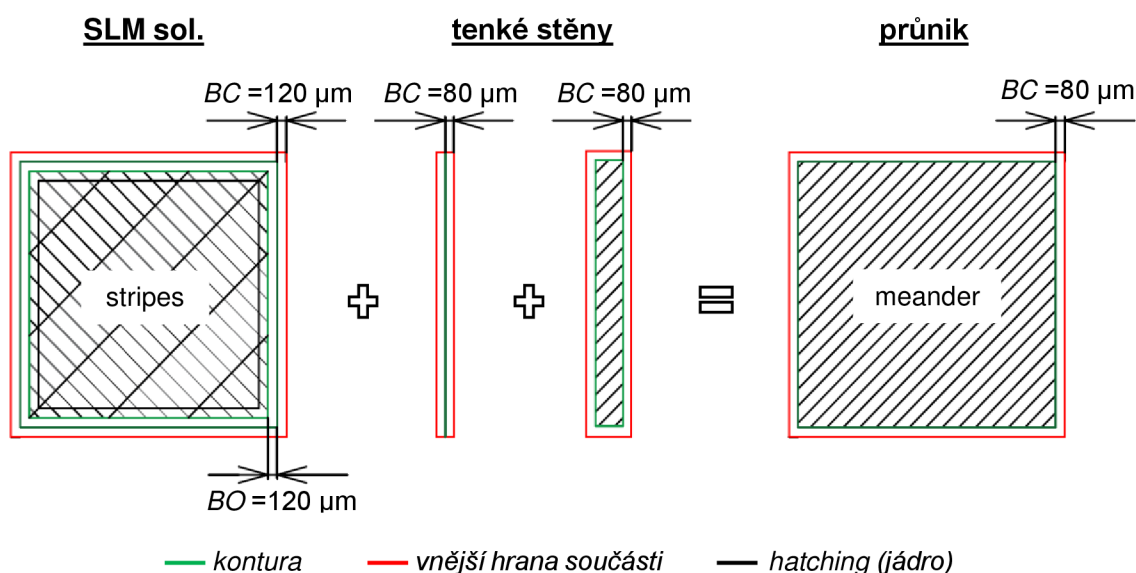
Parametry od výrobce používají jako vnitřní šrafovaní vzor stripes. Proto původním plánem bylo použití stejné strategie. Relativní hustota materiálu objemových vzorků byla měřena celkem na deseti vzorcích, resp. podstavách, na kterých byly dále vyrobeny tenké stěny. Ovšem tenké stěny v kap. 5.3 byly testovány se skenovacím vzorem meander, který se používá převážně pro malé a tenké díly. Při použití jednoho materiálového souboru je používaná stejná strategie na celou geometrii součásti. Navíc jak uvedl Carter [31] ve své studii, meander prokazuje homogennější strukturu. Proto byl dále navržen dodatečný experiment porovnání hustoty materiálu s rozdílnou skenovací strategií. Cílem bylo najít, co nejvíce společných oblastí parametrů tenkostěnné a objemové geometrie. Porovnání obou strategií je na Obr. 5-50. Bylo potvrzeno, že skenovacím vzorem meander lze dosáhnout větší hustoty než 99,9 %, což je více než parametry dodávanými výrobcem. Výsledkem je tedy možnost rozšíření průniku parametrů o skenovací strategii.



Obr. 5-50 Porovnání hustoty materiálu s rozdílnou skenovací strategií

## 5.5 Průnik parametrů

Porovnáním všech provedených experimentů bylo možné identifikovat průnik tenkostěnné a objemové geometrie. Průnikem lze označit společné parametry a strategie vhodné pro tvorbu samostatných tenkých stěn tvořených jedním návarem, ale i stěny větších šířek a objemové vzorky. Samotný vývoj nových procesních parametrů je možné pochopit na Obr. 5-51.



Obr. 5-51 Vývoj materiálového souboru procesních parametrů IN718 pro součásti kombinující tenkostěnnou a objemovou geometrii s výškou vrstvy  $50 \mu\text{m}$

Hlavním průnikem je soubor parametrů kontury, kdy využitím parametrů TS je možné dosáhnout lepší drsnosti povrchu objemových vzorků než v případě parametrů dodávaných výrobcem. Zároveň počet kontur má vliv na kvalitu stěny různých šířek z důvodu rozdílného odvodu tepla. Na základě výsledků je využití jedné kontury efektivnější, jak pro kolmé, tak šikmé stěny, a zároveň u objemových vzorků bylo dosaženo nejlepší kvality povrchu. Parametrem  $BC = 0,08 \text{ mm}$  lze dosáhnout dostatečného překrytí oblasti kontaktu kontury a jádra. Zároveň tímto parametrem lze vytvořit stěnu tvořenou jedním návarem, kdy je potřeba aplikovat počáteční šířku stěny  $0,16 \text{ mm}$ . Rozdílem oproti parametrům od výrobce je také absence parametru fill contour, kdy nedojde k opětovnému protavení oblasti kontaktu kontury a jádra. Tento parametr by mohl negativně ovlivnit výslednou kvalitu tenkých stěn. Dalším společným parametrem je skenovací strategie. Strategii meander, používající se hlavně pro tenkostěnné díly, bylo u objemových vzorků dosaženo větší hustoty materiálu.

Celkovým průnikem parametrů vznikl soubor parametrů, který je možný aplikovat na díl kombinující tenkostěnné a objemové geometrie. V Tab. 5-8 jsou definovány dva soubory parametrů pro rozdílné skenování. Jednotné skenování lze použít v případě, kdy je možné rozdělit součást na jednotlivé geometrie a aplikovat jim rozdílné soubory parametrů. Dvojitě skenování je soubor parametrů, který lze použít pro celou součást. Výsledkem bude mírně zhoršená kvalita stěny tvořená samostatným návarem v důsledku dvojího skenování. V případě větších šířek se jedná pouze o využití v oblasti kontury. Předpokládaná drsnost stěn je zobrazena v Tab. 5-9. Tyto hodnoty byly naměřeny na vzorcích z kap. 5.2.11. Je patrné, že s rozdílnou šířkou stěny se drsnost příliš nemění a je očekávané stejné chování i u následujících experimentů s využitím těchto parametrů.

**Tab. 5-8** Získané parametry pro rozdílné skenování = průnik geometrií

	Jednotné skenování				Dvojitě skenování			
	<i>P</i> (W)	<i>v</i> (mm/s)	<i>HD</i> (μm)	<i>BC</i> (μm)	<i>P</i> (W)	<i>v</i> (mm/s)	<i>HD</i> (μm)	<i>BC</i> (μm)
Jádro	275	760	120	-	275	760	120	-
Kontura	250	800	-	80	170	600	-	80

**Tab. 5-9** Předpokládané drsnosti stěn s parametry dvojího skenování

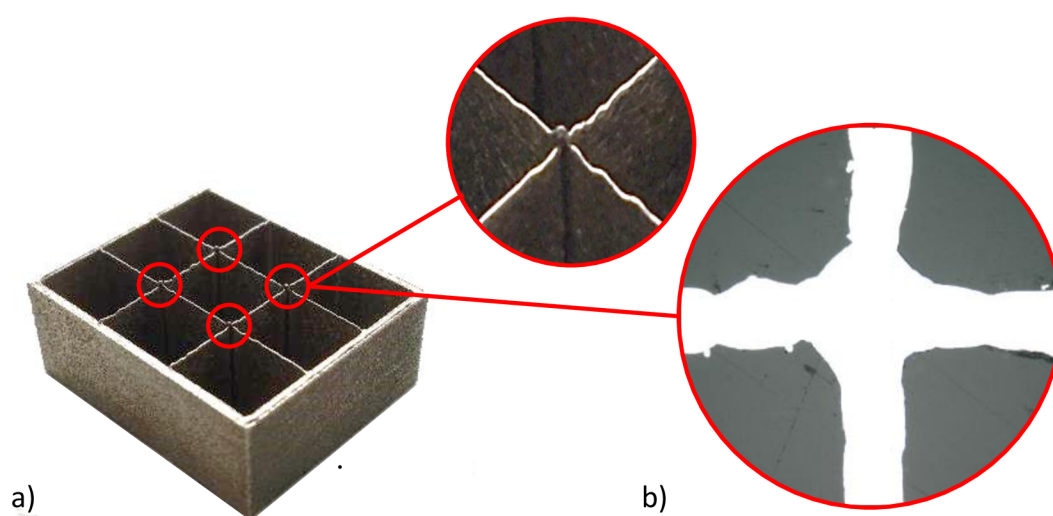
Šířka stěny (mm)	Drsnost (μm)
0,13	6,4
0,15	5,8
0,16	6,9
0,25	8,1
0,3	8,2
0,35	8,7
0,4	7,6
0,45	7,2

## 5.6 Tvarový experiment

Z důvodu ověření získaného souboru parametrů byla naplánovaná výroba součásti, resp. výměníku, který má být následně podroben tlakové zkoušce. Jelikož je tato součást (kap. 4.8.1) tvořena komplikovanou geometrií a svými výškovými rozměry se řadí mezi větší stavby, bylo potřeba ověřit potencionálně kritická místa. Mezi ty patří samotná struktura kanálů výměníku a pruty sloužící jako místa odběru statického tlaku.

### 5.6.1 Tenkostěnná struktura

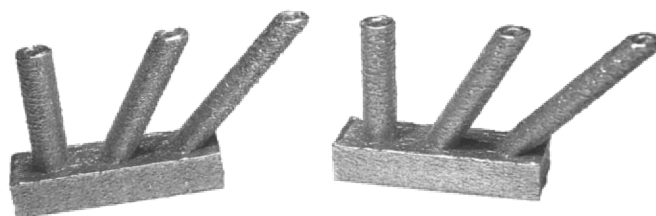
Design testované struktury (Obr. 5-52a) byl vyjmut z těla navržené součásti a postaven o výšce 10 mm. Cílem bylo analyzovat průběh stavby v oblasti průniku stěn uvnitř součásti, možné potenciální deformace a porozity v důsledku několikanásobného provaření. Průnikové body (označené červeně) vykazují více energie než samotná stěna. Dochází zde k mírnému nárůstu výšky ve tvaru špičky. To ovšem nemá výrazný vliv na průběh stavby. Ze snímku metalografického výbrusu průniku stěn (Obr. 5-52b) nejsou patrné žádné defekty, které by mohly ovlivnit výslednou těsnost součásti. Drsnost povrchu vnějších ploch je 7,1  $\mu\text{m}$ , což odpovídá rozsahu drsností získaných v kap. 5.3.2 a kap. 5.4. U vnitřních stěn to není možné ověřit. Použité parametry je možné použít pro výrobu vnitřních kanálů výměníku.



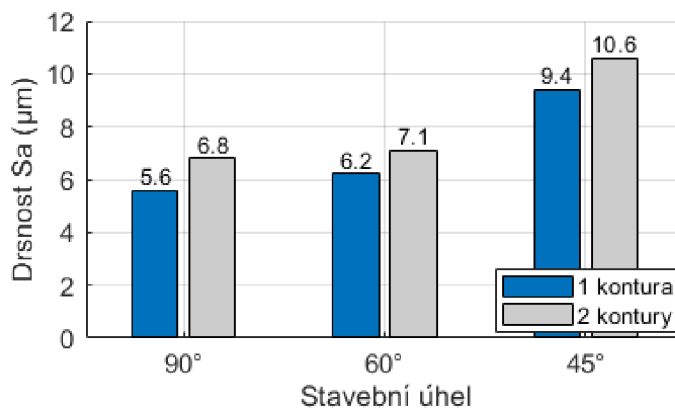
Obr. 5-52 a) Vzorek tenkostěnné struktury; b) metalografický výbrus řezu strukturou

### 5.6.2 Výroba prutů

Z pohledu aditivních pravidel výroby technologie SLM, byly pruty, respektive místa odběru tlaku, navrženy pod úhlem, aby bylo možné je vyrobit (Příloha 4). Proto tento experiment spočíval ve výrobě prutů se stavebním úhlem 45, 60 a 90°. Jedná se o pruty o průměru 2 mm se světlostí 1 mm. Použité parametry jsou stejné jako v přechozím experimentu. Celkem byly vyrobeny dva vzorky, které se podobně jako u tenkých stěn, liší v počtu obrysových kontur. Z Obr. 5-53 je na první pohled patrné, že danými parametry je možné pruty vyrobit. Podobně jako tomu bylo u šikmých stěn, s menším stavebním úhlem se zvyšuje drsnost povrchu. Vliv počtu kontur má vliv na drsnost zejména spodního povrchu, jak je patrné z Obr. 5-54. Využití jedné kontury je podobně jako u tenkých stěn efektivnější pro všechny stavební úhly. Porozita prutů nebyla v rámci práce řešena.



Obr. 5-53 Prutové vzorky; 1 kontura vlevo; 2 kontury vpravo



Obr. 5-54 Drsnost povrchu skloněných prutů pod rozdílnými stavebními úhly

## 5.7 Vyhodnocení experimentu těsnosti

### 5.7.1 Příprava a popis experimentu

Pro měření těsnosti byly využity stejné vzorky o daných procesních parametrech jako v kap. 5.2.11. Deformace stěn by neměla mít vliv na funkci tlakového zařízení. Ze souboru stěn různých délek byly odřezány nejdelší stěny (24 x 24 mm) a podrobeny tlakovému testu o tlaku 10 bar. Ilustrační snímek průběhu měření je na Obr. 5-55a. Zařízení s upnutým vzorkem bylo vloženo do nádoby s vodou a po dobu 10 minut byl pozorován únik plynu v podobě bublin.



a)



b)

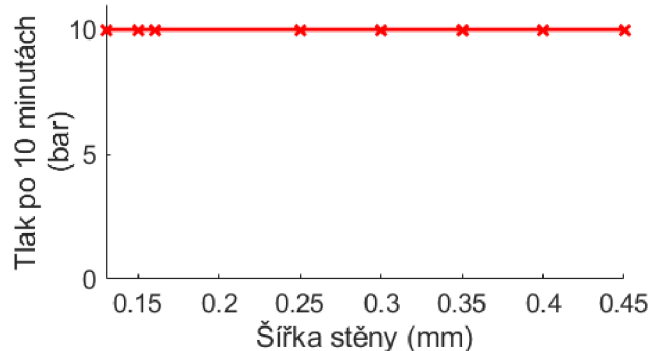
Obr. 5-55 a) Měřicí aparatura těsnosti tenkých stěn; b) vzorky stěn 0,13 až 0,45 mm

## 5.7.2 Analýza získaných dat

Otestováním vzorků různých šířek (Obr. 5-55b) bylo zjištěno, že tenké stěny vyrobené získanými parametry jsou dostatečně homogenní a nevykazují žádnou netěsnost. To platí i pro stěny tvořené jedním návarem (0,13, 0,15 a 0,16 mm). V rámci dvojího skenování, použitého v následující kapitole, je proto předpokládána těsnost vnitřních kanálů.

Tab. 5-10 Vyhodnocení těsnosti tenkých stěn

Šířka stěny (mm)	Těsnost ANO/NE
0,13	ANO
0,15	ANO
0,16	ANO
0,25	ANO
0,3	ANO
0,35	ANO
0,4	ANO
0,45	ANO



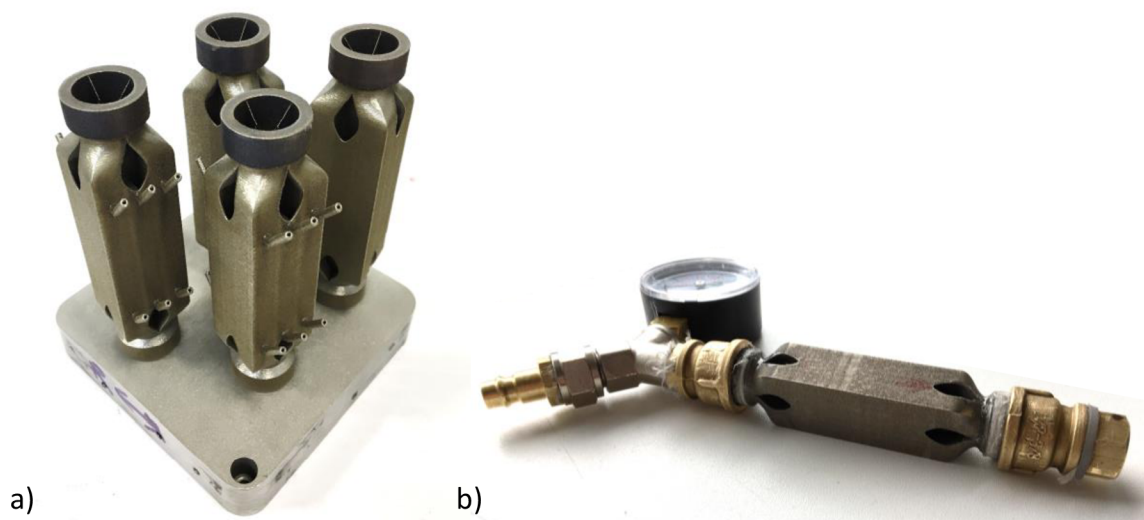
Obr. 5-56 Výsledek tlakového testu tenkých stěn

## 5.8 Ověření získaných parametrů

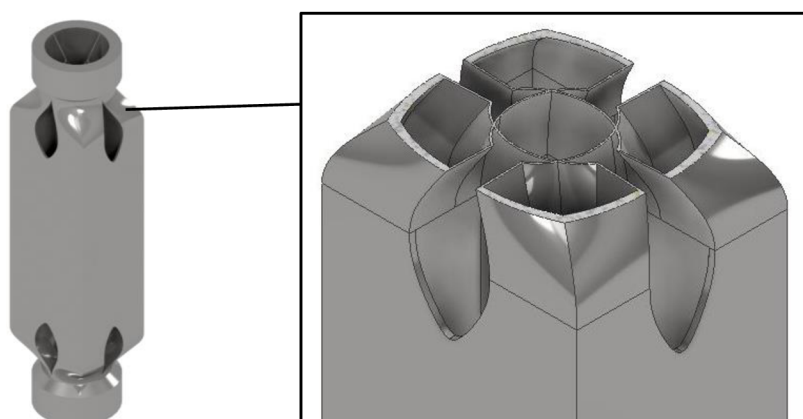
### 5.8.1 Výroba součástí a tlakový test

V rámci ověření souboru parametrů a těsnosti stěn byly vyrobeny oba navržené koncepty geometrie výměníku popsané v kap. 4.8. Celkem byly vyrobeny dva kusy z každého konceptu. Rozdíl byl pouze v šířce vnitřních stěn, kdy byla použita šířka stěny 0,16 a 0,2 mm. Jedná se stěnu tvořenou jedním návarem, resp. dvojím skenováním, a stěnu s vnitřní výplní. Stavba trvala 15 hodin a proběhla bez problémů. Z vizuálního pohledu na Obr. 5-57a je patrné, že součásti se podařilo vyrobit bez vnějších defektů. Po odříznutí z platformy byly do přírub vyřezány závity a provedena tlaková zkouška. Napojení součástí do tlakové sestavy je zobrazeno na Obr. 5-57b.

Na základě validace těsnosti součástí byly zjištěny problémy s malými netěsnostmi. Ponoření součástí do vody ukázalo místa úniku plynu. Jednalo se především o malé úniky pravděpodobně miniaturními defekty vzniklými výrobním procesem. Bylo identifikováno, že se jedná o místa v oblasti krčku, resp. převislých křivkových ploch (Obr. 5-58). To bylo pozorováno u všech součástí. Není zcela jasné, čím to bylo způsobeno. Proto byla provedena zpětná analýza možného pochybení v průběhu návrhového a výrobního procesu.

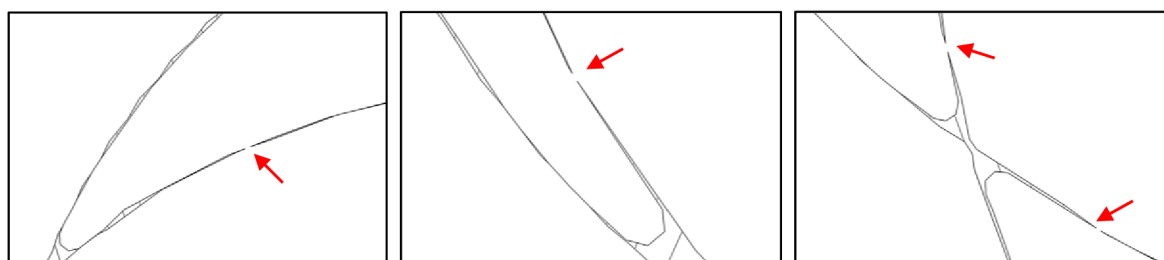


Obr. 5-57 a) Vyrobené součásti; b) sestava pro tlakovou zkoušku



Obr. 5-58 Identifikovaná oblast úniku plynu

V pracovním listu obsahujícím informace o každé nanesené a vypálené vrstvě nebylo nalezeno žádné neobvyklé aktivity, tudíž součást byla vyrobena zcela pravidelně pro celé své výšce. Zcela zásadní byla vygenerovaná výrobní data. Zde byly nalezeny miniaturní nepřesnosti, resp. přerušení několika vektorů, což mohlo způsobit nedokonalé protavení po sobě jdoucích návarů. Na Obr. 5-59 je patrné, že v náhodných řezech součásti jsou vektory udávající zakřivenou plochu, přerušované. Dále bylo zjištěno, že tyto defekty vznikají hlavně v oblasti šikmých a zakřivených ploch, nebo v místě průniku několika stěn. To je zásadní problém pro výrobu geometricky složitějších součástí, jako jsou tenkostěnné díly. Proto byla další část práce věnována zejména vyřešení tohoto softwarového problému.

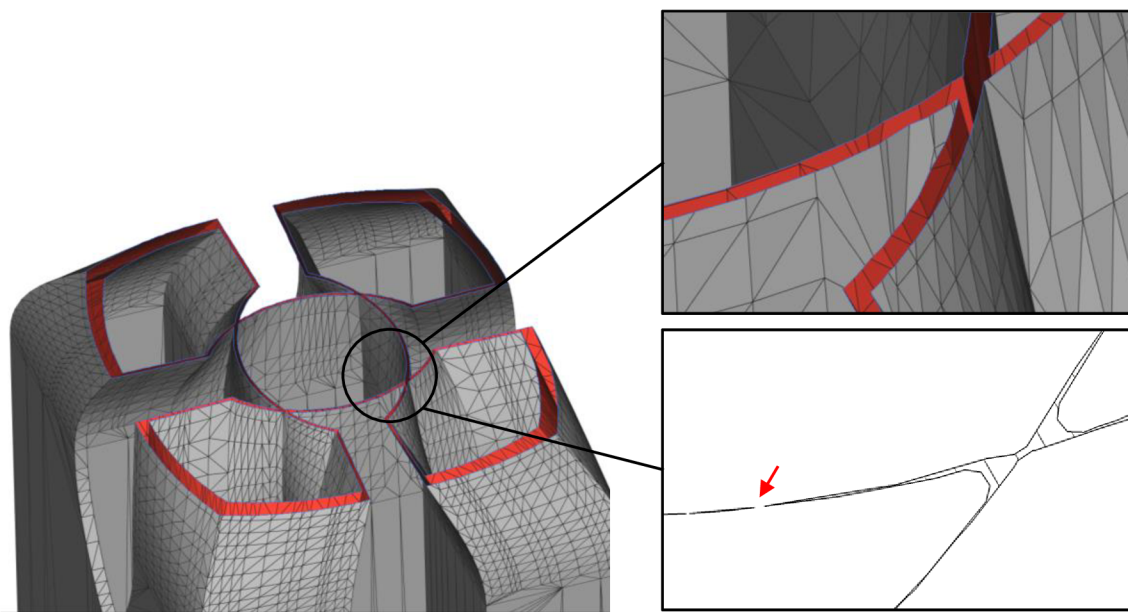


Obr. 5-59 Defekty jednotné skenovací dráhy v náhodných řezech součásti



## 5.8.2 Analýza generování výrobních dat tenkostěnné geometrie

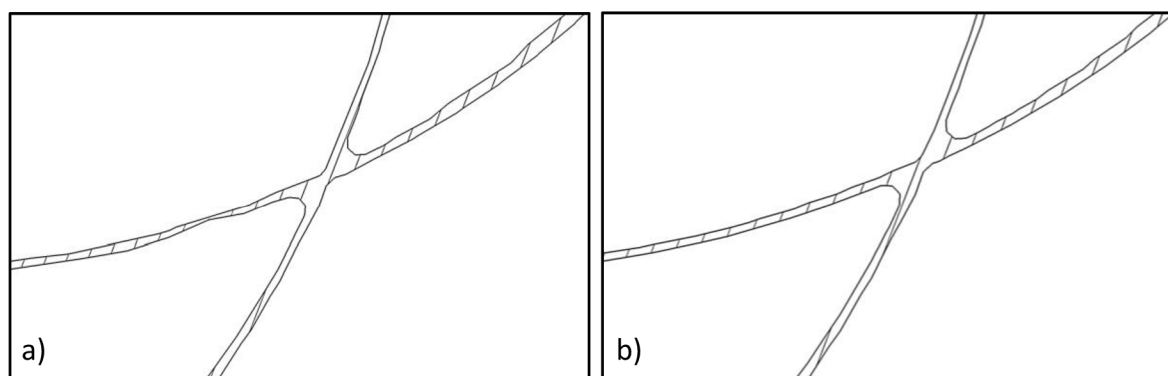
Prvním důležitým poznatkem je kvalita trojúhelníkové sítě ve formátu STL. Pro objemové díly nebo stěny větších šířek je tento efekt méně výrazný. Ovšem v případě stěn tvořených jedním samostatným návarem je dráha laseru generována pouze pomocí vektorů, které představují na sebe navazující trojúhelníky. S nedostatečnou kvalitou sítě, je vektorová křivka nepravidelná, čímž vznikají nepřesnosti jako na Obr. 5-60.



Obr. 5-60 Špatná kvalita sítě způsobující defekty skenovací dráhy

Vytvoření jemnější sítě s velikostí prvku až 0,01 mm pozitivně přispělo k hladším přechodům mezi vektory, nicméně nebylo možné redukovat všechny defekty. Další možný důvod špatného generování drah je možné připsat i samotnému softwaru. Kombinace nepravidelné triangulace sítě v oblasti zakřivených a šikmých ploch s minimální možnou šířkou stěny se jeví jako jeden z hlavních důvodů těchto nežádoucích defektů. Čím menší je šířka stěny, tím citlivější je na jemnost sítě. Doplněk Materialise Build Processor, sloužící pro úpravu a generování dat, neobsahuje vhodný parametr, kterým lze optimalizovat vznikající nedokonalosti. Hledáním softwarového řešení byl kontaktován výrobce, nicméně zatím bez odezvy. Přímé stěny se stavebním úhlem 90° a jejich průniky je možné realizovat bez výrazných problémů. To bylo také potvrzeno už v kap. 5.6.1. Okamžik přerušení náváru z důvodu diskontinuální dráhy neznámá, že nedojde k jejímu propojení. Ale samotná nepravidelnost je v rámci jedné skenovací dráhy výrazná. Nemusí dojít k dostatečnému protavení s předchozí vrstvou nebo naopak může vzniknout porozita příliš velkým protavením. To vše se odráží v celkové těsnosti součásti.

Kvalitu stěny, respektive vygenerované dráhy, s vnitřním šrafováním (nejméně 0,2 mm) lze vylepšit pouze změnou kvality sítě. Na Obr. 5-61a je viditelná nepravidelnost šířky daná právě špatnou kvalitou sítě. V nejužším místě byla naměřena hodnota 4  $\mu\text{m}$ . To by mohlo mít vliv na několika násobné protavení stejné oblasti a tím tvorbě průchozích pórů. Oproti protavení v jednom samostatném návare je zde rozdíl právě v příliš malém odsazení. Vyhlazený povrch použitím jemnější sítě je na Obr. 5-61b. S rostoucí šířkou stěny je tento efekt méně výrazný a nemá vliv na tvorbu defektů ovlivňující výslednou těsnost.



Obr. 5-61 Kvalita vygenerovaných drah stěny o šířce 0,2 mm

Důvod netěsnosti součásti s tloušťkou stěn vnitřních kanálů 0,2 mm je pravděpodobně způsoben výše zmíněnými nepravidelnostmi. U stěny 0,16 mm tvořených jedním návarem je na vině softwarové omezení. Výsledkem je složitost zvolené geometrie spojená s hraničními možnostmi generování skenovacích drah tvořených jedním návarem, zejména zakřivených. Z důvodu časové náročnosti nebylo možné vyrobit a otestovat nové součásti s jemnější sítí, nebo popřípadě s větší šířkou stěn.

## 6 DISKUZE

Diplomová práce byla zaměřena na vývoj souboru procesních parametrů vhodném pro tenkostěnné aplikace, respektive kombinace tenkostěnné a objemové geometrie z materiálu IN718. Specifickým zaměřením bylo získání informací o těsnosti tenkých stěn pomocí navrženého tlakového zařízení. Pro všechny experimenty bylo využito konstantní výšky vrstvy 50  $\mu\text{m}$ .

V první fázi byly provedeny návarové testy spojené s vývojem vhodných parametrů pro testy tenkých stěn. Parametry byly zvoleny na základě současného stavu poznání. V experimentu bylo postaveno 70 návarů s rozdílnými parametry. Výsledkem bylo ověření chování geometrie návaru s rozdílnou hustotou laserové energie, resp. se změnou výkonu laseru a rychlosti skenování. Na základě kritérií pro tvar a rozměry natavené oblasti byla vytvořena mapa procesních parametrů s výběrem oblastí vhodných pro následující testy tenkých stěn. Většina zvolených návarů vykazuje keyhole režim, čímž je podle Yanga [32] dosaženo kvalitnější mikrostruktury v podobě lépe orientovaných dendritů, a tím lepších mechanických vlastností samotné stěny. Oblast A spadá do kategorie nejstabilnějších návarů, které jsou perspektivní z hlediska stabilní tvorby stopy. To potvrzuje výsledky, které publikoval Balbaa [13]. Oblast B zasahuje návarovými rozměry do oblasti výroby nejtenčí možné stěny. Zároveň se jedná o podobné parametry objemových dílů dodávané výrobcem SLM Solutions. Poslední oblast C byla zvolena z důvodu možného urychlení doby výstavby, což potvrdil i Kumar [28] v případě objemových vzorků.

Další část výzkumu se věnovala ověření získaných parametrů z návarového testu na stěny tvořené pouze jedním návarem, resp. jednotným skenováním. Stěny byly hodnoceny z hlediska kvality, drsnosti povrchu a šířky stěny. Nejlepší drsnosti 6,7  $\mu\text{m}$  bylo dosaženo kombinací  $P = 250 \text{ W}$  a  $v = 800 \text{ mm/s}$  se šířkou stěny 0,15 mm. To je stejná hodnota šířky, které dosáhl Yang [32]. Podobnou kombinaci označil Balbaa [13] jako optimální pro tvorbu stabilních návarů. Dále byla zjištěna lineární korelace šířky stěny s rostoucí hustotou energie poukazující na linearitu samotných návarů, což potvrdili Kumar [44] i Balbaa [13]. Ovšem nebylo možné predikovat nejmenší šířku stěny s co nejmenší drsností povrchu. Proto byla provedena analýza DoE, jejíž výsledkem byly identifikovány optimální parametry tenkých stěn a následně ověřeny. Nejmenší šířky 0,13 mm s drsností 7,9  $\mu\text{m}$  bylo dosaženo s parametry  $P = 300 \text{ W}$  a  $v = 1400 \text{ mm/s}$ .

Vyslovená hypotéza č. 1 směřovala na experiment změny zaostření laserového paprsku. Cílem bylo definování chování parametrů stěny s posunutím ohniskové roviny v rozsahu  $\pm 6$  mm, resp. se změnou laserového bodu, a tím hustoty energie. Bylo zjištěno, že změna zaostření nemá pozitivní vliv na drsnost povrchu. Dochází zde ke změně morfologie samotných návarů, zejména hloubky provaření. To pravděpodobně ovlivňuje i samotnou šířku stěny. S pozitivním posunutím bylo dosaženo menší šířky stěny až o 20  $\mu\text{m}$ . Tudíž hypotéza č.1 nebyla potvrzena z důvodu nedosažení stejné nebo lepší kvality povrchu než v případě nulového zaostření.

Výroba stěny svírající s platformou stavební úhel  $45^\circ$  byla další částí této práce. Cílem bylo ověřit využití získaných parametrů z testu kolmých stěn. Testovanými kombinacemi parametrů byly zejména parametry  $P = 250$  W a  $v = 800$  mm/s. Stěny se podařilo vyrobit bez výrazných defektů. Pod takovýmto úhlem se očekávalo značné zhoršení kvality povrchu, a to bylo také potvrzeno. V porovnání s kolmou stěnou drsnost spodního povrchu vzrostla až na 20  $\mu\text{m}$ . Horní plocha není tak výrazně ovlivněna. S horší kvalitou vzrostla i samotná šířka stěny, která se pohybuje okolo 0,17 mm. Což je možné připsat propadu natavené oblasti do prášku nebo tvorbě strusky. Samotná homogenita stěny je konstantní po celé její výšce a nevykazuje výrazné defekty.

Z důvodu softwarového omezení generování dat pro výrobu geometrie obsahující tenkostěnné prvky tvořené pouze jednotným skenováním, byl navržen experiment dvojího skenování, kdy laser projel jednu skenovací stopu dvakrát. Zde byla očekávána změna morfologie stopy spolu s nárůstem šířky stěny a zhoršení kvality povrchu. Celkem byly testované čtyři kombinace parametrů označené jako optimální pro výrobu stěn tvořených jednotným skenováním. Výsledky potvrzují očekávání, kdy drsnost povrchu vzrostla přibližně o 4 až 5  $\mu\text{m}$  a šířka stěny až o 40  $\mu\text{m}$ . Nejlepších výsledků 8,7  $\mu\text{m}$  a šířky 0,16 mm bylo dosaženo s kombinací  $P = 170$  W a  $v = 600$  mm/s. Podobné parametry jsou využívány pro podpůrné struktury v souboru parametrů dodávaných výrobcem. Dále bylo možné tyto parametry použít pro geometrie tvořené dvojím skenováním. V případě stěn pod úhlem byla spodní plocha vystavena s drsností od 20 do 30  $\mu\text{m}$ , což je až trojnásobné zhoršení oproti kolmým stěnám.

Na základě deformací stěn vznikajících pravděpodobně důsledkem vnitřního pnutí [45], byl proveden experiment maximální délky skenování. Celkem byly porovnány délky stěn 5 až 25 mm pro šířky stěny 0,16 až 0,45 mm. Cílem bylo analyzovat průběh deformace s rozdílnými šířkami stěn. Výsledky ukazují, že s rostoucí šířkou stěny se deformace zmenšuje, ovšem u délky stěny 25 mm ji nelze úplně eliminovat. Nejdelsí stěny bez deformace (20 mm) bylo dosaženo s tloušťkou 0,3 mm. Snižováním délky skenování je možná aplikace ještě tenčích stěn. Bohužel se šířkou 0,13 až 0,15 mm je možné se pohybovat jen v oblasti okolo 10 mm. Dále nebyl prokázán vliv časové prodlevy mezi skenováním následujících vrstev na deformaci stěny. Jediným řešením je zkrácení stěny přídatnými výtuhami a tím zvýšení tuhosti.

Samotná anomálie tvorby deformace tenkých stěn nebyla v rámci práce vyřešena. Byla provedena analýza možných důvodů jejího vzniku s výstupem hypotézy, která poukazuje na vznik deformace stěny až po její výrobě. V průběhu stavby nemohla být stěna již deformovaná, jelikož by nebylo možné ji postavit. Proto hypotéza uvádí okamžik deformování v časovém úseku až po dokončení stavby, kdy by mohla hrát hlavní roli kombinace teploty a brzkého vytažení ze stavební komory. V tomto momentu dochází k relaxaci vnitřního pnutí ve formě průhybu stěny. Tuto hypotézu již nebylo možné v rámci práce ověřit.

Potencionálním průnikem tenkostěnné a objemové geometrie je oblast obrysových kontur, kde je možné využít parametrů tenkých stěn. To také směřuje na hypotéze č. 2. Proto byly nejprve provedeny testy stěn o šířce 0,5, 1 a 2 mm s aplikováním tří rozdílných konfigurací skenovacích strategií obrysových kontur. Hodnotícími kritérii byla hustota materiálu a drsnost povrchu. Použité parametry byly  $P = 250 \text{ W}$  a  $v = 800 \text{ mm/s}$ . Zásadním parametrem byl  $BC$ , kde byla aplikována hodnota 0,08 mm, což je polovina průměrné šířky návaru (kap. 5.1.2). Skenovací strategií jádra byl meander [12].

Využití konturové strategie (pouze kontury bez jádra) se jeví jako nejefektivnější z hlediska výroby stěny větší než 1 mm. Je to dáno kvalitou stěny, resp. snížením drsnosti povrchu rovnoměrným odvodem tepla. Pro šikmé stěny je tato strategie nevhodná, jelikož dochází k velkému propadu do prášku. Bylo zjištěno, že počet kontur má vliv na výslednou kvalitu povrchu zejména u kolmých stěn menších než 1 mm a dále u všech šikmých stěn. S jednou konturou lze dosáhnout menší drsnosti povrchu horní převislé plochy než v případě dvou kontur. Na spodní plochu bylo potřeba aplikovat parametr downskin, čímž došlo k redukci drsnosti až o  $10 \text{ }\mu\text{m}$ . Díky tomu bylo možné označit jedno konturovou strategii jako vhodnější pro výrobu tenkých stěn. Průměrná hustota materiálu všech testovaných vzorků se pohybuje okolo 99,76 %. Zároveň nebyla identifikována žádná podpovrchová porozita. Tudiž překrytí strategií jádra a kontury je z hlediska parametrů dostatečné.

Podobný experiment byl navržen i pro objemové vzorky ( $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}$ ), kde jednou konturou bylo dosaženo menší drsnosti bočního povrchu ( $6,75 \text{ }\mu\text{m}$ ). V porovnání s parametry dodávanými výrobcem SLM Solutions, byla snížena drsnost až o  $2 \text{ }\mu\text{m}$ . Dále došlo k navýšení hustoty materiálu na 99,92 % se změnou skenovací strategií jádra, kdy podobně jako ve studiích [31][11], strategií meander bylo dosaženo homogennější struktury. Testovanými parametry byla i kombinace používaná pro dvojí skenování stěn  $P = 170 \text{ W}$  a  $v = 600 \text{ mm/s}$ . V tomto případě byla drsnost povrchu  $5,8 \text{ }\mu\text{m}$ , což je v porovnání s předchozími parametry výrazné zlepšení. Tudiž aplikováním parametrů TS bylo dosaženo lepších výsledných vlastností a tím byla hypotéza č. 2 potvrzena. Nyní je možné sloučit získané poznatky o parametrech do jednoho společného souboru parametrů a aplikovat na díl kombinující obě zkoumané geometrie.

Hlavním průnikem je soubor parametrů kontury, kdy aplikováním parametrů TS ( $P = 250 \text{ W}$  a  $v = 800 \text{ mm/s}$ ) je možné dosáhnout lepší drsnosti povrchu než v případě parametrů dodávaných výrobcem. Nicméně výraznou změnou je i snížení počtu kontur na jednu, což má své výhody při výrobě tenkých stěn, zejména menších než 1 mm. K podobným výsledkům došel i Moussaoui [4], který pro konturu i jádro použil kombinaci  $P = 250 \text{ W}$  a  $v = 1000 \text{ mm/s}$  a dosáhl podobných hodnot drsnosti objemových vzorků. Dalším společným parametrem je skenovací strategie meander, používající se hlavně pro tenkostěnné díly [12]. Ovšem její efektivní využití bylo potvrzeno i u objemových vzorků, kde bylo dosaženo větší hustoty materiálu. Dále lze potvrdit nevýznamnou roli skenovací strategie na drsnost povrchu [4] [30]. Absence parametru fill contour v kategorii TS je aplikovatelná na objemové díly, kdy parametrem  $BC = 0,08 \text{ mm}$  lze dosáhnout dostatečného překrytí kontaktu kontury a jádra, čímž nedojde k tvorbě podpovrchové porozity. Získané kombinace parametrů tvořící základ materiálového souboru parametrů jsou v Tab. 5-8.

Parametry byly určeny pro tloušťku vrstvy  $50 \mu\text{m}$ . V případě využití menší tloušťky lze pravděpodobně dosáhnout ještě lepších výsledků [26]. Ovšem výroba stěny bude výrazně ovlivněna změnou morfologie natavené oblasti samotného návaru, proto není možné použít stejné parametry. Tudiž by bylo nutné zopakovat podobný vývojový proces pro různé tloušťky vrstvy. Malý rozdíl hodnot parametrů  $P$  a  $v$  mezi konturou a jádrem by mohl pozitivně ovlivňovat mechanické vlastnosti, zejména u tenkých prvků, protože zde nedochází k tvorbě rozdílné mikrostruktury [21].

Stěny s šířkou 0,13 až 0,45 mm byly podrobeny tlakovému testu. Využito bylo navrženého zařízení, do kterého se upne vzorek tenké stěny o rozměrech  $24 \times 24 \text{ mm}$ , a po natlakování se vloží do nádrže s vodou. Výsledky ukazují, že nebyla nalezena žádná netěsnost a stěny jsou dostatečně homogenní. V porovnání se studií od Abele [33] byla ověřena těsnost stěn pod větším tlakem (10 bar) a bylo dosaženo těsnosti i u stěny 0,13 mm, která je tvořená samostatným návarem.

Otestováním reálné tenkostěnné součásti tlakovým testem byly zjištěny miniaturní netěsnosti. Identifikace místa úniku plynu ponořením do vody, ukázala jako kritickou oblast šikmé a zakřivené plochy. Během výrobního procesu nebyla potvrzena žádná závada nebo razantní změna nastavení. Na základě úspěšných experimentů těsnosti samostatných stěn byla předpokládána chyba v návrhovém procesu generování výrobních dat. To bylo také potvrzeno. Ve vygenerovaném souboru SLM byly nalezeny miniaturní nepřesnosti, respektive přerušení několika vektorů, zejména v zakřivených a převislých oblastech. To mohlo způsobit nedokonalé protavení po sobě jdoucích návarech a tím tvorbu pórů.

Hlavním představitelem tohoto problému byla identifikována kvalita trojúhelníkové sítě formátu STL. S nedostatečnou kvalitou sítě, je vektorová křivka nepravidelná, čímž vznikají nepřesnosti. Tento fenomén je evidován zejména u stěn do šířky 0,25 mm, kde je vyžadována hladkost obrysových kontur. Nejvíce se projevuje u stěn tvořených jedním návarem, kdy by se měly kontury vzájemně překrývat. Zjemněním sítě bylo dosaženo větší kvality vektorových křivek, ovšem všechny nepřesnosti se nepodařilo redukovat. Složitost tenkostěnné geometrie tvořené samostatnými návary se ukazuje jako hlavní nepřítel použitého softwaru. Prímé stěny se stavebním úhlem  $90^\circ$  jsou stavěny bez defektů. Problematické je generování překrývajících se drah v zaoblených a převislých oblastech. Nastavením souboru parametrů není možné tento problém vyřešit. Proto byl dále kontaktován výrobce. Analýza hledání příčiny vzniku netěsností přinesla hlavní závěry v kvalitě sítě, kdy s menší šířkou stěny je vyžadována jemnější síť. Požadavek vytvořit geometrii s minimální tloušťkou stěny je potřeba omezit zejména ve složitosti geometrie nebo s využitím větší šířky stěn. Samotná těsnost v případě samostatných stěn byla potvrzena v kap. 5.7.2, tudíž s využitím získaných poznatků je předpokládána i u dalších součástí. Z důvodu časové náročnosti pandemického období v průběhu řešení této práce, nebylo možné tyto závěry dále otestovat.

## 7 ZÁVĚR

Diplomová práce byla věnována vývoji nových procesních parametrů technologie Selective laser melting pro materiál IN718. Hlavním cílem bylo experimentální stanovení souboru parametrů vhodného pro výrobu tenkostěnných dílů s ohledem na hustotu materiálu a drsnost povrchu. Tento soubor by měl splňovat podmínky aplikace na součásti tvořené kombinací tenkostěnné a objemové geometrie s požadavkem těsnosti.

Teoretická část se věnuje především současnému stavu výzkumu zpracování slitiny IN718 v rámci objemových dílů. Samotné tenké stěny nebyly důkladně prozkoumány. Dále popisuje základní pravidla chování během procesu stavby a vlivy procesních parametrů na kvalitu dílů. Na základě rešeršní části byly navrženy experimenty a metody použité v práci.

Pro praktickou část vývoje souboru parametrů bylo využito zařízení SLM 280<sup>HL</sup>. Nejprve byly provedeny návarové experimenty širšího rozsahu parametrů, které vedly k nalezení tří oblastí splňujících podmínky výrobního procesu SLM a byly použity pro výrobu vzorků tenkých stěn. Stěny byly tvořeny samostatným návarem, čímž bylo dosaženo průměrné šířky stěny 150  $\mu\text{m}$ . Byla nalezena vhodná kombinace parametrů splňující podmínky pro výrobu tenkostěnných dílů s homogenní strukturou dosahující drsnosti povrchu až 6,7  $\mu\text{m}$ . Dále na základě predikce statistické metody byla potvrzena kombinace parametrů, která vedla k vytvoření stěny o šířce až 130  $\mu\text{m}$ . To je o 20  $\mu\text{m}$  menší šířka, než které bylo dosaženo v současných studiích. V rámci vyslovené hypotézy byl prozkoumán vliv změny laserového zaostření na šířku stěny a drsnost povrchu. Tento vliv nebyl doposud popsán v žádné z odborných publikací. Těsnost stěn byla úspěšně potvrzena s využitím realizovaného tlakového zařízení. Pro vznik průniku parametrů byly provedeny testy stěn větších šířek a objemových vzorků s aplikováním parametrů tenkých stěn na oblast obrysových kontur. S tím se pojí i vyslovená hypotéza, která byla dále potvrzena, a tím vznikl soubor parametrů, kterým lze vyrobit tenkostěnné díly s objemovými prvky. Oproti parametrům od firmy SLM Solutions bylo dosaženo větší hustoty materiálu se změnou skenovací strategie. Výsledné vzorky dosahují hustoty až 99,92 %. V porovnání s parametry od dodavatele byla také snížena drsnost povrchu objemových vzorků téměř o 30 %.

Během řešení práce se vyskytl fenomén vzniku plastických deformací stěn. Proto byl proveden experiment za účelem analýzy deformace pro rozdílné rozměry stěn. Deformace se v rámci výroby projevují vždy od délky stěny 10 mm a šířky menší než 0,15 mm. V případě delších stěn se tento efekt vyskytuje už od šířky stěny 0,45 mm. Není zcela jasné, čím je to způsobeno. Pro řešení je potřeba provést další studii. Ovšem v současné době je možná eliminace deformací změnou geometrie součásti. Přidáním výtuh dojde ke zkrácení délky stěny a tím zvýšení její tuhosti.



Na závěr byla vyrobena součást s tenkostěnnou geometrií v podobě vnitřních kanálů a byla podrobena tlakovému testu. Výroba takto složité geometrie přinesla nové poznatky o tenkostěnných strukturách, kterými se nezabývá žádná studie a pravděpodobně takové výrobě není uzpůsobený ani výrobní program. Nedostatečná těsnost byla identifikována v místech kontaktu více stěn pod úhlem nebo se zakřivením. To je připisováno defektům vzniklým softwarovým omezením při generování dat stěn tvořených jedním návrhem. Bohužel zatím nebylo nalezeno softwarové řešení a ani neexistuje varianta použití jiného softwaru. Komplikace se podařilo částečně omezit extrémní jemností trojúhelníkové sítě (několik stovek MB), ačkoli nebylo možné to dále otestovat. Kontaktováním výrobce je očekáváno nalezení možného řešení. S tím se pojí i námět na další studii, která by mohla být zaměřena na optimalizaci různých typů tenkostěnných struktur s využitím vyvinutých procesních parametrů.

Hlavním přínosem této práce je možnost aplikace získaného souboru parametrů na tenkostěnné díly s vysokými požadavky na kvalitu stěn. Vystupující parametry stěn dosahují hraničních možností výroby technologie SLM, ale i samotného softwaru. Provedené experimenty utvrzují možnost výroby součástí s minimální možnou šířkou stěn 0,13 mm, což může být efektivní pro řadu komponent v oblasti vysokoteplotních aplikací.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DENG, Dunyong, Ru Lin PENG, Håkan BRODIN a Johan MOVERARE. Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by selective laser melting: Sample orientation dependence and effects of post heat treatments. *Materials Science and Engineering A*. 2018, roč. 713, č. July 2017, s. 294–306. ISSN 09215093.
- [2] POLLOCK, Tresa M a Sammy TIN. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines Chemistry, Microstructure, and Properties!. *Journal of Propulsion and Power*. 2006, roč. 22, č. 2, s. 361–374.
- [3] CAMPBELL, F. C. *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*. B.m.: Elsevier B.V., 2006. ISBN 9781856174954.
- [4] MOUSSAOUI, K., W. RUBIO, M. MOUSSEIGNE, T. SULTAN a F. REZAI. Effects of Selective Laser Melting additive manufacturing parameters of Inconel 718 on porosity, microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*. 2018, roč. 735, č. April, s. 182–190. ISSN 09215093.
- [5] LOCQ, D a P CARON. On Some Advanced Nickel-Based Superalloys for Disk Applications. *AerospaceLab*. 2011, č. 3, s. 1–9. ISSN 15266125.
- [6] KAYNAK, Yusuf a Emre TASCIOGLU. Post - processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*. 2019. ISSN 2363-9520.
- [7] ATTALLAH, Moataz M., Rachel JENNINGS, Xiqian WANG a Luke N. CARTER. Additive manufacturing of Ni-based superalloys: The outstanding issues. *MRS Bulletin*. 2016, roč. 41, č. 10, s. 758–764. ISSN 08837694.
- [8] SLM SOLUTIONS GROUP AG. *Material Data Sheet - Ni-Alloy IN718*. 2017. Dostupné z: [https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user\\_upload/MDS\\_Ni-Alloy\\_IN718\\_2.4668\\_0719.pdf](https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/MDS_Ni-Alloy_IN718_2.4668_0719.pdf)
- [9] SLM SOLUTIONS GROUP AG. *Material Data Sheet - Ni-Alloy IN 625*. 2017. Dostupné z: [https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user\\_upload/MDS\\_Ni-Alloy\\_IN625\\_0819.pdf](https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/MDS_Ni-Alloy_IN625_0819.pdf)
- [10] CARTER, L. N., X. WANG, N. READ, R. KHAN, M. ARISTIZABAL, K. ESSA a M. M. ATTALLAH. Process optimisation of selective laser melting using energy density model for nickel based superalloys. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*. 2016, roč. 32, č. 7, s. 657–661. ISSN 17432847.
- [11] CHENG, Bo, Subin SHRESTHA a Kevin CHOU. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting &. *Additive Manufacturing*. 2016, roč. 12, s. 240–251. ISSN 2214-8604.
- [12] *Design for metal AM - a beginner's guide*. 2017 [vid. 16. březem 2020]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/design-for-metal-am-a-beginners-guide--43333>
- [13] BALBAA, Mohamed, Sameh MEKHIEL, Mohamed ELBESTAWI a Jeff MCISAAC. On selective laser melting of Inconel 718 : Densi fi cation , surface roughness , and residual stresses. *Materials & Design*. 2020, roč. 193, s. 108818. ISSN 0264-1275.

- [14] WANG, Di, Yongqiang YANG, Ziheng YI a Xubin SU. Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process. 2013, s. 1471–1484.
- [15] CHEN, Hongyu, Dongdong GU, Jiapeng XIONG a Mujian XIA. Improving additive manufacturing processability of hard-to-process overhanging structure by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017, roč. 250, č. December 2016, s. 99–108. ISSN 09240136.
- [16] CHARLES, Amal, Ahmed ELKASEER, Lore THIJS, Veit HAGENMEYER a Steffen SCHOLZ. Effect of process parameters on the generated surface roughness of down-facing surfaces in selective laser melting. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2019, roč. 9, č. 6. ISSN 20763417.
- [17] CHEN, Hongyu, Dongdong GU, Jiapeng XIONG a Mujian XIA. Improving additive manufacturing processability of hard-to-process overhanging structure by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017, roč. 250, č. May, s. 99–108. ISSN 09240136.
- [18] WANG, Di, Shibiao WU, Yuchao BAI, Hui LIN, Yongqiang YANG a Changhui SONG. Characteristics of typical geometrical features shaped by selective laser melting. *Journal of Laser Applications*. 2017, roč. 29, č. 2, s. 022007. ISSN 1042-346X.
- [19] DENG, Dunyong. *Additively Manufactured Inconel 718: Microstructures and Mechanical Properties*. 2018. ISBN 9789176853832.
- [20] COURTOIS, M. A new approach to compute multi-reflections of laser beam in a keyhole for heat transfer and fluid flow modelling in laser welding. *Journal of physics D: Applied physics*. 2013.
- [21] KARIMI, Paria. SLM additive manufacturing of Alloy 718 Effect of process parameters on microstructure and. 2017, č. August.
- [22] NICOLETTO, Gianni. Smooth and notch fatigue behavior of selectively laser melted Inconel 718 with as-built surfaces. *International Journal of Fatigue*. 2019, roč. 128, č. February. ISSN 0142-1123.
- [23] KOUTIRI, Imade, Etienne PESSARD, Patrice PEYRE, Ouafae AMLOU a Thibaut De TERRIS. Influence of SLM process parameters on the surface finish, porosity rate and fatigue behavior of as-built Inconel 625 parts. *Journal of Materials Processing Tech*. 2018, roč. 255, č. June 2017, s. 536–546. ISSN 0924-0136.
- [24] CAMPBELL, R. Ian, Massimo MARTORELLI a Han Sang LEE. Surface roughness visualisation for rapid prototyping models. *CAD Computer Aided Design*. 2002, roč. 34, č. 10, s. 717–725. ISSN 00104485.
- [25] COVARRUBIAS, Ernesto E. a Mohsen ESHRAGHI. Effect of Build Angle on Surface Properties of Nickel Superalloys Processed by Selective Laser Melting. *JOM*. 2018, roč. 70, č. 3, s. 336–342. ISSN 15431851.
- [26] NGUYEN, Q B, D N LUU, S M L NAI, Z ZHU, Z CHEN a J WEI. The role of powder layer thickness on the quality of SLM printed parts ScienceDirect The role of powder layer thickness on the quality of SLM printed parts. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018, roč. 18, č. 3, s. 948–955. ISSN 1644-9665.
- [27] HOSSEINI, E. a V. A. POPOVICH. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718. *Additive Manufacturing*. 2019, roč. 30, č. August. ISSN 22148604.

- [28] KUMAR, Pankaj, Jano FARAH, Javed AKRAM, Chong TENG, Jon GINN a Mano MISRA. Influence of laser processing parameters on porosity in Inconel 718 during additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, s. 1497–1507.
- [29] MANCISIDOR, A. M. Reduction of the residual porosity in parts manufactured by selective laser melting using skywriting and high focus offset strategies. *9th International Conference on Photonic Technologies - LANE 2016*. 2016, roč. 83, s. 864–873.
- [30] AMIRJAN, Mostafa a Hassan SAKIANI. Effect of scanning strategy and speed on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted IN718 nickel-based superalloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, roč. 103, č. 5–8, s. 1769–1780. ISSN 14333015.
- [31] CARTER, Luke N., Christopher MARTIN, Philip J. WITHERS a Moataz M. ATTALLAH. The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014, roč. 615, s. 338–347. ISSN 09258388.
- [32] YANG, Huihui, Jingjing YANG, Wenpu HUANG, Zemin WANG a Xiaoyan ZENG. The printability, microstructure, crystallographic features and microhardness of selective laser melted Inconel 718 thin wall. *Materials & Design*. 2018, roč. 156, s. 407–418. ISSN 0264-1275.
- [33] ABELE, Eberhard, Hanns A STOFFREGEN, Michael KNIEPKAMP, Sebastian LANG a Manfred HAMPE. Processing Technology Selective laser melting for manufacturing of thin-walled porous elements. *Journal of Materials Processing Tech.* 2015, roč. 215, s. 114–122. ISSN 0924-0136.
- [34] VINOGRADOV, M L, D K KOSTRIN, M V KARGANOV a V Yu TISKOVICH. How to Choose a Leak Detection Method. 2018, č. February 2016.
- [35] Leak detection technology. *Integral leak test methods*. [vid. 22. duben 2020]. Dostupné z: <http://leakdetection-technology.com/>
- [36] KEE, June, Min JI, Hwan JEONG a Man YEONG. High temperature heat exchanger studies for applications to gas turbines. 2009, s. 175–186.
- [37] SLM SOLUTIONS. SLM ®280. ©2018-2019. [vid. 2. duben 2020]. Dostupné z: <https://www.slm-solutions.com/en/products/machines/slmr280/>
- [38] MKS, Newport. *ISO-KF Vacuum Flange Clamps*. 2020. Dostupné z: <https://www.newport.com/f/iso-kf-vacuum-flange-clamps>
- [39] THOMPSON, Adam, Ian MASKERY a Richard LEACH. X - ray computed tomography for additive manufacturing : a review. 2016, č. June.
- [40] SPIERINGS, Adriaan B. Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts. 2014, č. December.
- [41] MUMTAZ, Kamran, Neil HOPKINSON, Kamran MUMTAZ a Neil HOPKINSON. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting. 2010.
- [42] SADOWSKI, Magda, Leila LADANI, William BRINDLEY a John ROMANO. Optimizing quality of additively manufactured Inconel 718 using powder bed laser melting process. *Additive Manufacturing*. 2016, roč. 11, s. 60–70. ISSN 2214-8604.

- [43] SCIME, Luke a Jack BEUTH. Melt pool geometry and morphology variability for the Inconel 718 alloy in a laser powder bed fusion additive manufacturing process. *Additive Manufacturing*. 2019, roč. 29, č. May, s. 100830. ISSN 2214-8604.
- [44] NUPUR, Yatih, V. K. TEWARI, R. THANGAMALAR, Sweeti KUMARI a Ashok KUMAR. Translational vibration evaluation of tractor seats for ride comfort. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2013, roč. 15, č. 4, s. 102–112. ISSN 16821130.
- [45] LI, Zhonghua, Renjun XU, Zhengwen ZHANG a Ibrahim KUCUKKOC. The influence of scan length on fabricating thin-walled components in selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2018, roč. 126, č. September 2017, s. 1–12. ISSN 0890-6955.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

### 9.1 Seznam zkratk

IN718	slitina Inconel 718
IN615	slitina Inconel 625
SLM	Selective laser melting
PP	procesní parametry
TS	tenké stěny
DoE	Design of Experiment
RSM	Response surface design method
VED	objemová hustota laserové energie
LED	plošná hustota laserové energie

### 9.2 Seznam veličin

$t$	( $\mu\text{m}$ )	tloušťka vrstvy
$d$	( $\mu\text{m}$ )	hloubka průvaru
$h$	( $\mu\text{m}$ )	výška návaru
$w$	( $\mu\text{m}$ )	šířka návaru
$E$	( $\text{J}/\text{mm}^2$ )	hustota energie
$H$	( $\mu\text{m}$ )	šrafovací vzdálenost
$FO$	( $\text{mm}$ )	parametr focus offset
$BC$	( $\mu\text{m}$ )	parametr beam compensation
$HO$	( $\mu\text{m}$ )	parametr hatch offset

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1	Řez proudového motoru [3].....	14
Obr. 2-1	Součásti motorů Aircraft ze slitiny IN 718; a) cívka motoru; b) turbínová hřídel; c) spalovací pouzdro; d) turbínový disk; [6] .....	16
Obr. 2-2	Vzorové skenovací strategie; a) meander; b) chessboard; c) stripes; upraveno z [11] .....	18
Obr. 2-3	Rozdíl v odvodu tepla; a) objemová část; b) tenká stěna [14] .....	19
Obr. 2-4	Schodišťový efekt na horním a tvorba strusky na spodním povrchu; upraveno z [16] .....	19
Obr. 2-5	Princip vzniku makroskopických deformací; upraveno z [14] .....	20
Obr. 2-6	Druhy porozity v materiálu IN 718; a) uvězněný plyn; b) lack of fusion [19].. .....	21
Obr. 2-7	Princip vzniku póru zánikem režimu klíčové dírky [20].....	21
Obr. 2-8	Neroztavená částice na povrchu součásti [9].....	23
Obr. 2-9	Závislost drsnosti horního povrchu na výkonu laseru pro rozdílné stavěcí úhly; $v = 0,5 \text{ m/s}$ [23].....	23
Obr. 2-10	Závislost drsnosti povrchu na úhlu; a) horní povrch; b) spodní povrch; [25] .. .....	24
Obr. 2-11	Vliv průměru laserového paprsku na drsnost; upraveno z [15].....	25
Obr. 2-12	Vliv výkonu laseru a skenovací rychlosti na drsnost horního povrchu; upraveno z [4] .....	25
Obr. 2-13	Závislost lineární hustoty laserové energie na porozitě [10] .....	27
Obr. 2-14	a) závislost porozity na různých procesních parametrech; b) pro různé stavěcí úhly [23] .....	28
Obr. 2-15	Optické mikrografy porozity vzorků jako funkce výkonu a rychlosti [28]..	29
Obr. 2-16	Porozita funkcí a) laserového výkonu; b) hustoty laserové energie; upraveno z [25] .....	30
Obr. 2-17	Zbytkové napětí pro různé skenovací strategie [26] .....	31
Obr. 2-18	Porovnání tvrdosti a meze pevnosti v tahu materiálu IN718 pro různé skenovací podmínky; (I = ostrovní strategie, C= meander strategie, S = skenovací rychlost, R = mezivrstevní rotace) [30] .....	32

Obr. 2-19	Tvorba vytvrzujících fází; a) keyhole režim; b) conduction režim; upraveno z [32] .....	33
Obr. 2-20	Tlakový test tenké stěny s rozdílnými tloušťkami [32].....	34
Obr. 2-21	Měření těsnosti; a) Sniffer metoda; b) metoda vnitřního tlaku [35].....	35
Obr. 4-1	Schéma experimentálního cyklu.....	42
Obr. 4-2	Zařízení SLM 280 <sup>HL</sup> [37].....	44
Obr. 4-3	Mapa vybraných procesních parametrů pro návarové testy.....	45
Obr. 4-4	a) Rozložení vzorků na platformě; b) Rozložení 20 návarů na jednom vzorku (10 kombinací parametrů) .....	46
Obr. 4-5	a) Kontinuita návaru; b) balling efekt; upraveno z [13].....	47
Obr. 4-6	Geometrie návaru .....	47
Obr. 4-7	Vzorek tenkých stěn tvořených jedním návarem se stavebním úhlem: a) 90°; b) 45° .....	48
Obr. 4-8	Zaostření laserového paprsku.....	49
Obr. 4-9	Parametr beam compensation.....	50
Obr. 4-10	Rozdělení skenovací oblasti parametrem downskin v rámci jedné vrstvy...	51
Obr. 4-11	ISO KF systém; upraveno z [38] .....	53
Obr. 4-12	Schéma zařízení na měření těsnosti; 1 – rychlospojka; 2 – kohout; 3 – manometr; 4 – tlaková komora.....	53
Obr. 4-13	Detailní pohled na držák vzorku; 1 – trubka; 2 – centering ring; 3 – clamp; 4 – horní víko; 5 – vzorek; 6 – horní doraz; 7 – O-kroužek; 8 – spodní doraz; 9 – vymezovací kroužky DIN 988 .....	54
Obr. 4-14	a) Jednoduchá varianta navrženého výměníku; b) varianta s pruty pro odběr statického tlaku .....	55
Obr. 4-15	Pracovní postup.....	55
Obr. 4-16	Měření šířky návaru; a) po délce návaru; b) metalografický výbrus.....	56
Obr. 4-17	a) Měření šířky stěny po výšce; b) 3D snímek drsnosti; c) měření drsnosti profilovými čarami .....	57
Obr. 4-18	Cross section metoda [40] .....	58
Obr. 5-1	a) Přerušovaná stopa - vzorek 003 ( $P=100$ W, $v= 600$ mm/s); b) nejpravidelnější stopa – vzorek 032 ( $P=300$ W, $v= 700$ mm/s) .....	59
Obr. 5-2	Ztráta kontinuity návaru s rostoucí skenovací rychlostí; $P=300$ W .....	60



Obr. 5-3	Tvorba sintrovaných částic; a) pohled shora; b) metalografický výbrus .....	60
Obr. 5-4	Průměrná šířka návaru v závislosti na rychlosti skenování (horní pohled)..	61
Obr. 5-5	Závislost šířky návaru na hustotě energie .....	62
Obr. 5-6	Šířka návaru v závislosti na rychlosti skenování (výbrus) .....	63
Obr. 5-7	Závislost výšky návaru na rychlosti skenování .....	63
Obr. 5-8	Závislost hloubky průvaru na rychlosti skenování .....	64
Obr. 5-9	Tvar natavené oblasti v závislosti na rychlosti skenování .....	64
Obr. 5-10	Mapa procesních parametrů návarů .....	65
Obr. 5-11	Kandidát za oblast 3 (vzorek 032) .....	66
Obr. 5-12	Kandidát na oblast 4 (vzorek 010) .....	66
Obr. 5-13	Rozměry návarů pro zvolené podoblasti kombinací parametrů; a) šířka návaru; b) hloubka průvaru .....	67
Obr. 5-14	Parametry pro test tenkých stěn .....	68
Obr. 5-15	Rozložení vzorků na platformě - test tenkých stěn 1 (vlevo); horní pohled (vpravo) .....	68
Obr. 5-16	Vzorek s nejhorší kvalitou horního návaru - TD01-006 .....	68
Obr. 5-17	Vzorky s vizuálně nejlepší kvalitou horního návaru; (Oblast A - TD01-002; Oblast B - TD01-016; Oblast C - TD01-027) .....	69
Obr. 5-18	Změna šířky stěny s rostoucí skenovací rychlostí pro $P=250$ W .....	69
Obr. 5-19	Naměřená šířka stěn testu TS č. 1 .....	70
Obr. 5-20	Plošný graf závislosti šířky stěny (vlevo); Závislost šířky stěny na hustotě energie (vpravo) .....	70
Obr. 5-21	Drsnost povrchu testu TS č. 1 .....	71
Obr. 5-22	a) vzorek TD01-010 s drsností povrchu 6, 7 $\mu\text{m}$ ; b) barevný snímek povrchu .....	71
Obr. 5-23	Predikce optimálních parametrů – oblast C (minimální $S_a$ , minimální $w$ ) ..	72
Obr. 5-24	Ověření predikce optimálních parametrů .....	73
Obr. 5-25	Závislost průměru laserového paprsku (vlevo), a hustoty energie (vpravo) na parametru zaostření .....	74
Obr. 5-26	Drsnost povrchu se změnou zaostření (parametry $P=250$ W, $v= 800$ mm/s)	75
Obr. 5-27	Šířka stěny se změnou zaostření (parametry $P=250$ W, $v= 800$ mm/s) .....	75

Obr. 5-28	Změna morfologie návaru se změnou zaostření.....	76
Obr. 5-29	Rozměry návaru se změnou zaostření .....	76
Obr. 5-30	Šířka návaru se změnou zaostření.....	77
Obr. 5-31	Tenká stěna pod úhlem 45°.....	78
Obr. 5-32	Metalografický výbrus stěny pod úhlem 45° tvořené jedním návarem .....	78
Obr. 5-33	Analýza drsnosti povrchu pro TS pod úhlem 45° .....	78
Obr. 5-34	Porovnání tloušťky stěny vzorků stavěných kolmo a pod úhlem .....	79
Obr. 5-35	Stěna tvořená dvojím skenováním laseru.....	79
Obr. 5-36	Porovnání kolmých stěn tvořených dvojím a jednotným skenováním z hlediska drsnosti povrchu a šířky stěny .....	80
Obr. 5-37	Metalografický výbrus stěny tvořené dvojím skenováním .....	80
Obr. 5-38	Analýza drsnosti spodní a horní plochy stěn tvořených dvojím skenováním	81
Obr. 5-39	Deformace tenké stěny .....	81
Obr. 5-40	Přidané výztuhy tenkých stěn.....	82
Obr. 5-41	a) Vzorek se šířkou stěn 0,13 mm; b) deformace stěny délky 25 mm pro rozdílné šířky (pohled shora) .....	83
Obr. 5-42	Příklady rozdílných skenovacích strategií; a) pouze kontury; b) 1 kontura; c) 2 kontury .....	84
Obr. 5-43	Rozložení vzorků na platformě - test TS č. 3 .....	85
Obr. 5-44	Drsnost povrchu kolmých stěn pro rozdílné šířky a strategie .....	85
Obr. 5-45	Výbrus stěny šířky 1 mm (horní řada) a 2 mm (spodní řada) s rozdílnými strategiemi .....	86
Obr. 5-46	Výbrus stěny šířky 0,5 mm pro strategie: a) pouze kontury; b) jedna kontura; c) dvě kontury .....	86
Obr. 5-47	Drsnost spodní a horní plochy stěn pod úhlem pro rozdílné šířky a strategie... ..	87
Obr. 5-48	Naměřené drsnosti s parametrem downskin.....	88
Obr. 5-49	Porovnání bočního povrchu objemových vzorků s parametry od dodavatele ..	89
Obr. 5-50	Porovnání hustoty materiálu s rozdílnou skenovací strategií.....	90
Obr. 5-51	Vývoj materiálového souboru procesních parametrů IN718 pro součásti kombinující tenkostěnnou a objemovou geometrii s výškou vrstvy 50 μm	91

Obr. 5-52	a) Vzorek tenkostěnné struktury; b) metalografický výbrus řezu strukturou	93
Obr. 5-53	Prutové vzorky; 1 kontura vlevo; 2 kontury vpravo.....	94
Obr. 5-54	Drsnost povrchu skloněných prutů pod rozdílnými stavebními úhly.....	94
Obr. 5-55	a) Měřicí aparatura těsnosti tenkých stěn; b) vzorky stěn 0,13 až 0,45 mm ..... .....	94
Obr. 5-56	Výsledek tlakového testu tenkých stěn.....	95
Obr. 5-57	a) Vyrobené součásti; b) sestava pro tlakovou zkoušku .....	96
Obr. 5-58	Identifikovaná oblast úniku plynu .....	96
Obr. 5-59	Defekty jednotné skenovací dráhy v náhodných řezech součásti.....	96
Obr. 5-60	Špatná kvalita sítě způsobující defekty skenovací dráhy .....	97
Obr. 5-61	Kvalita vygenerovaných drah stěny o šířce 0,2 mm.....	98

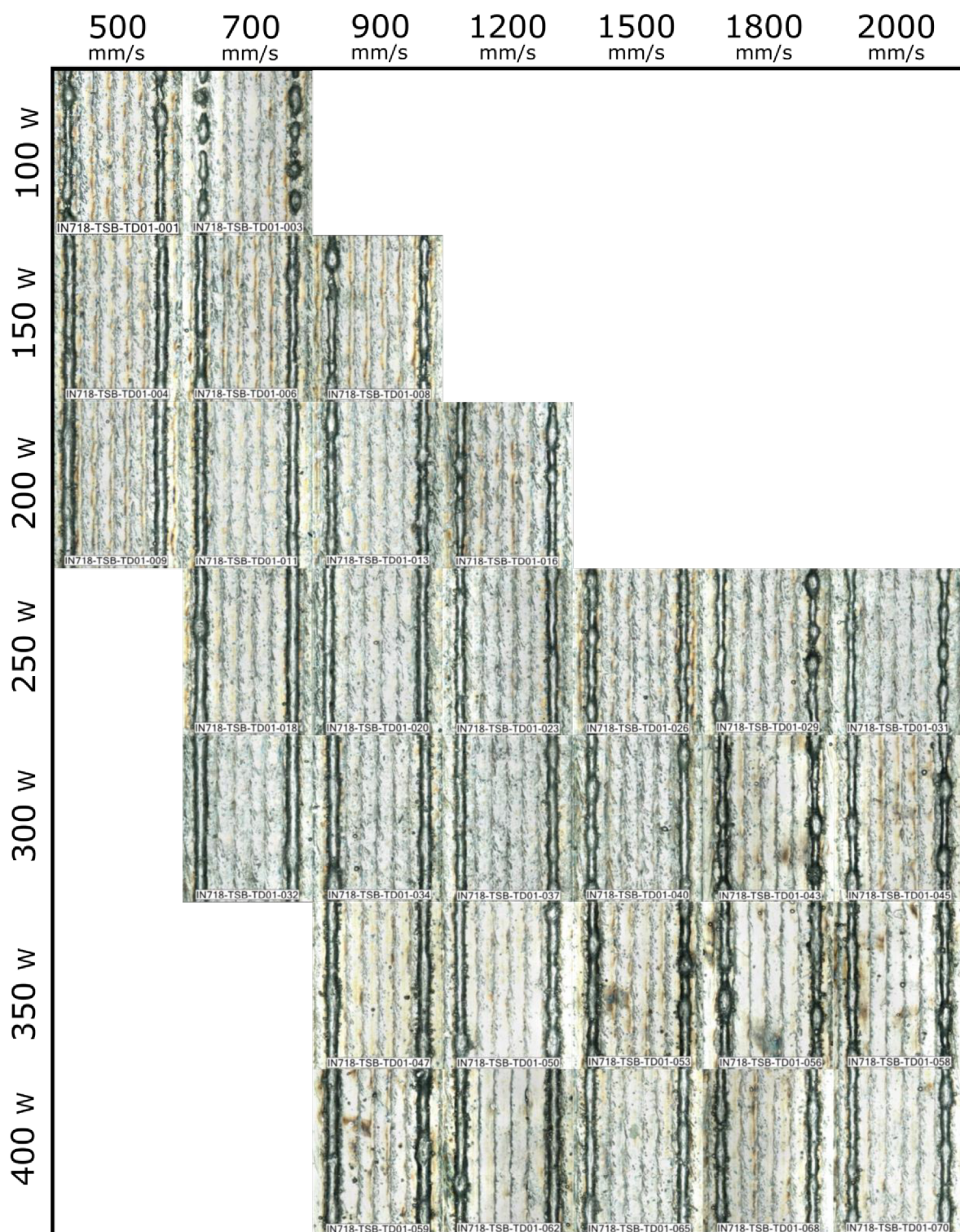
## 11 SEZNAM TABULEK

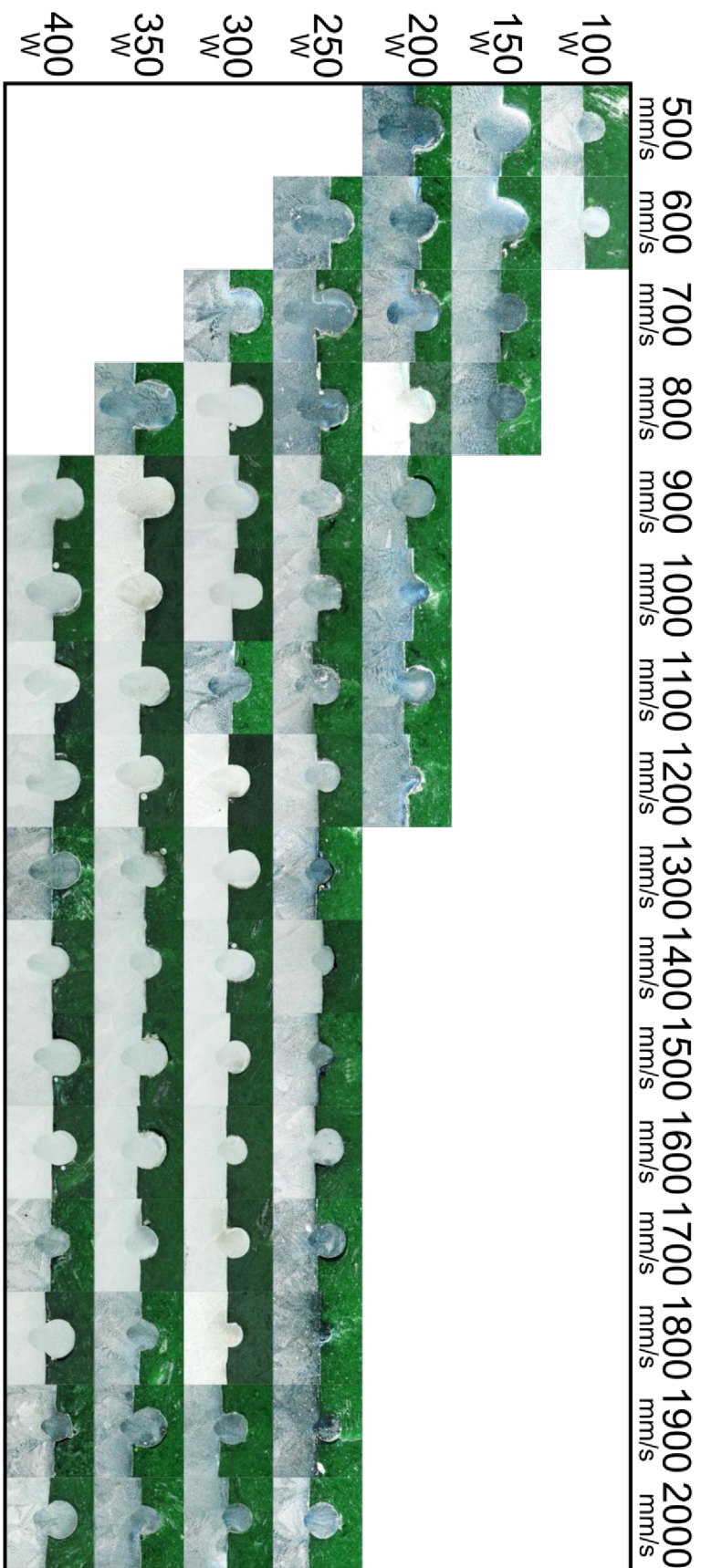
Tab. 2-1	Fyzikální a mechanické vlastnosti; pro tloušťku vrstvy 30 $\mu\text{m}$ [8] [9].....	17
Tab. 2-2	Vlastnosti IN 718 pro různé tloušťky [24] .....	26
Tab. 2-3	Použité procesní parametry pro pórovitost 0,12 %; tloušťka vrstvy 50 $\mu\text{m}$ ; stavěcí úhel 35° .....	29
Tab. 3-1	Objemové převísle vzorky (spodní povrch) .....	37
Tab. 3-2	Objemové vzorky - drsnost horního povrchu .....	38
Tab. 3-3	Objemové vzorky – porozita .....	38
Tab. 4-1	Výrobní parametry stroje SLM 280 HL [37].....	45
Tab. 5-1	Získané kombinace parametrů s jejich predikcí .....	72
Tab. 5-2	Zaostření laserového paprsku.....	74
Tab. 5-3	Vstupní parametry pro experiment maximální délky skenování .....	82
Tab. 5-4	Parametry pro test stěn o šířce 0,5; 1; a 2 mm .....	85
Tab. 5-5	Downskin parametry od výrobce.....	88
Tab. 5-6	Naměřené šířky kolmých stěn .....	88
Tab. 5-7	Naměřené šířky stěn pod úhlem 45° .....	88
Tab. 5-8	Získané parametry pro rozdílné skenování = průnik geometrií .....	92
Tab. 5-9	Předpokládané drsnosti stěn s parametry dvojího skenování .....	92
Tab. 5-10	Vyhodnocení těsnosti tenkých stěn .....	95

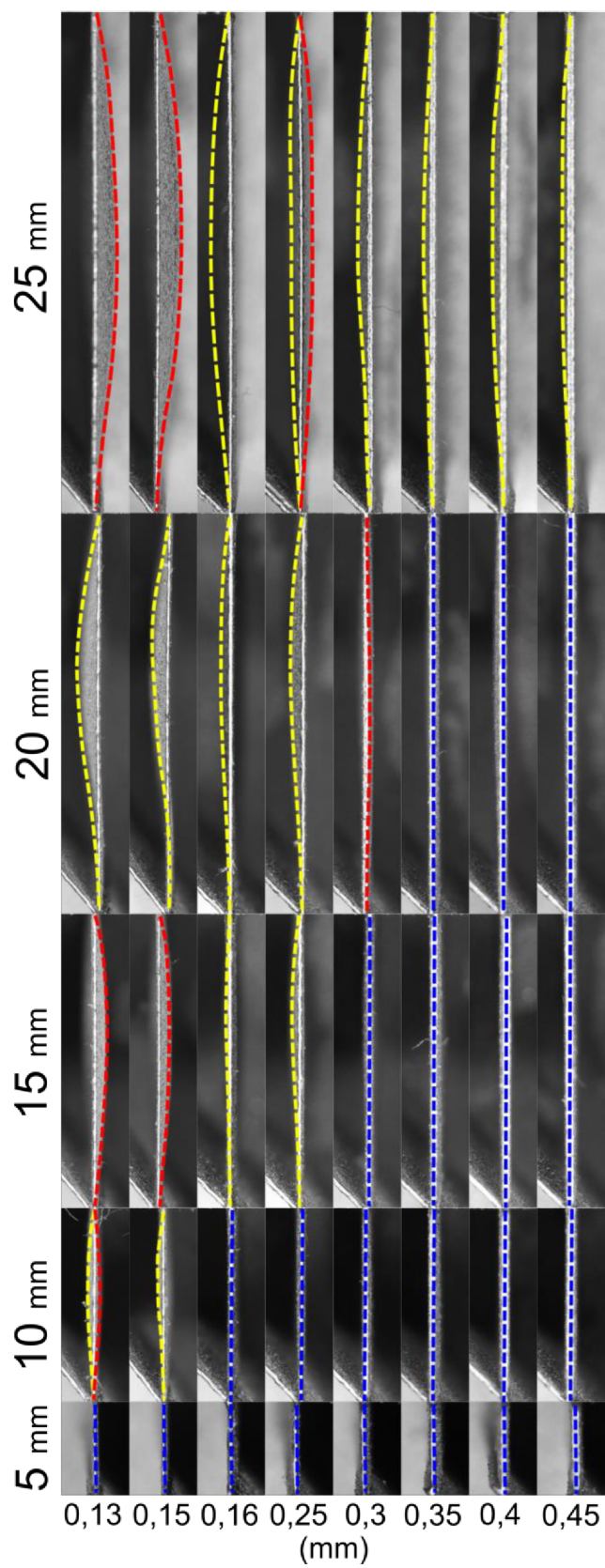
## 12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Horní pohled na kontinuitu návarů .....	117
Příloha 2	Vyleptané metalografické výbrusy návarů.....	119
Příloha 3	Horní pohled na deformaci stěny různých délek a rozdílných šířek .....	120
Příloha 4	Geometrie jednoduchého výměníku .....	121

Příloha 1 Horní pohled na kontinuitu návarů









Příloha 4 Geometrie jednoduchého výměníku

