



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 STAVĚCÍ STRATEGIE PRO VÝROBU TRUBEK POMOCÍ 3D TISKU KOVŮ

DEVELOPMENT OF PROCESSING STRATEGY FOR MANUFACTURING OF TUBES USING METAL
ADDITIVE MANUFACTURING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Albert Zemek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Albert Zemek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

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

Vývoj stavěcí strategie pro výrobu trubek pomocí 3D tisku kovů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aditivní technologie selective laser melting umožňuje výrobu dílů velmi komplexních tvarů, nicméně se potýká s komplikacemi v oblasti převislé geometrie a dutin. Převislé oblasti jsou při výrobě podepřeny tzv. podpůrnými strukturami, které je posléze nutné mechanicky odstranit. V případech špatně přístupných nebo uzavřených dutin může být použití podpůrných struktur limitujícím faktorem jelikož jejich odstranění není možné, proto je nutné upravit parametry výroby tak, aby bylo možné díl vyrobit i bez podpůrných struktur.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je nalezení vhodné kombinace výrobních parametrů SLM procesu pro výrobu převislé geometrie za těchto podmínek: minimální deformace dílu, bez použití nebo s minimálním využitím podpůrných struktur, zejména pro díly typu trubka.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- identifikovat vhodné kombinace parametrů dle současné literatury,
- navrhnout experimentální tělesa, metody testování a vyhodnocení,
- navrhnout výrobní strategie a rozsahy ověřovaných parametrů,
- realizovat a vyhodnotit navržené experimenty.

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

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

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

ATZENI, E. a A. SALMI. Study on unsupported overhangs of AISi10Mg parts processed by Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Journal of Manufacturing Processes [online]. 2015, roč. 20, s. 500–506. ISSN 15266125.

FOX, J. C., S. P. MOYLAN a B. M. LANE. Effect of Process Parameters on the Surface Roughness of Overhanging Structures in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. Procedia CIRP [online]. 2016, roč. 45, s. 131–134. ISSN 22128271.

GAN, M.X. a C.H. WONG. Practical support structures for selective laser melting. Journal of Materials Processing Technology [online]. 2016, roč. 238, s. 474–484. ISSN 09240136.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá hledáním vhodných výrobních strategií pro stavbu převislých částí bez použití podpůrných struktur v technologii Selective Laser Melting. Hlavní zaměření studie je na výrobu kruhových částí, které jsou velmi častým konstrukčním prvkem. V práci byly navrženy testovací vzorky pro různé výrobní parametry. Dále byla otestována inovační funkce pro nekonstantní nastavení parametrů při výrobě. Po vyrobení byly vzorky otestovány z hlediska rozměrové přesnosti a výsledky vyhodnoceny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Převislé části, Selective Laser Melting, SLM, Trubky, 316L

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on finding a suitable process parameters for building an overhanging parts without need of any support structure in Selective Laser Melting process. The main focus is on fabrication of circular parts, which are often used in the industry. In this paper, there were designed test specimens for different process parameters. Also a novel function for nonconstant process parameters was probed. After the fabrication, the specimens were tested in order to evaluate their dimension accuracy.

KEY WORDS

Overhanging parts, Selective Laser Melting, SLM, Pipes, 316L

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZEMEK, A. *Vývoj stavěcí strategie pro výrobu trubek pomocí 3D tisku kovů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Danielu Koutnému, Ph.D za poskytnuté rady a připomínky při zpracování práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci *Vývoj stavěcí strategie pro výrobu trubek pomocí 3D tisku kovů* jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce doc. Ing. Daniela Koutného, Ph.D. Současně prohlašuji, že jsem v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 19. května 2017

.....
Podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD	12
2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
2.1 Technologie Selective Laser Melting	13
2.2 Využití	14
2.3 Problémy SLM	15
2.3.1 Deformace	15
2.3.2 Kvalita povrchu	16
2.3.3 Hustota	18
2.3.4 Podpůrné struktury	18
2.4 Optimalizační postupy	18
2.4.1 Orientace součásti	18
2.4.2 Výrobní parametry	19
2.4.3 Způsob skenování	22
2.4.4 Vliv předehřevu	24
2.4.5 Re-melting	25
2.4.6 Princip skin-core	25
2.4.7 Post-processing	25
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	26
3.1 Cíle práce	26
4 MATERIÁL A METODY	27
4.1 Zařízení SLM	27
4.2 Použitý materiál	27
4.3 Návrh vzorků	27
4.4 Návrh výrobních strategií	28
4.4.1 Funkce Down Skin	29
4.5 Způsob vyhodnocení	29
4.6 Pracovní postup	30
5 VÝSLEDKY	31
5.1 Vliv velikosti součásti	32
5.2 Vliv množství vstupní energie	33
5.3 Vliv funkce Down Skin	33
6 DISKUZE	34
7 ZÁVĚR	35
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	36
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	40
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	41
11 SEZNAM TABULEK	42

1 ÚVOD

Aditivní technologie zažívají v posledních letech výrazný vzestup jak v oblasti výroby prototypů, tak i při výrobě konečných produktů a součástí. Jejich hlavní výhodou je tvarová variabilita a snadná možnost přizpůsobení výrobku potřebám zákazníka.

Mezi nejrozšířenější způsoby aditivní výroby z kovového materiálu patří Selective laser melting. Tato metoda, podobně jako ostatní způsoby 3D tisku, vytváří požadovaný objekt vrstvu po vrstvě, přičemž v každé nové vrstvě je nanesen prášek, který je roztaven v daných místech pomocí laserového paprsku.

Při výrobě součástí komplexních tvarů vznikají převislé oblasti, které je vhodné podepřít podpůrnými strukturami. Tyto struktury je nutné po výrobě odstranit. Při výrobě dutin, u kterých není možné odstranit podpůrné struktury, musí být daná oblast vytvořena bez jejich pomoci. Stavěný objekt je tedy podepírán pouze kovovým práškem, který má výrazně rozdílné vlastnosti oproti plnému materiálu. Nedochozí k dostatečnému odvodu tepla z místa tavení a zároveň má součást více prostoru pro deformaci svého tvaru, jelikož není dostatečně ukotvena.

Jedním ze způsobů, jak zabránit nežádoucím efektům při výrobě převislých geometrií nebo dutin je úprava výrobních parametrů tisku, jimiž se bude zabývat tato práce.[1;2]

2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2

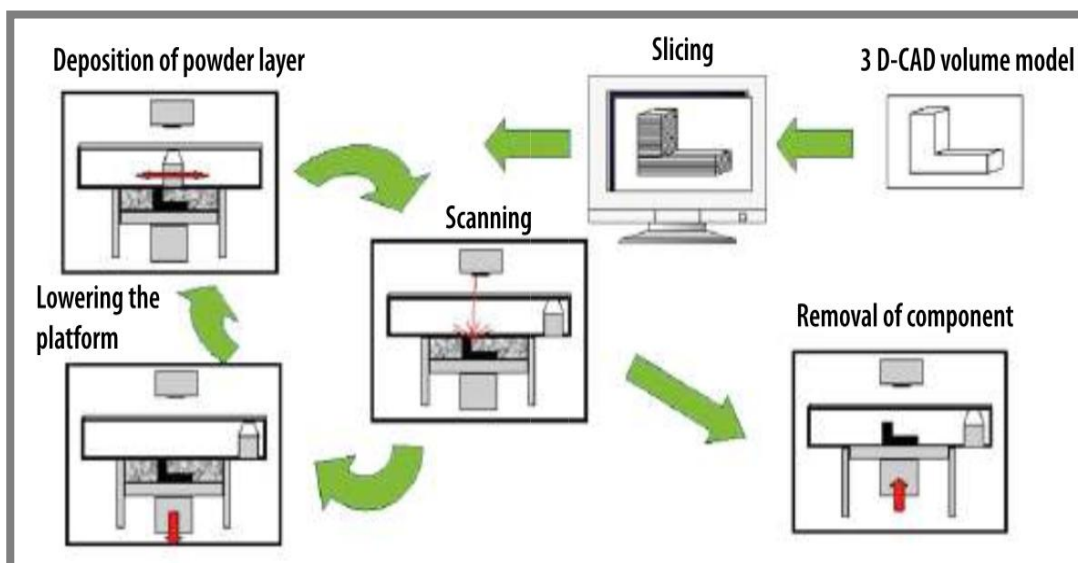
Aditivní technologie představují rozsáhlou oblast moderních technologií. Nejznámějšími způsoby aditivní výroby jsou Fused deposition modeling (FDM), pracující většinou s termoplasty, dále Stereolitografie (SLA), kde dochází k vytvrzování tekutého polymeru pomocí UV záření. V oblasti zpracování kovových materiálů jsou nejpřednější technologie Selective laser melting (SLM), Selective laser sintering (SLS), která na rozdíl od SLM nezpůsobí úplné roztavení materiálu, Electron beam melting (EBM), která využívá stejný princip jako SLM, ovšem zdrojem energie je urychlený svazek elektronů, a další. [1]

V této práci se dále budeme zabývat pouze technologií Selective laser melting.

2.1 Technologie Selective Laser Melting

2.1

Selective laser melting (SLM) patří do kategorie tzv. powder bed fusion. To znamená, že výchozím materiálem je prášek, který je nanášen vrstvou po vrstvě a stavěný výrobek je stále celý obklopen tímto práškem. Výchozím bodem pro SLM je tvorba 3D virtuálního modelu součásti ve formátu STL, jenž je základem pro většinu aditivních technologií. V dalším kroku je model vložen na virtuální stavěcí platformu, jsou přidány podpůrné struktury a nastaveny výrobní parametry. Dále je model rozložen na jednotlivé vrstvy a převeden do SLM zařízení.

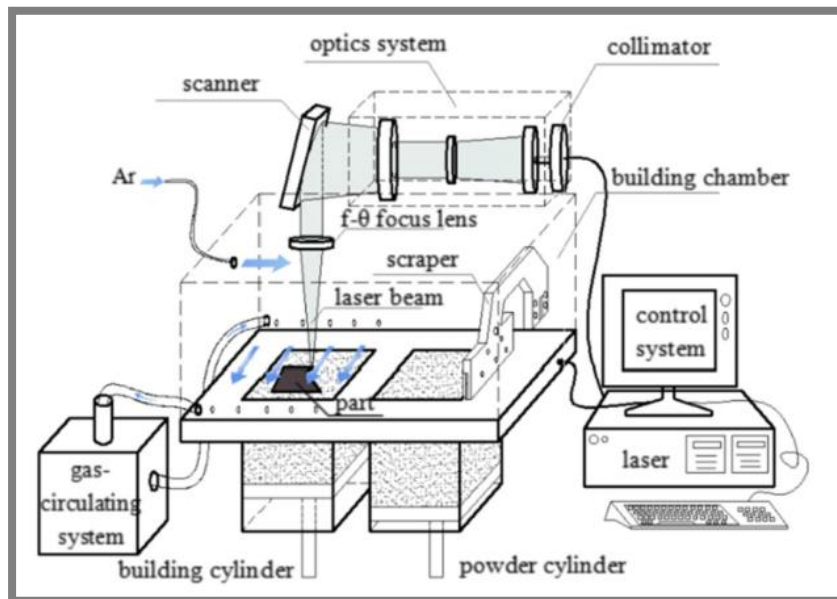


Obr. 2-1 Princip SLM [4]

Následně je práškový materiál postupně nanášen ve vrstvách s danou tloušťkou (v řádech desítek mikrometrů). Mezi každou novou vrstvou je provedeno zahřátí kovového prášku nad teplotu tavení v oblastech korespondujících s danou vrstvou (skenování). Zdrojem energie k vytvoření požadovaného tepla je výkonný vláknový laser. Jelikož dochází k úplnému roztavení kovového prášku, je možno dosáhnout výsledné hustoty téměř sto procent. Celý proces probíhá v inertní atmosféře (argon, dusík), pro zabránění nežádoucích reakcí kyslíku s taveninou.

Dále probíhá následné zpracování vyrobené součásti (post-processing). Po dokončení stavby je odstraněn veškerý zbylý prášek, který bude následně znovu využit. Výslednou součást je nutno po výrobě odříznout ze stavěcí platformy, ke které je pevně ukotvena, a odstranit všechny podpůrné struktury použité při stavbě. Dále může být použito tepelné zpracování, např. pro snížení vnitřního pnutí, nebo např. pískování pro zlepšení kvality povrchu. [4;5]

Technologii SLM lze zpracovávat celou řadu kovových materiálů. Je možné pracovat s nástrojovými a nerezovými oceli, slitinami titanu, hliníku, niklu, mědi a dalšími. Zároveň v současné době probíhá rozsáhlý výzkum v oblasti materiálů pro použití v aditivní výrobě. [6;7]



Obr. 2-2 Schéma zařízení SLM [8]

2.2 Využití

Technologie SLM v současné době nachází uplatnění především při rychlé výrobě prototypů (tzv. rapid prototyping). Při výrobě koncových součástí jde zejména o tvarově velmi složité díly o malých počtech kusů, u kterých by jiný způsob výroby byl více nákladný. Jako příklad může sloužit výroba implantátů pro lékařství, jelikož je často potřeba upravit tvar a rozměry potřebám pacienta, nebo výroba nástrojů s chladicími kanálky. [4]



Obr. 2-3 Příklady využití [4]

Další oblastí je výroba odlehčených součástí pomocí cíleného tvarování, kdy je pomocí výpočtových simulací zjištěno minimální množství potřebného materiálu. Ačkoli je vzniklý tvar pro běžné obráběcí postupy příliš komplikovaný, pomocí SLM lze vytvořit téměř neomezená geometrie.[4;9]

Podíl výroby na trhu pomocí technologie SLM rok od roku stoupá a uplatnění nachází napříč celou průmyslovou oblastí, především však v letectví, automobilovém a lékařském průmyslu.



Obr. 2-4 Příklady odlehčení součásti (původní tvar vlevo) [9]

2.3 Problémy SLM

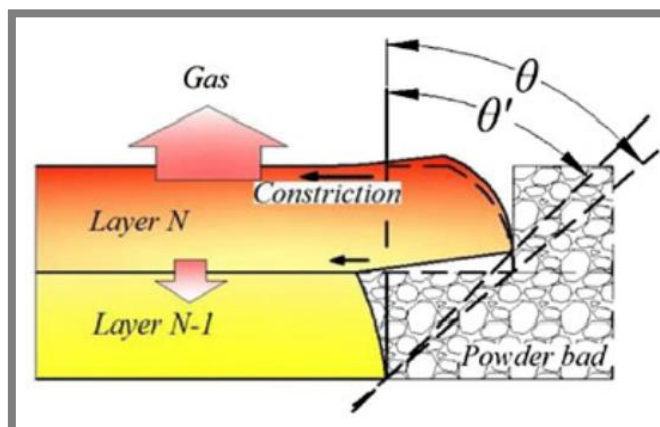
Přes značný pokrok a rozvoj této technologie v posledních letech, stále zde přetrvávají určitá omezení pro stavbu a následné použití vyrobených součástí.

2.3

2.3.1 Deformace

Mezi jednu z hlavních příčin těchto omezení patří deformace výrobku. Vlivem rychlých teplotních změn při tavení materiálu a jeho následném chladnutí se v součásti akumuluje zbytkové napětí. Toto napětí se projevuje smršťováním chladnoucí vrchní vrstvy, kterému zabraňuje již ztuhlá předchozí vrstva. Smršťování ovšem není izotropní, jelikož je zde vliv způsobu skenování, o kterém bude pojednáno později [10;12]. Při stavbě převyšujících ploch, které podepírá pouze kovový prášek, dochází k deformaci (tzv. warping) směrem nahoru (viz obr. 2-6), způsobenou vnitřním pnutím a nedostatkem podpurných struktur, které by držely převis na požadovaném místě.[13]

2.3.1



Obr. 2-5 Princip deformace [13]

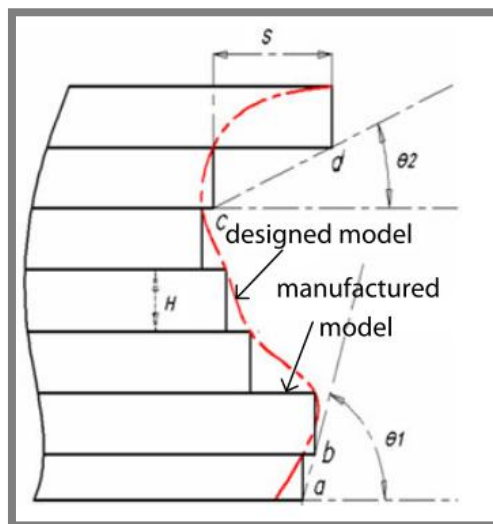
Vnitřní napětí může v extrémních případech vést až ke vzniku trhliny (viz obr. 2-6) nebo k oddělení součásti od základní platformy. Častěji však dojde pouze k deformaci tvaru, obzvláště v takových případech, kdy součást není dostatečně ukotvena pomocí podpůrných struktur.[11]



Obr. 2-6 Důsledek extrémního vnitřního napětí [12]

2.3.2 Kvalita povrchu

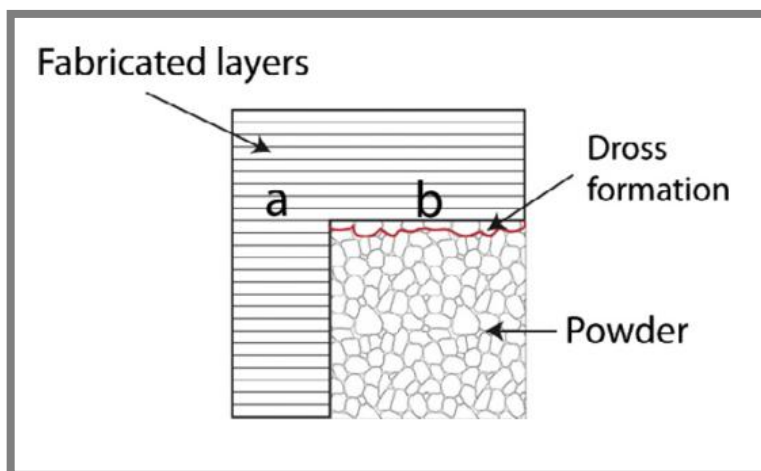
Velkým omezením technologie SLM je často nedostatečná kvalita povrchu. Jednou z hlavních příčin je tzv. schodovitý efekt (staircase effect). Ten se vyskytuje víceméně v každé aditivní výrobě založené na přidávání materiálu vrstvu po vrstvě.



Obr. 2-7 Schodovitý efekt [13]

Vzniká odchylkou mezi požadovaným a vyrobeným tvarem, především na skloněných a zakřivených stěnách (viz obr. 2-7). Zlepšení může být dosaženo změnou tvaru výrobku nebo pomocí snížení tloušťky vrstvy. To ovšem lze pouze do určitého bodu, jelikož tloušťka vrstvy se odvíjí od velikosti jednotlivých zrn prášku. Tvar součásti také často nelze změnit z funkčních důvodů.[14]

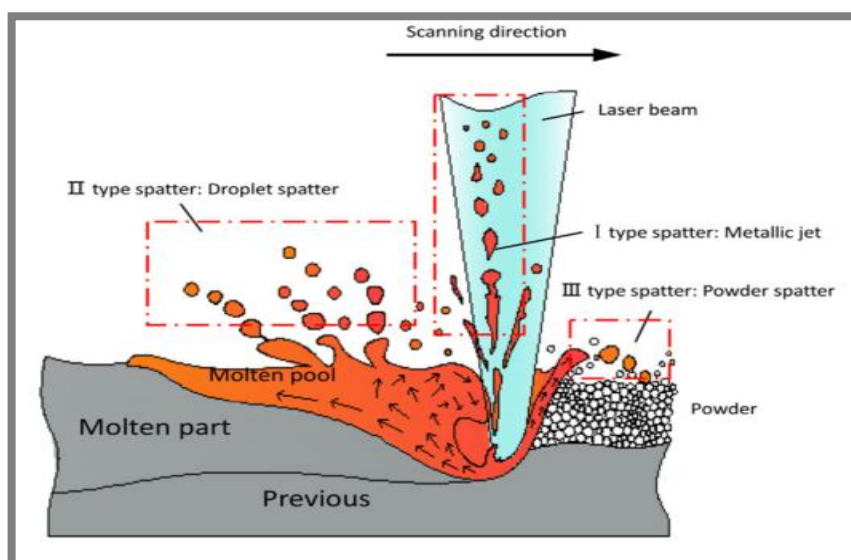
Další způsob vzniku nekvalitního povrchu je stavba převislých částí na kovovém prášku (viz obr. 2-8). V oblastech, kde není pod místem tavení pevný materiál, je výrazně snížena tepelná vodivost (až stokrát) [13]. V těchto místech tedy dojde k výrazné akumulaci tepla, která vede ke zvětšení oblasti roztaveného kovu. Následuje pokles taveniny vlivem gravitace a kapilárních sil do kovového prášku (tzv. dross formation). Tím se zhorší kvalita povrchu i rozměrová přesnost.[3]



Obr. 2-8 Zhoršení kvality povrchu u převislých ploch [3]

Mezi další vlivy patří ulpívání částečně roztaveného prášku na součásti, což taktéž zhoršuje kvalitu povrchu. Dochází k němu, když laser nataví pouze část zrna, které se spojí se součástí. Jelikož ale nedojde k plnému roztavení prášku, neroztavená část vytváří výstupky nad povrch součásti, a tedy zhoršuje jeho výslednou kvalitu [14]. Tento problém lze zmenšit použitím prášku s menšími velikostmi zrn.

V neposlední řadě přispívá ke zhoršení povrchu rozstřík taveniny nebo prášku při výrobě. Při nárazu vysoce energetického laserového paprsku na materiál vzniká tlak, který dodá části taveniny rychlost, se kterou se dostane mimo místo tavení. Roztavené kapky mají mnohem větší velikost, než částice prášku. Přilepením na



Obr. 2-9 Vznik rozstříku [8]

povrchu součásti komplikují další stavbu, mohou způsobit porozitu materiálu a zhoršují celkovou kvalitu povrchu. Snížení tohoto jevu lze docílit úpravou parametrů vstupní energie k nižším hodnotám.[8]

2.3.3 Hustota

Technologie SLM je schopna produkovat výrobky s téměř stoprocentní hustotou. Výsledná hustota však velmi závisí na procesních parametrech. V určitých případech (např. při vyšších rychlostech skenování) může poklesnout až o více než deset procent. S tím je třeba počítat při návrhu součástí, které budou v reálném provozu.[15]

2.3.4 Podpůrné struktury

Podpůrné struktury zastávají důležitou roli při výrobě kteroukoliv z aditivních technologií. Jejich hlavním účelem je odvod tepla a fixace součásti vůči základní desce pro zabránění deformace. U SLM jsou tyto struktury vytvářené ze stejného materiálu jako koncová součást. Při odstraňování podpor je potřeba vyvinout značné úsilí, jelikož jsou se součástí spojeny na atomární bázi, což znesnadňuje jejich odstranění. Velké množství podpůrných struktur vyžaduje náročný post-processing a zvyšuje spotřebu materiálu, což vede ke snížení efektivity celého procesu a nárůstu času potřebného na výrobu. V konečném důsledku dochází k výraznému zvýšení nákladů na výrobu.[3]

2.4 Optimalizační postupy

Výše zmíněné nedostatky lze do určité míry potlačit zvolením vhodných postupů a pravidel. V současné době ovšem není možné vytvořit neomezený tvar, či dosáhnout vždy optimální kvality povrchu. Proto je nutné nalézt vždy co nejefektivnější způsob stavby pro každou součást.

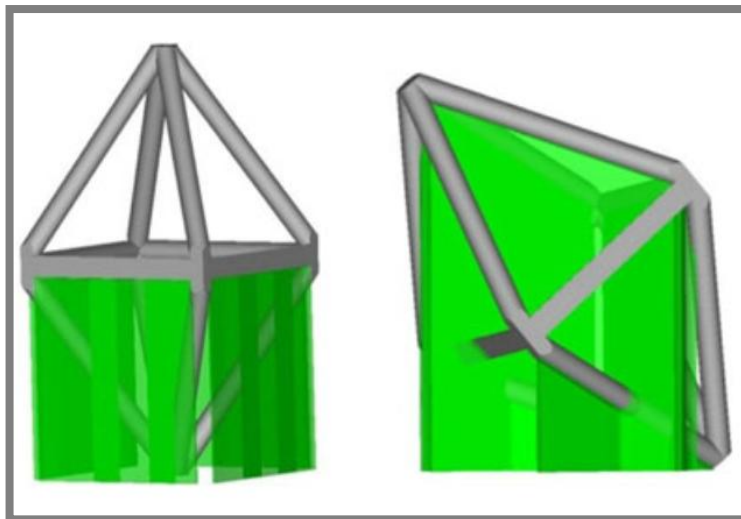
2.4.1 Orientace součástí

Minimalizace podpůrných struktur je klíčovým faktorem pro zlepšení efektivity výrobního procesu. Největší vliv na množství podpůrných struktur má orientace dílu při výrobě a množství převislých oblastí. Právě tyto převislé oblasti, které jsou podepírány pouze kovovým práškem, je nutno zajistit podpůrnými strukturami. To ovšem neplatí pro mírně skloněné povrchy - tzv. samonosné plochy (self-supporting surfaces). Ty je možno vyrobit i bez podpůrných struktur. Literatura [3;13] udává bezpečný úhel pro samonosné plochy úhel větší než 45° mezi základní deskou a danou plochou.

Das a kol. [16] navrhli výpočetní postup pro určení optimální polohy součástí na stavěcí platformě. Pomocí softwaru Siemens PLM NX API byl vytvořen model, který přiřadí ke CAD datům uživatelem nastavené maximální geometrické odchylky. Následně je součástí rotováno kolem os x a y (stavba probíhá ve směru osy z), a ke každé kombinaci je vypočítán objem podpůrných struktur. Zároveň je vypočítána odchylka tvaru od CAD modelu (především na základě schodovitého efektu).

Orientace součásti s nejnižším množstvím podpůrných struktur, která zároveň splňuje požadované tolerance, je považována za neoptimálnější možnou pro finální stavbu.

Obr. 2-10 ilustruje důležitost minimalizace podpůrných struktur (na obr. zeleně). Vlevo je použito minimum podpůrných struktur, naopak na pravém obrázku je jejich počet maximální. Rozdílem je více než dvojnásobné množství použitých podpor.[17]



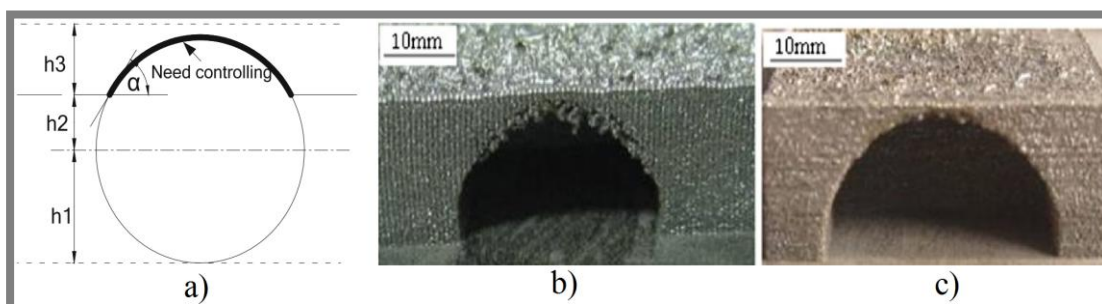
Obr. 2-10 Rozdílné orientace a množství podpůrných struktur [17]

2.4.2 Výrobní parametry

Správné nastavení výrobních parametrů je klíčové pro úspěšnou výrobu jakékoliv součásti. Yadroitsev [18] uvádí, že v SLM procesu existuje více než 130 parametrů, které mohou ovlivnit výslednou kvalitu vyráběné součásti. Mezi tyto parametry patří především výkon laseru, rychlost skenování, vzdálenost mezi jednotlivými drahami laseru (hatch distance), tloušťka vrstvy, strategie skenování, druh ochranné atmosféry, předehřev a další. Vhodnou kombinací jednotlivých parametrů lze dosáhnout výrazného zlepšení kvality součásti. Klíčové je především nalezení optimálních parametrů pro převislé oblasti v takových místech, ve kterých nemohou být použity podpůrné struktury.

Wang a kol. [13] se ve své práci zaměřili na klíčové parametry, které ovlivňují kvalitu vyrobeného převisu, především výkon laseru, rychlost skenování a úhel

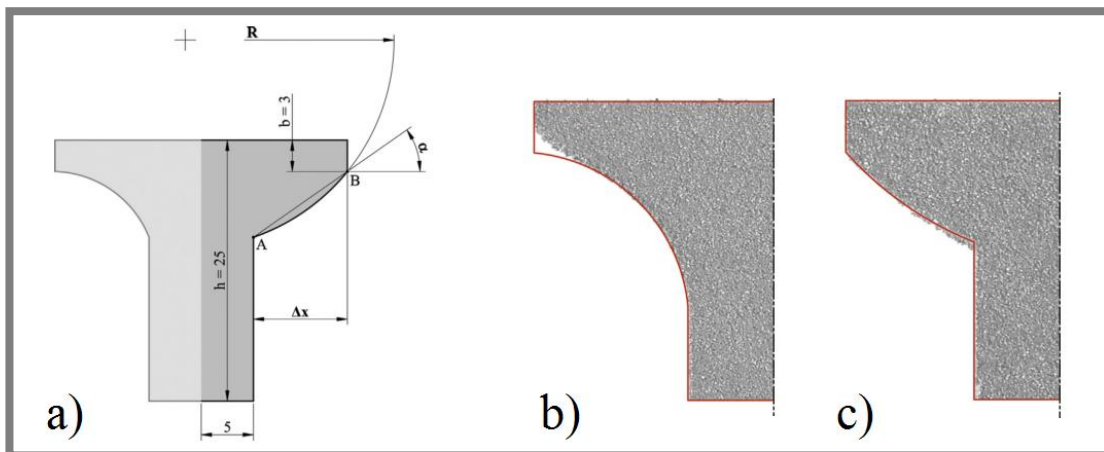
2.4.2



Obr. 2-11 Vliv změny parametrů [13]

sklonu převislé stěny. Z experimentů vyplynulo, že čím větší je vstupní energie (vyšší výkon laseru nebo nižší rychlost skenování) a nižší úhel sklonu převisu vůči stavěcí platformě, tím je výsledná kvalita vzorků horší. Tudiž při nízkém úhlu převisu je třeba snížit vstupní energii. To bylo testováno na půlkruhovém otvoru viz. obr. 2-11. Obr. 2-11a) znázorňuje kruhový otvor, kde v oblasti h_3 , po překročení kritického sklonu α , dojde ke změně určitých parametrů stavby. Při zvýšení rychlosti skenování v oblasti h_3 z původní rychlosti 200 mm/s (obr. 2-11b) na rychlost 600 mm/s (obr. 2-11c), při zachování stejného výkonu laseru, došlo k výraznému zlepšení kvality převisu. Množství vstupní energie má velmi výrazný vliv na výslednou kvalitu výrobku. Je třeba ovšem brát v potaz, že při vyšších rychlostech skenování může poklesnout výsledná hustota vyrobené součásti.[13]

Atzeni a kol. [19] analyzují geometrické parametry, které charakterizují převislé oblasti, s cílem vyhodnotit rozměrovou přesnost převislých stěn. Byly vytvořeny vzorky ve tvaru písmene T s konkávní nebo konvexní převislou stěnou, přičemž proměnné parametry byly úhel α , zakřivení $1/R$ a poměrná velikost převisu $b/\Delta x$ (viz obr. 2-12a). Obecně lze říci, že čím je úhel α větší, tím je větší i přesnost vyrobeného vzorku. Z výsledků dále vyplývá, že pro větší velikosti úhlů sklonu je vhodnější konkávní převis (obr. 2-12b), kdežto pro úhly menší je vhodnější zvolit konvexní

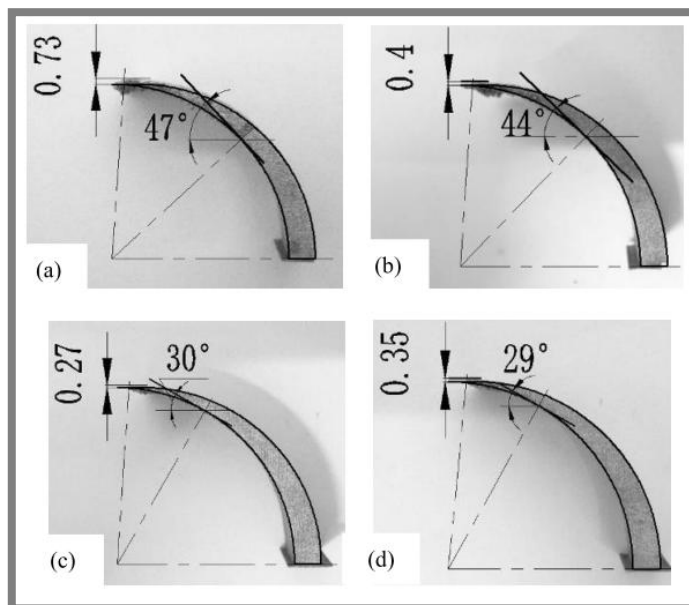


Obr. 2-12 Vliv zakřivení převislé části [19]

zakřivení (obr.2-12c). V případě konkávního převisu dochází k výrazné deformaci tvaru na vrchním konci převisu vlivem akumulovaného warping defektu. Naopak u konvexního tvaru dochází k poklesu materiálu ve spodní části převisu, jelikož se v této oblasti tiskne velká část na kovovém prášku a dochází tak k nedostatečnému odvodu tepla, což způsobí propad vlivem gravitace.[19]

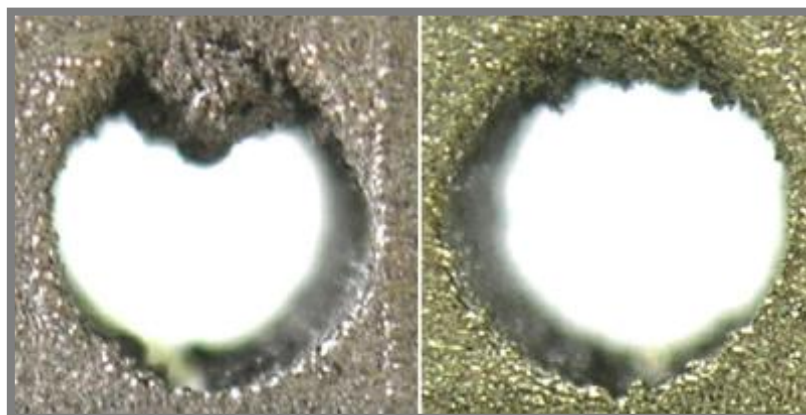
V další práci Wang a kol. [20] provedli studii, kde autoři sledují, jaký vliv má vstupní energie laseru na převislou strukturu. Ta má tvar oblouku, přičemž se ve směru stavby postupně ztenčuje. Na svém vrcholu je součást tvořena pouze tenkou vrstvou materiálu. Při konstantním výkonu laseru 120 W lze při rychlosti 200 mm/s (vstupní energie odpovídá 0,6 J/mm) pozorovat zhoršenou kvalitu od úhlu 47° (obr. 2-13a), při rychlosti 400 mm/s lze dosáhnout úhlu 30° (obr. 2-13b) Dále lze pozorovat, že při dalším snižování vstupní energie nedochází k výraznému zlepšení

kvality převisu (obr. 2-13c,d). Pro nízké úhly převisu autoři uvádějí optimální hodnotu vstupní energie (poměr výkonu a rychlosti skenování) 0,15-0,20 J/mm pro ocelový materiál (316L).[20]



Obr. 2-13 Převislé struktury [20]

Kruth a kol. [21] ve své práci provedli úpravu SLM tiskárny tak, aby byla schopna vyhodnocovat velikost roztavené oblasti (tzv. melting pool) v reálném čase a zpětnou vazbou mohla korigovat množství vstupní energie. Cílem bylo zachovat po celou dobu stavby stejnou velikost roztavené oblasti. Do zařízení byla přidána fotodioda a vysokorychlostní kamera. V případě, že byl odvod tepla nedostatečný (v místech podpíraných kovovým práškem), a melt pool se zvětšoval, zařízení snížilo výkon laseru. Při porovnání se vzorky s konstantními parametry je patrné výrazné zlepšení kvality převislého povrchu (obr. 2-14). [21]

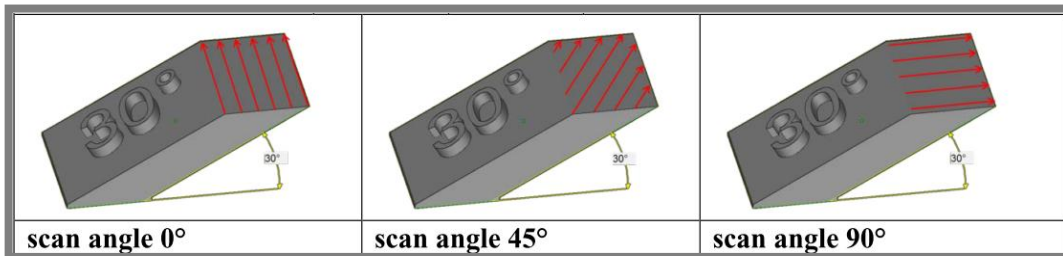


Obr. 2-14 Výroba bez úpravy parametrů (vlevo) a s úpravou (vpravo) [21]

2.4.3 Způsob skenování

Velký vliv na výslednou kvalitu součásti má strategie skenování. Tím se označuje cesta, směr a pořadí, jakým laser v jednotlivých vrstvách taví materiál. Existuje velké množství způsobů skenování, u kterých lze ještě dále nastavovat jednotlivé rozměrové parametry (velikost překrytí, hatch distance a další). Způsob skenování má významný vliv na tvorbu zbytkového napětí, a tedy i na rozměrovou přesnost výrobku.

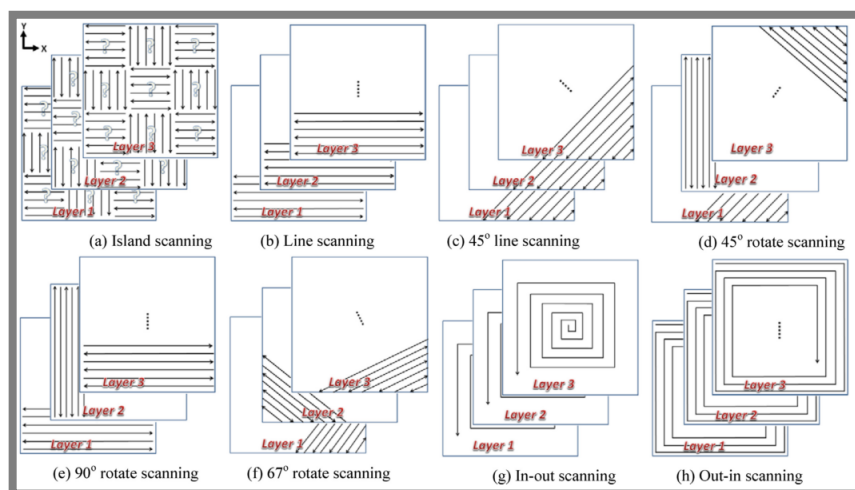
Cloots a kol. [22] se snažili vyrobit co nejvíce sklopenou šikmou stěnu, a určit kombinaci těch nejvhodnějších parametrů. Mezi sledovanými parametry byly rychlost skenování, hatch distance a tři různé orientace skenovacích vektorů (viz obr. 2-15). Experimenty ukázaly, že největší vliv na kvalitu vyrobené převislé stěny má způsob skenování. Nejlepších výsledků dosáhlo skenování rovnoběžně s hranou převisu (scan angle 0° , viz obr. 2-15), přičemž pouze tímto způsobem byla vyrobena stěna skloněná pod úhlem pouze 20° . V této orientaci bylo také dosaženo lepších



Obr. 2-15 Tři způsoby skenování [22]

kvalit povrchu. Dále bylo pozorováno, že při vyšších rychlostech skenování je obvykle dosaženo lepších výsledků. Vliv velikosti hatch distance nebyl zdaleka tak významný jako předchozí dva parametry. Hustota vyrobených vzorků se pohybovala v rozmezí 87 - 97,2%. [22]

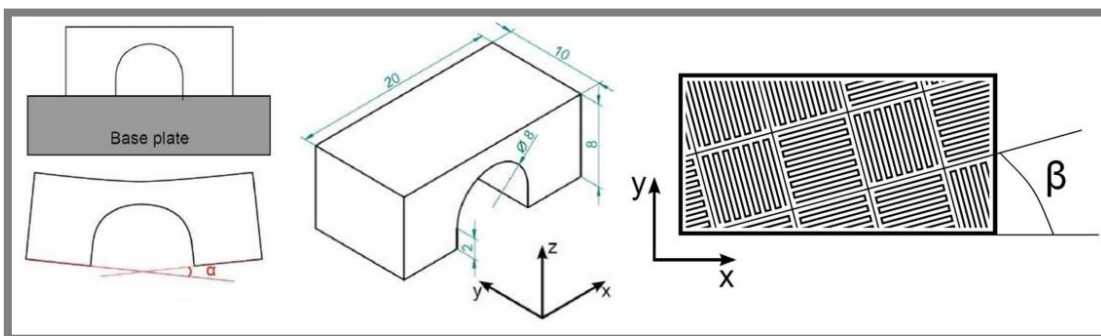
Cheng a kol. [23] vytvořili termomechanický 3D model metodou konečných prvků, pomocí kterého porovnávali různé způsoby skenování a jejich vliv na výslednou deformaci a množství zbytkového napětí. Jejich model se skládal ze vzorku



Obr. 2-16 Různé strategie skenování [23]

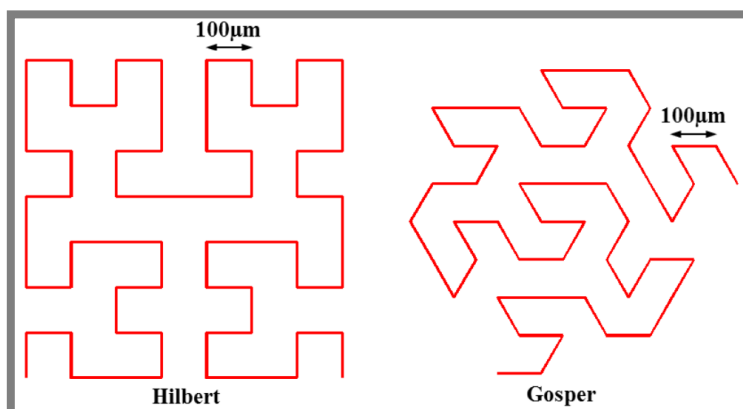
čtvercového půdorysu se třemi vrstvami skenování a porovnával osm různých strategií (obr. 2-16). Z výsledků vyplývá, že nejlépe z porovnávaných způsobů vychází skenování pod úhlem 45° (obr. 2-16c), při kterém je nejnižší zbytkové napětí i deformace. Naopak nejhorších výsledků dosáhl způsob, při kterém laser skenuje z vnějšku materiálu směrem dovnitř (obr. 2-16h).[23]

Kruth a kol. [24] ve své další práci zkoumají vliv různých způsobů skenování pro snížení vnitřního pnutí. Testovací vzorek představuje můstek, který se po odebrání ze základní desky prohne vlivem vnitřního pnutí, které se nachází zejména ve vrchní části součásti. Kritériem pro porovnání je úhel natočení mezi spodními plochami součásti (úhel α , obr. 2-17). Z výsledků vyplývá, že nejefektivnější je tzv. šachovnicové (ostrůvkové) skenování, přičemž délka jednotlivých polí nehraje významnou roli, avšak nejnižší deformace bylo dosaženo při natočení ostrůvků vůči ose x o úhel $\beta=45^\circ$. [24]



Obr. 2-17 Vliv strategie skenování na deformaci [24]

Catchpole-Smith a kol. [25] ve své práci testují chování netypických strategií skenování (obr. 2-18). Hlavní myšlenkou je použití velmi krátkých skenovacích vektorů (délka maximálně $300\ \mu\text{m}$), které nepřetržitě jedním tahem vyplní celý požadovaný prostor (obr. 2-18). Tímto způsobem je dosaženo jednotnějšího rozložení tepla v součásti oproti ostatním způsobům. Vyrobené vzorky byly porovnány s obvyklejším šachovnicovým způsobem. Bylo pozorováno, že v případě krátkých vektorů, se výrazně snížila délka mikrotrhlin, a zároveň vzrostla hustota součástí přibližně o dvě procenta oproti běžnému způsobu skenování.[25]

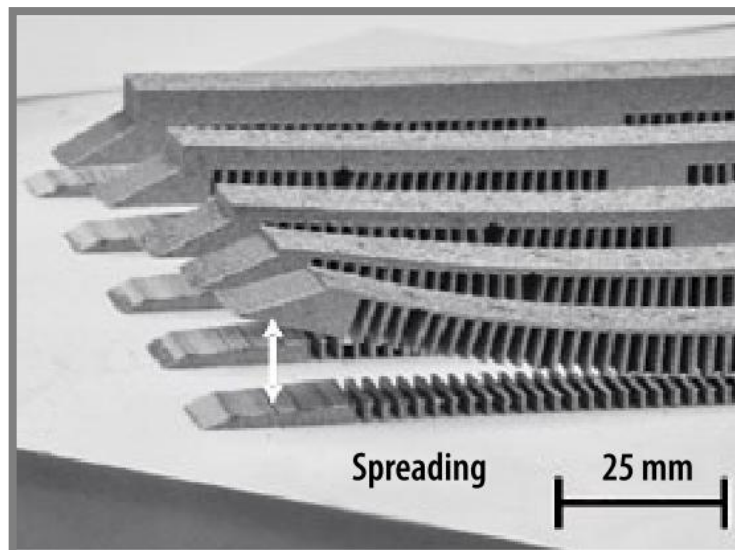


Obr. 2-18 Fraktální způsoby skenování [25]

2.4.4 Vliv předehřevu

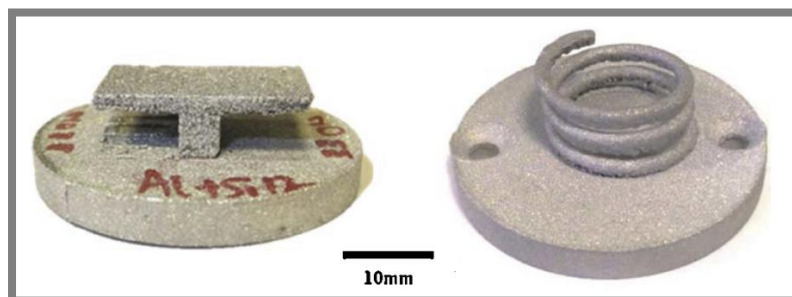
Značným problémem při výrobě technologií SLM jsou rychlé změny teplot - prudký ohřev a následné rychlé ochlazení. Zvýšení celkové teploty ve stavěcí komoře napomáhá tyto prudké změny zmírňovat.

Bremen a kol. [4] zkoumají vliv předehřevu na zbytkové napětí v součásti. Navržený vzorek má tvar T a jeho převislé části jsou podepřeny podpurnými strukturami. Po zhotovení vzorku se podpurné struktury odříznou a napětí v součásti způsobí, že se součást vlivem zbytkového napětí zdeformuje. Pro hliníkovou slitinu byla pozorována velmi výrazná deformace při výrobě za pokojové teploty, avšak při teplotě předehřevu 200°C byla patrná pouze minimální deformace a při teplotě 250°C nebyla detekována žádná deformace nezávisle na tloušťce převislé části vzorku. Teplota předehřevu tedy výrazně ovlivňuje napětí v součásti a může ovlivnit výslednou rozměrovou přesnost. Také může sloužit jako prostředek pro snížení množství podpurných struktur a tím zefektivnit celý proces.[4]



Obr. 2-19 Vychýlení součásti vlivem vnitřního napětí [4]

Vora a kol. [26] se ve své práci snaží dosáhnout co největšího vodorovného převisu. Porovnávají prášek eutektické slitiny AlSi12 a prášek tvořený těmito prvky jednotlivě, u kterého dojde k vytvoření slitiny přímo při SLM procesu (in-situ alloying). Jednotlivé prvky mají totiž vyšší teplotu tání než hotová slitina, a tudíž je možné předehřát prášek na vyšší teplotu. Pomalejší chladnutí nataveného kovu



Obr. 2-20 Převislé části bez podpurných struktur [26]

způsobí, že vnitřní napětí nedosáhne takových hodnot, jako při prudkém ochlazení. Autorům se podařilo vytvořit horizontální převis dlouhý 10 mm s odchylkou pouze 1 mm od požadovaného tvaru (při teplotě předehřevu 380°C). Při pokusu s hotovou slitinou nemohl být použit tak vysoký předehřev, protože docházelo ke spojování (aglomeraci) prášku.[26]

2.4.5 Re-melting

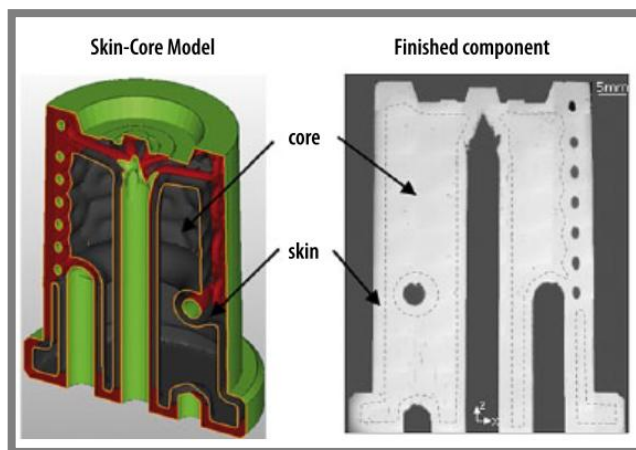
Re-melting označuje proces, při kterém po naskenování dané vrstvy laser znovu naskenuje stejnou vrstvu nebo její část bez nanášení dalšího prášku. Dochází ke znovu roztavení již ztuhnutého plného materiálu. Může tak být učiněno pro celou součást, což ovšem prodlužuje výrobní čas, nebo na poslední vrstvu součásti s cílem zlepšit kvalitu povrchu. Pomocí této metody lze snížit porozitu materiálu a dosáhnout vyšší hustoty materiálu, čímž selepší pevnostní charakteristiky vyrobené součásti. Re-melting také způsobí zjemnění zrn mikrostruktury.[27]

2.4.5

2.4.6 Princip skin-core

Tato metoda spočívá v rozdělení součásti na vnější obal (skin) a vnitřní část (core) viz obr. 2-21. Jednotlivým částem mohou být přiřazeny různé výrobní parametry. Vnitřní část tedy může být stavěna za pomoci vyšší vstupní energie pro dosažení lepších pevnostních vlastností součásti, naopak pro vnější část lze použít jemnější nastavení parametrů s cílem zlepšit kvalitu povrchu a rozměrovou přesnost vyráběné součásti.[4]

2.4.6



Obr. 2-21 Princip metody skin&core [4]

2.4.7 Post-processing

K výrazné eliminaci nežádoucích jevů jako je deformace součásti a zhoršená kvalita povrchu může přispět další zpracování vyrobené součásti. Tepelným zpracováním, např. žíháním, lze odstranit zbytkové napětí v součásti. Pokud se provede před odstraněním výrobků ze stavěcí desky, nehrozí po odřezání deformace tvaru vlivem vnitřního pnutí. Zlepšení kvality povrchu lze do určité míry dosáhnout pomocí pískování nebo kuličkování, případně strojním obráběním (broušením, soustružením, frézováním atd.).

2.4.7

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Selective laser melting je relativně mladá a rychle se rozvíjející technologie. Rychlý vývoj ukazuje potenciál a širokou škálu možného využití.

V současné době je jednou z hlavních komplikací stavba převislých částí bez podpůrných struktur. Takový případ nastává, pokud je nutné vyrobit součást komplexních tvarů s množstvím převislých částí, u kterých by nebylo možné po výrobě odstranit podpůrnou strukturu, a zároveň se nelze vyhnout stavbě těchto převisů změnou orientace při výrobě. Jedná se o součásti se složitými dutinami, chladicími kanálky nebo výrobky, jejichž část je tvořena zakřivenými trubkami. V takových případech je nutno nalézt tu nejvýhodnější kombinaci výrobních postupů k dosažení optimálního výsledku.

Autoři [15; 20; 22] uvádějí, že jedním z hlavních vlivů, který ovlivňuje výslednou přesnost a kvalitu, je množství vstupující energie do součásti. Nejjednodušeji lze definovat jako poměr výkonu laseru ku rychlosti skenování. Z jejich výsledků je zřejmé, že při nižších hodnotách vstupní energie lze vytvořit větší převislou oblast. Proti tomu ovšem jde výsledná hustota [15], jelikož v případě výrazného poklesu vstupní energie může docházet k nedostatečnému protavení materiálu a vzniku pórovitosti. Pro nerezové materiály (konkrétně 316L) udávají jako reálné hodnoty vstupní energie pro převislé části v rozmezí 0,1–0,25 J/mm.

Mezi další vlivy, které významně vstupují do SLM procesu patří především způsob skenování a teplota předehřevu.[4;23]

3.1 Cíle práce

Hlavním cílem je nalezení vhodné kombinace výrobních parametrů SLM procesu pro výrobu převislé geometrie za těchto podmínek: minimální deformace dílu, bez použití nebo s minimálním využitím podpůrných struktur, zejména pro díly typu trubka.

Díličí cíle bakalářské práce jsou:

- identifikovat vhodné kombinace parametrů dle současné literatury,
- navrhnout experimentální tělesa, metody testování a vyhodnocení,
- navrhnout výrobní strategie a rozsahy ověřovaných parametrů,
- realizovat a vyhodnotit navržené experimenty.

4 MATERIÁL A METODY

4

4.1 Zařízení SLM

4.1

Pro stavbu všech vzorků bylo využito zařízení SLM 280^{HL}, které disponuje dvěma YLR lasery o výkonech 400 a 1000 W. Maximální rychlost skenování je 10 m/s. Rozměry stavební komory jsou 280x280x350 mm. Zařízení je schopno pracovat s materiály jako nerezová a nástrojová ocel, slitiny titanu, hliníku, niklu a dalšími. Stavba probíhá v inertní atmosféře argonu nebo dusíku pro zamezení oxidačních reakcí. Rychlost stavby je udávána 35 cm³/hod. Pro stavbu byl použit přehřev základní desky na 120°C a jako ochranná atmosféra dusík.

4.2 Použitý materiál

4.2

Jako základní materiál pro výrobu vzorků byla zvolena nerezová ocel 316L (1.4404). Velikost zrn prášku se pohybuje v rozmezí 10–45 μm. V tabulce 1 je uvedeno procentuální složení daného materiálu.[6]

Tab. 1 Chemické složení materiálu 316L [6]

hodnoty v %

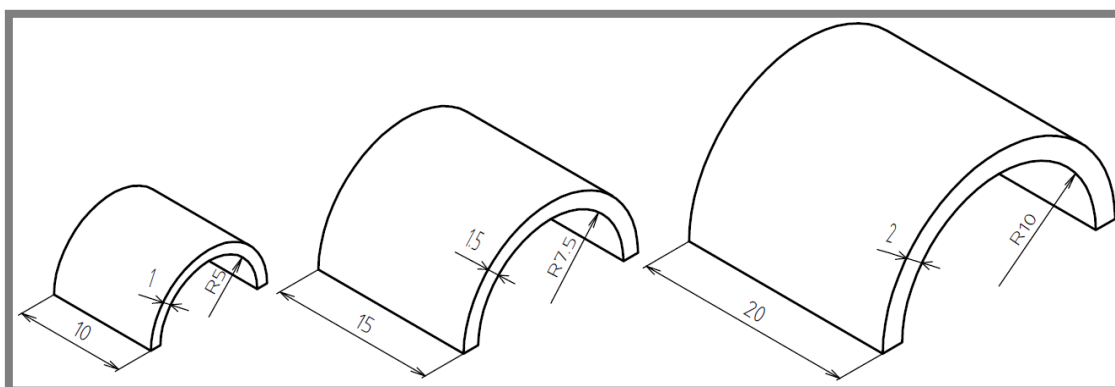
Materiál	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	C	N	P	S	O
316L	Doplňěk	16–18	10-14	2–3	1	2	0,03	0,1	0,045	0,03	0,1

4.3 Návrh vzorků

4.3

Na základě rešeršní studie bylo zjištěno, že velmi záleží na velikosti převislé struktury, od které se odvíjí její vyrobená kvalita. Převisy malých rozměrů (např. chladicí kanálky v nástrojích) lze vyrobít poměrně kvalitně a bez významných deformací. U větších součástí dochází vlivem akumulovaného napětí k postupné deformaci, která negativně ovlivní výsledný tvar.[11]

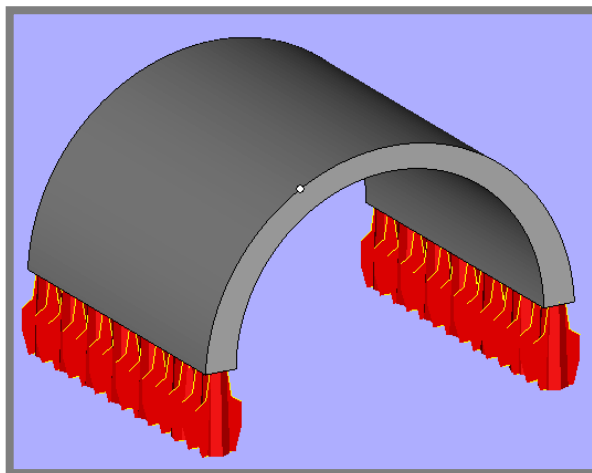
Z těchto důvodů byly navrženy tři velikosti vzorků s vnitřními průměry: 10, 15 a 20 mm. Rozměry jednotlivých vzorků jsou na obr. 4-1. Délky oblouků jsou stejné jako průměry a tloušťka stěny je jedna desetina průměru. Tak bude možné vzájemně porovnat vliv velikosti



Obr. 4-1 Rozměry testovaných vzorků

Vzorky se skládají z půloblouku z důvodu snížení nákladů na kovový prášek a výrobní čas stavby. Bude také možné lépe analyzovat spodní stranu vzorku.

Vzorky byly vymodelovány v programu Inventor. Po exportu do formátu STL bylo provedeno přidání podpůrných struktur (obr. 4-2) v programu Magics. Podpůrné struktury byly přidány pro ukotvení součásti k základní desce a pro odvod tepla ze součásti. K automaticky vygenerovaným podporám byly přidány ještě tzv. piny,



Obr. 4-2 Vzorek s podporami

masivnější kuželové podpory, které zabezpečují dostatečný odvod tepla. Dále byly jednotlivé vzorky naskládány na virtuální stavěcí platformu.

4.4 Návrh výrobních strategií

Dle současné literatury [20;22] má na kvalitu vyrobené součásti největší vliv množství vstupní energie. Za účelem nalezení optimálních parametrů pro výrobu převislých ploch, jako je např. trubka, byly pro první sérii vzorků zvoleny parametry zobrazené v tab. 2.

Tab. 2 Výrobní parametry

Výkon laseru P [W]	Rychlost skenování v [mm/s]	Vstupní energie Φ [J/mm]
400	1 000	0,4
	2 000	0,2
	3 000	0,13

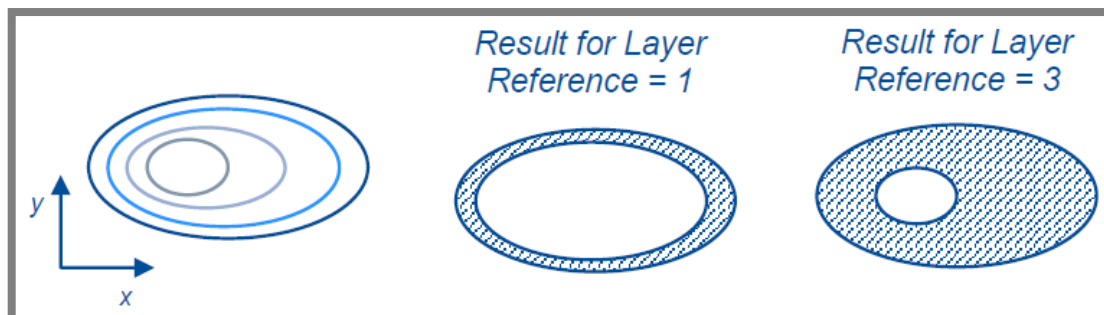
Ostatní parametry budou po celou dobu konstantní. Jejich přehled je v tab. 3.

Tab. 3 Ostatní parametry stavby

Tloušťka vrstvy	50 μm
Hatch distance	80 μm
Průměr paprsku	80 μm

4.4.1 Funkce Down Skin

Výrobní systém firmy SLM Solutions umožňuje nastavit rozdílné parametry výroby v místech, která jsou definována jako tzv. down skin surface. Taková místa jsou podepírána pouze kovovým práškem. Ke změně parametrů dojde, pokud úhel převisu překročí nastavenou hodnotu sklonu. Poté je dle nastaveného počtu předchozích vrstev vypočítána oblast, pro kterou bude tato funkce použita (viz obr. 4-3). [28]



Obr. 4-3 Oblast použití funkce Down skin dle počtu vrstev [28]

V této práci budou porovnány dosažené výsledky s využitím této funkce a bez jejího využití. Pro funkci down skin byl nastaven kritický úhel 40° . Pokud sklon vyráběné stěny klesne pod tuto úroveň, dojde ke snížení výkonu laseru o polovinu na 200 W. Počet předchozích vrstev použitých pro kalkulaci oblasti byl nastaven na 3 vrstvy. Velikost překrytí mezi oblastmi s různými parametry (tzv. overlap) je 0,08 mm.

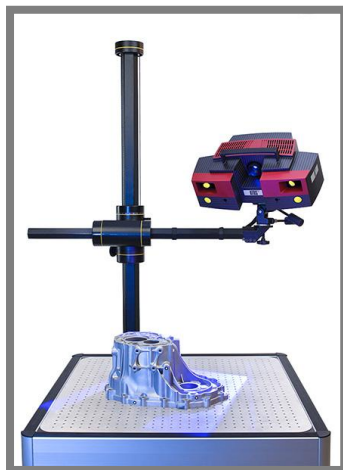
V tabulce 4 jsou shrnuty výrobní parametry a jednotlivé kombinace parametrů jsou označeny čísly pro snazší orientaci ve výsledcích.

Tab. 4 Číselné označení vzorků 1–18

Průměr vzorku d [mm]						
Rychlost skenování v [mm/s]	10	15	20	10	15	20
1000	1	4	7	10	13	16
2000	2	5	8	11	14	17
3000	3	6	9	12	15	18
DOWN SKIN						

4.5 Způsob vyhodnocení

Vyhodnocení vzorků bude probíhat pomocí 3D optického skeneru Atos Triple Scan (obr. 4-4) od společnosti GOM GmbH. Ten je schopen zachytit celkový tvar včetně jemných detailů [29]. Při použití je nevhodné skenovat lesklé povrchy, jelikož dochází k odrazům světla a tím ke snížení množství naskenovaných dat. Proto byl



Obr. 4-4 ATOS Triple Scan [29]

použit nástřik titanovým roztokem, který zmatní skenovanou součást, a tím umožní získání většího množství dat pro následné vyhodnocení. Samotné vyhodnocení probíhá v softwaru GOM Inspect. Tam je porovnán vyrobený tvar s původními CAD daty a jsou vyhodnoceny rozdíly mezi vyrobeným a požadovaným tvarem.

4.6 Pracovní postup

Po vytvoření modelu v programu Inventor byly soubory ve formátu STL převedeny do programu Magics, kde byly přidány podpurné struktury a byly umístěny jednotlivé vzorky na stavební platformu. V softwaru firmy SLM Solutions byly nadefinovány jednotlivé parametry a vytvořeny dané výrobní strategie. Ty pak byly přiřazeny ke konkrétním vzorkům. Po vytištění a odstranění přebytečného prášku byl proveden nástřik titanovým roztokem pro zmatnění povrch. Dále byly vzorky naskenovány na stavěcí platformě. Pomocí gravírovacího nástroje zn. Dremel byly označeny vzorky svým číslem. Poté došlo k odřezání vzorků ze základny pomocí ruční přímé brusky. Plochy po odříznutí museli být zarovnané zbrúšením. Dále proběhlo opětovné naskenování vzorků, tentokrát i z vnitřní strany. Naskenované vzorky byly porovnány v programu GOM Inspect s původními navrženými součástmi a vyhodnocená data dále zpracována v programu Excel. Bohužel nebylo možné provést tisk další série vzorků z důvodu poruchy SLM zařízení.



Obr. 4-5 Vyrobené vzorky na základní desce

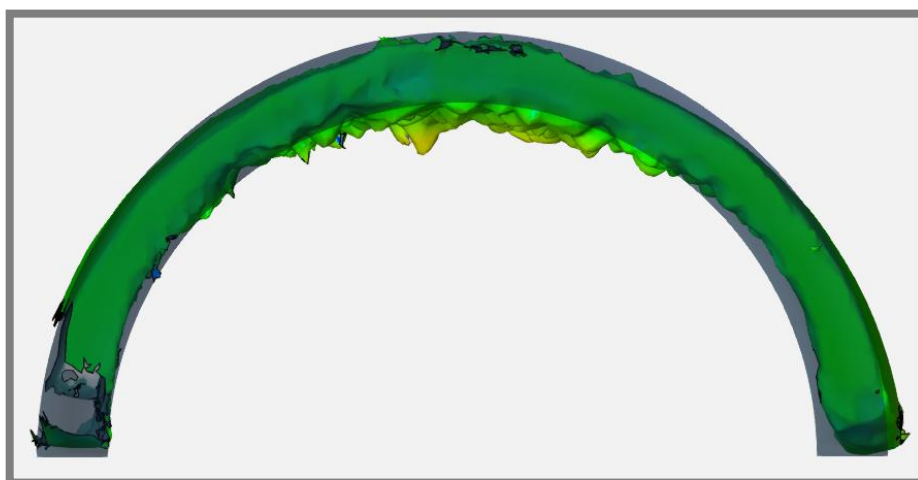
5 VÝSLEDKY

Všechny vzorky se podařilo vytisknout. Je však na první pohled zřejmé, že výsledná kvalita vzorků není optimální. I přesto bylo provedeno vyhodnocení s cílem zanalyzovat, jaké parametry nejvíce ovlivňují výslednou kvalitu. Tím bude možné určit směr, kterým lze postupovat pro dosažení lepších výsledků.



Obr. 5-1 Ukázka vzorků

V programu GOM Inspect byly po zarovnání s CAD modelem vytvořeny tzv. srovnávací plochy, které mají přiřazenou velikost odchylky od požadovaného tvaru v každém svém bodě (viz obr. 5-2). Pro zjištění kvantitativních hodnot bylo použito funkce pro zjištění střední hodnoty celého povrchu vůči CAD datům. Tabulka 5 shrnuje zjištěné hodnoty a použité parametry.



Obr. 5-2 Vzorek 5 zarovnaný k danému CAD modelu

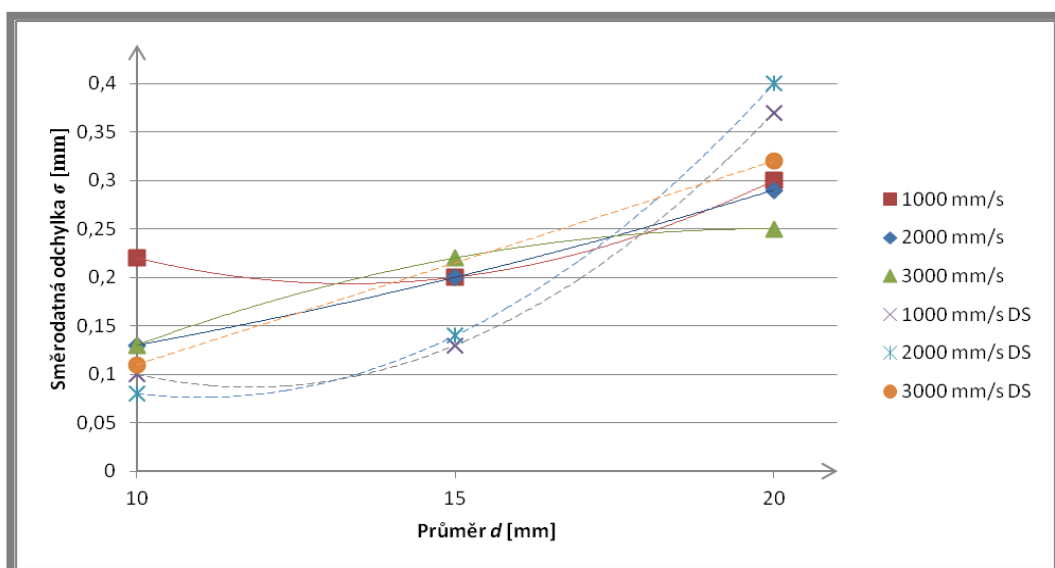
U vzorku číslo 15 došlo k poměrně výrazné deformaci (k rozevření) pravděpodobně při odstraňování ze základní desky nebo při následné manipulaci. Z toho důvodu byl z dalších analýz vyloučen. Jelikož u ostatních vzorků toto nebylo pozorováno, nejednalo se zřejmě o deformaci vlivem vnitřního pnutí.

Tab. 5 Seznam vzorků s parametry

Číslo vzorku	Směrodatná odchylna σ [mm]	Průměr vzorku d [mm]	Rychlost skenování v [mm/s]	Výkon P [W]	Vstupní energie Φ [J/mm]
1	0,22	10	1000	400	0,4
2	0,13	10	2000	400	0,2
3	0,13	10	3000	400	0,13
4	0,2	15	1000	400	0,4
5	0,2	15	2000	400	0,2
6	0,22	15	3000	400	0,13
7	0,3	20	1000	400	0,4
8	0,29	20	2000	400	0,2
9	0,25	20	3000	400	0,13
10	0,1	10	1000	200	0,2
11	0,08	10	2000	200	0,1
12	0,11	10	3000	200	0,067
13	0,13	15	1000	200	0,2
14	0,14	15	2000	200	0,1
15	0,34	15	3000	200	0,067
16	0,37	20	1000	200	0,2
17	0,4	20	2000	200	0,1
18	0,32	20	3000	200	0,067

5.1 Vliv velikosti součásti

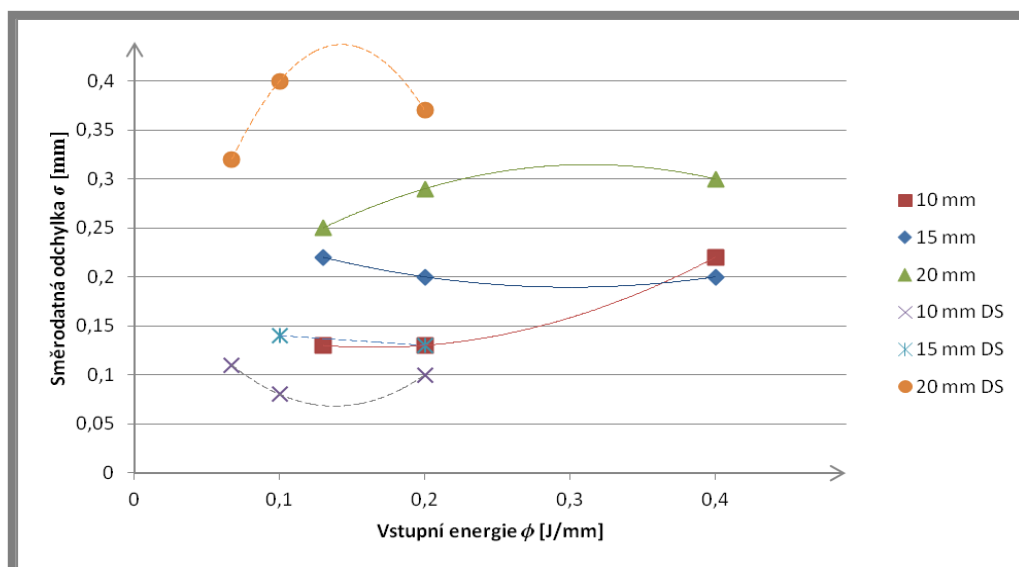
Graf 5-3 ukazuje závislost směrodatné odchylny na průměru vzorku. Jednotlivé vzorky označené stejnou barvou mají stejné procesní parametry vypsané v legendě. Z grafu je patrné, že ve většině případů s nárůstem průměru vzorku stoupá i množství výrobních nepřesností. To potvrzuje předpokládaný vývoj.



Obr. 5-3 Graf závislosti odchylny na průměru

5.2 Vliv množství vstupní energie

Další část vyhodnocení je z hlediska množství vstupní energie vstupující do materiálu. V grafu 5-4 lze pozorovat, že zde není patrná naprosto jednoznačná závislost. Jednotlivé vzorky jsou barevně spojeny podle stejného průměru. U dvou ze tří velikostí vzorků bez použití funkce down skin lze pozorovat mírný nárůst odchylky se vzrůstajícím množstvím pohlcené energie. Třetí z nich (průměr 15 mm) je téměř konstantní s mírným nárůstem odchylky při nižší vstupní energii. U vzorků s použitím funkce down skin není patrná jasná souvislost mezi pozorovanými vlivy. Je však nutno podotknout, že vzorky s průměrem 20 mm, jsou při použití funkce down skin o poznání horší než vzorky bez použití této funkce.



Obr. 5-4 Graf závislosti odchylky na vstupní energii

5.3 Vliv funkce Down Skin

Z předchozích grafů (obr. 5-3 a 5-4) můžeme porovnat kvalitu vyrobených součástí s použitím úpravy parametrů v oblastech podepíraných kovovým práškem a součástí vyrobených s konstantními parametry. Lze pozorovat, že při menších průměrech vzorků je dosaženo mírně lepších výsledků. Naopak u průměru 20 mm je zřejmé, že výsledky s použitím down skin dosahují horších kvalit, než vzorky s konstantními parametry.

6 DISKUZE

Navržené parametry nejsou zcela optimální. U součástí stavěných za použití vyšší vstupní energie je patrný značný defekt na horní straně vzorku. Dochází k ostrému skoku směrem nahoru, což vytváří na celém vršku součásti značný výstupek. To může být způsobeno tím, že v průběhu stavby dochází k deformaci obou stavěných částí směrem dovnitř. Když v určitém místě dojde ke spojení obou částí, dojde i k zastavení deformace. Vrchní výstupek by tedy měl být vytvořen správně, přičemž k vychýlení dojde při stavbě součásti v místech od podpůrných struktur po spojení obou stavěných částí.

Spodní strany všech vzorků jsou silně ovlivněny tzv. drossem. To indikuje nedostatečný odvod tepla ze součásti. U vzorků s nižší hodnotou vstupní energie, zvláště pak u vzorků s nekonstantními parametry, lze pozorovat nedostatek materiálu ve vrchní části vzorku na spodní straně. V těchto místech dochází ke značnému ztenčení šířky stěny.

Analýzou vzorků pomocí optického 3D skeneru byla změřena směrodatná odchylka celkového souboru naskenovaných dat vůči původním datům CAD modelu. Ta byla použita pro další vyhodnocení.

Ze získaných dat je možné pozorovat, jak významný je vliv velikosti součásti. U rozměrnějších součástí dochází ke větším odchylkám, vlivem delšího časového úseku, během kterého dochází k uvolňování vnitřního napětí prostřednictvím deformace součásti.

Druhým sledovaným faktorem byl vliv velikosti energie vstupující do procesu tavení. Výsledky ukazují mírné zhoršení při zvýšení vstupní energie u součástí vyráběných konstantními parametry. Při použití strategií s nekonstantními parametry, u kterých dojde ke snížení výkonu laseru při tvorbě součásti na kovovém prášku, lze pozorovat mírně lepší výsledky u vzorků s průměrem 10 a 15 mm, naopak u největšího průměru 20 mm jsou pozorovány výrazně horší výsledky ve srovnání se stavbou s konstantními parametry.

Určité nepřesnosti mohli vzniknout při odstraňování vzorků ze stavěcí platformy, jelikož nebylo možné použít přesné strojní oddělení materiálu, ale byla použita ruční bruska. Další nepřesnosti mohou být např. neúplně naskenované tělesa nebo nepřesné zarovnání součásti a modelu při vyhodnocování.

7 ZÁVĚR

Tato práce se zabývala vlivem výrobních parametrů na stavbu převislých částí kruhového tvaru bez použití podpůrných struktur. Oblast převislých geometrií, u kterých nelze využít podpůrných struktur z důvodu nemožnosti jejich odstranění, je jedním z klíčových aspektů pro další rozvoj technologie SLM.

V této práci byly navrženy testovací vzorky v půlkruhovém tvaru stavěné naležato, což simulovalo stavbu komplexní součásti se zakřivenými kruhovými profily, u které nelze docílit zlepšení žádnou další změnou orientace dílu. Dále byly navrženy testovací parametry pro tři velikosti vzorků a použitý materiál 316L. Sledovanými parametry byl poměr výkonu a rychlosti skenování, označen jako množství vstupní energie. Testován byl také způsob skenování nekonstantními parametry, při němž docházelo ke snížení výkonu laseru v oblastech podepíraných pouze kovovým práškem.

Vyhodnocení bylo provedeno s využitím optického skeneru. Byla zjišťována odchylka od požadovaného tvaru pomocí specializovaného softwaru. Jeden vzorek musel být z vyhodnocování vyřazen z důvodu velkých rozměrových nepřesností způsobených mimo výrobní stroj.

Výsledky testů ukazují, že při použití nekonstantních parametrů došlo ke zlepšení výsledků u menších velikostí vzorků, kdežto u největší velikosti došlo k výraznému poklesu kvality i oproti vzorkům s konstantním nastavením parametrů. Vliv vstupní energie ukazuje spíše menší význam. Mírně převládá trend zhoršení výrobní kvality při zvýšení množství vstupní energie. Vliv velikosti součásti prokázal významnou spojitost mezi deformací a velikostí převislé části.

Kvůli nedostatečné kvalitě vzorků by bylo vhodné prohloubit experiment a provést důkladnější testování většího množství vzorků. Vhodným směrem by mohlo být snížení výkonu laseru a zároveň snížení rychlosti skenování pro omezení dynamických jevů, a tím možné zvýšení kvality výroby.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HUANG, Yong, Ming C. LEU, Jyoti MAZUMDER a Alkan DONMEZ. Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. 2015, 137(1), 014001- [cit. 2017-03-05]. DOI: 10.1115/1.4028725. ISSN 10871357. Dostupné z: <http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?doi=10.1115/1.4028725>
- [2] FOX, Jason C., Shawn P. MOYLAN a Brandon M. LANE. Effect of Process Parameters on the Surface Roughness of Overhanging Structures in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* [online]. 2016, 45, 131-134 [cit. 2017-02-28]. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.347. ISSN 22128271. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827116006429>
- [3] CALIGNANO, F. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. *Materials & Design* [online]. 2014, 64, 203-213 [cit. 2017-02-19]. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.07.043. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306914005755>
- [4] BREMEN, Sebastian, Wilhelm MEINERS a Andrei DIATLOV. Selective Laser Melting. *Laser Technik Journal* [online]. 2012, 9(2), 33-38 [cit. 2017-03-05]. DOI: 10.1002/latj.201290018. ISSN 16137728. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/latj.201290018>
- [5] GAN, M.X. a C.H. WONG. Practical support structures for selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2016, 238, 474-484 [cit. 2017-03-08]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.006. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013616302758>
- [6] SLM Metal Powder. *SLM Solutions* [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <https://slm-solutions.com/products/accessories-and-consumables/slm-metal-powder>
- [7] GU, D D, W MEINERS, K WISSENBACH a R POPRAWA. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews* [online]. 2013, 57(3), 133-164 [cit. 2017-03-12]. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014. ISSN 09506608. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743280411Y.0000000014>
- [8] WANG, Di, Shibiao WU, Fan FU, Shuzhen MAI, Yongqiang YANG, Yang LIU a Changhui SONG. Mechanisms and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties. *Materials & Design* [online]. 2017, 117, 121-130 [cit. 2017-03-24]. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.12.060. ISSN 02641275. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127516315866>

- [9] THOMPSON, Mary Kathryn, Giovanni MORONI, Tom VANEKER, et al. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2016, 65(2), 737-760 [cit. 2017-04-13]. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.05.004. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850616301913>
- [10] VRANCKEN, Bey, Victoria CAIN, Rob KNUTSEN a Jan VAN HUMBEECK. Residual stress via the contour method in compact tension specimens produced via selective laser melting. *Scripta Materialia* [online]. 2014, 87, 29-32 [cit. 2017-04-14]. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2014.05.016. ISSN 13596462. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359646214002164>
- [11] LU, Yanjin, Songquan WU, Yiliang GAN, Tingting HUANG, Chuanguang YANG, Lin JUNJIE a Jinxin LIN. Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy. *Optics & Laser Technology* [online]. 2015, 75, 197-206 [cit. 2017-04-14]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.07.009. ISSN 00303992. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030399215002108>
- [12] PARRY, L., I.A. ASHCROFT a R.D. WILDMAN. Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation. *Additive Manufacturing* [online]. 2016, 12, 1-15 [cit. 2017-04-15]. DOI: 10.1016/j.addma.2016.05.014. ISSN 22148604. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860416300987>
- [13] WANG, Di, Yongqiang YANG, Ziheng YI a Xubin SU. Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2013, 65(9-12), 1471-1484 [cit. 2017-04-15]. DOI: 10.1007/s00170-012-4271-4. ISSN 02683768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-012-4271-4>
- [14] STRANO, Giovanni, Liang HAO, Richard M. EVERSON a Kenneth E. EVANS. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2013, 213(4), 589-597 [cit. 2017-04-15]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.11.011. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013612003366>
- [15] KAMATH, Chandrika, Bassem EL-DASHER, Gilbert F. GALLEGOS, Wayne E. KING a Aaron SISTO. Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2014, 74(1-4), 65-78 [cit. 2017-04-17]. DOI: 10.1007/s00170-014-5954-9. ISSN 02683768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-014-5954-9>

- [16] DAS, Paramita, Ramya CHANDRAN, Rutuja SAMANT a Sam ANAND. Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures. *Procedia Manufacturing* [online]. 2015, **1**, 343-354 [cit. 2017-04-21]. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.09.041. ISSN 23519789. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978915010410>
- [17] STRANO, G., L. HAO, R. M. EVERSON a K. E. EVANS. A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2013, **66**(9-12), 1247-1254 [cit. 2017-04-21]. DOI: 10.1007/s00170-012-4403-x. ISSN 02683768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-012-4403-x>
- [18] YADROITSEV, Igor. Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Saarbrücken: LAP Lambert, c2009. ISBN 9783838317946.
- [19] ATZENI, Eleonora a Alessandro SALMI. Study on unsupported overhangs of AlSi10Mg parts processed by Direct Metal Laser Sintering (DMLS). *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2015, **20**, 500-506 [cit. 2017-04-20]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2015.04.004. ISSN 15266125. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612515000341>
- [20] WANG, Di, Shuzhen MAI, Dongming XIAO a Yongqiang YANG. Surface quality of the curved overhanging structure manufactured from 316-L stainless steel by SLM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, **86**(1-4), 781-792 [cit. 2017-04-16]. DOI: 10.1007/s00170-015-8216-6. ISSN 02683768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-015-8216-6>
- [21] KRUTH, Jean-Pierre, Peter MERCELIS, Jonas VAN VAERENBERGH a Tom CRAEGHS. Feedback control of selective laser melting. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*. 2007, s. 521-527. Dostupné také z: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/185342/1>
- [22] CLOOTS, M, AB SPIERINGS a K WEGENER. Assessing new support minimizing strategies for the additive manufacturing technology SLM. In: *24th International SFF Symposium-An Additive Manufacturing Conference, Austin, USA, University of Texas at Austin*. 2013, s. 631-643. Dostupné také z: https://www.icvr.ethz.ch/ConfiguratorJM/publications/Assessing__137896928667863/austin.pdf
- [23] CHENG, Bo, Subin SHRESTHA a Kevin CHOU. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2016, **12**, 240-251 [cit. 2017-04-17]. DOI: 10.1016/j.addma.2016.05.007. ISSN 22148604. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860416300914>

- [24] KRUTH, Jean-Pierre, Mohsen BADROSSAMAY, Evren YASA, Jan DECKERS, Lore THIJIS a Jan VAN HUMBEECK. Part and material properties in selective laser melting of metals. In: *Proceedings of the 16th international symposium on electromachining*. 2010. Dostupné také z: https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/265815/1/kruth_isem-xvi_keynote_paper.pdf
- [25] CATCHPOLE-SMITH, S., N. ABOULKHAIR, L. PARRY, C. TUCK, I.A. ASHCROFT a A. CLARE. Fractal scan strategies for selective laser melting of ‘unweldable’ nickel superalloys. *Additive Manufacturing* [online]. 2017, **15**, 113-122 [cit. 2017-04-27]. DOI: 10.1016/j.addma.2017.02.002. ISSN 22148604. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221486041630358X>
- [26] VORA, Pratik, Kamran MUMTAZ, Iain TODD a Neil HOPKINSON. AlSi12 in-situ alloy formation and residual stress reduction using anchorless selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2015, **7**, 12-19 [cit. 2017-02-28]. DOI: 10.1016/j.addma.2015.06.003. ISSN 22148604. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860415000305>
- [27] YASA, E. a J-P. KRUTH. Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting. *Procedia Engineering* [online]. 2011, **19**, 389-395 [cit. 2017-05-01]. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.130. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705811029390>
- [28] SLM SOLUTIONS GROUP AG. Introductory Training: Transition from AutoFabto SLM Build Processor. Lübeck, 2016.
- [29] ATOS Triple Scan. *GOM* [online]. Braunschweig: GOM, 2017 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.gom.com/metrology-systems/atos/atos-triple-scan.html>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

SLM	-Selective Laser Melting
d [mm]	- vnitřní průměr vzorku
P [W]	- výkon laseru
v [mm/s]	- rychlost skenování laseru
Φ [J/mm]	- množství vstupní energie
σ [mm]	- směrodatná odchylka

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Princip SLM [4]	13
Obr. 2-2 Schéma zařízení SLM [8]	14
Obr. 2-3 Příklady využití [4]	14
Obr. 2-4 Příklady odlehčení součásti (původní tvar vlevo) [9]	15
Obr. 2-5 Princip deformace [13]	15
Obr. 2-6 Důsledek extrémního vnitřního napětí [12]	16
Obr. 2-7 Schodovitý efekt [13]	16
Obr. 2-8 Zhoršení kvality povrchu u převislých ploch [3]	17
Obr. 2-9 Vznik rozstříku [8]	17
Obr. 2-10 Rozdílné orientace a množství podpůrných struktur [17]	19
Obr. 2-11 Vliv změny parametrů [13]	19
Obr. 2-12 Vliv zakřivení převislé části [19]	20
Obr. 2-13 Převislé struktury [20]	21
Obr. 2-14 Výroba bez úpravy parametrů (vlevo) a s úpravou (vpravo) [21]	21
Obr. 2-15 Tři způsoby skenování [22]	22
Obr. 2-16 Různé strategie skenování [23]	22
Obr. 2-17 Vliv strategie skenování na deformaci [24]	23
Obr. 2-18 Fraktální způsoby skenování [25]	23
Obr. 2-19 Vychýlení součásti vlivem vnitřního napětí [4]	24
Obr. 2-20 Převislé části bez podpůrných struktur [26]	24
Obr. 2-21 Princip metody skin&core [4]	25
Obr. 4-1 Rozměry testovaných vzorků	27
Obr. 4-2 Vzorek s podporami	28
Obr. 4-3 Oblast použití funkce Down skin dle počtu vrstev [28]	29
Obr. 4-4 ATOS Triple Scan [29]	30
Obr. 4-5 Vyrobené vzorky na základní desce	30
Obr. 5-1 Ukázka vzorků	31
Obr. 5-2 Vzorek 5 zarovnaný k danému CAD modelu	31
Obr. 5-3 Graf závislosti odchylky na průměru	32
Obr. 5-4 Graf závislosti odchylky na vstupní energii	33

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení materiálu 316L [6]	27
Tab. 2 Výrobní parametry	28
Tab. 3 Ostatní parametry stavby	28
Tab. 4 Číselné označení vzorků 1–18	29
Tab. 5 Seznam vzorků s parametry	32

Fotodokumentace

Vzorek 1



Vzorek 2



Vzorek 3



Vzorek 4



Vzorek 5



Vzorek 6



Vzorek 7



Vzorek 8



Vzorek 9



Vzorek 10



Vzorek 11



Vzorek 12



Vzorek 13



Vzorek 14



Vzorek 15



Vzorek 16



Vzorek 17



Vzorek 18

