
ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se zabývá kontrolou geometrické přesnosti dílů vyrobených aditivní technologií výroby selective laser melting. V práci jsou nejprve analyzovány práce jiných autorů zabývajících se touto problematikou. Na základech informací získaných z této analýzy byly následně vyvinuty srovnávací testovací díly pro kontrolu kvality výroby na komerčním stroji SLM 280 HL dodávaného společností SLM Solutions GmbH. V rámci práce bylo provedeno několik testů ke zjištění vhodných parametrů stavby dílů. Tyto testy jejich výsledky a závěry jsou v práci plně popsány.

KLÍČOVÁ SLOVA

SLM, Selective laser melting, Geometrická přesnost, Aditivní technologie výroby, ATOS III TripleScan

ABSTRACT

The presented diploma thesis deals with the control of the geometric accuracy of the parts produced by additive manufacturing technology selective laser melting. The paper first analyzed the work of the other authors dealing with this issue. Based on obtained informations from this analysis were developed benchmark test parts for quality control of production on a commercial machine SLM 280 HL supplied by SLM Solutions GmbH. The work was carried out several tests to determine the appropriate parameters of construction parts. These tests, their results and conclusions are fully described in this papper.

KEY WORDS

SLM, Selective laser melting, Geometrical accuracy, Additive manufacturing, ATOS III TripleScan

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ILČÍK, J. *Geometrická přesnost výroby kovových dílů aditivní technologií Selective Laser Melting*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, všechny zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu bibliografie.

.....
Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Danielu Koutnému, Ph.D. za poskytnuté rady a připomínky při zpracovávání práce. Dále bych chtěl poděkovat asistentovi z Ústavu konstruování Ing. Tomáši Kouteckému a pracovníku NeTME Bc. Ondřeji Koukalovi.

OBSAH

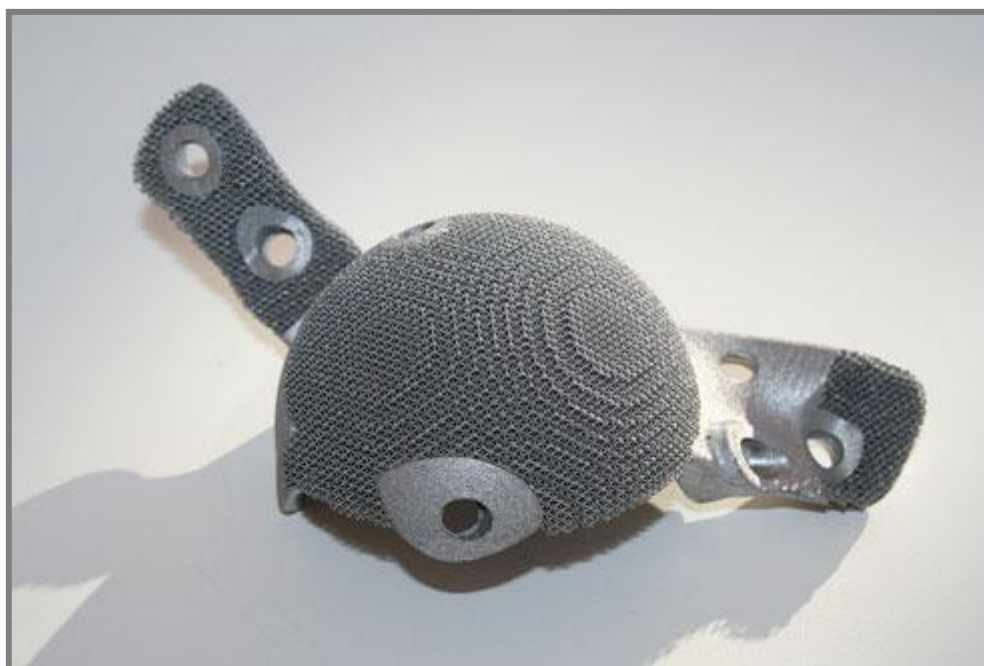
Obsah	13
Úvod	15
1 Přehled současného stavu poznání	16
1.1 Aditivní technologie výroby	16
1.2 Technologie SLM	17
1.3 Formát STL	17
1.4 Kontrola geometrické přesnosti pro medicínské aplikace	18
1.5 Srovnávací testy	26
2 Cíl práce, vědecká otázka a pracovní hypotéza	32
2.1 Cíl práce	32
2.2 Pracovní hypotéza	32
3 Materiály a metody	33
3.1 SLM 280HL	33
3.2 Testovací model	34
3.2.1 Testovací model pro zjištění geometrických rozměrů	34
3.2.2 Testovací model pro zjištění drsnosti ploch	34
3.2.3 Testovací model pro zjištění vlivu parametrů stavby	35
3.3 Příprava modelu k tisku a tisk	36
3.3.1 Příprava modelu na tisk	36
3.3.2 Příprava stroje na tisk	39
3.3.3 Vyjmutí dílu z komory stroje	40
3.4 Převod dílu na 3D data	40
3.4.1 Příprava dílu	40
3.4.2 Proces skenování	42
3.5 Vyhodnocení 3D dat	43
3.5.1 Rozměry	43
3.5.2 Měření drsnosti povrchu	44
4 Výsledky	47
4.1 Geometrie podpůrného materiálu	47
4.2 Drsnost povrchu	48
4.3 Geometrická přesnost výroby	51
4.3.1 Výchozí testovací série	51
4.3.2 Kontrolní série	54
4.3.3 Porovnání výchozí a kontrolní série	56
4.3.4 Vliv natočení vůči platformě na geometrickou přesnost	57
4.3.5 Vliv změny parametrů tisku na geometrickou přesnost	59
5 Diskuze	62
Závěr	63
Bibliografie	64
Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	66
Seznam obrázků a tabulek	67
Seznam obrázků	67
Seznam tabulek	68
Seznam příloh	69

ÚVOD

Aditivní technologie výroby součástí umožňují tvorbu složitých geometrií a dílů pro specifické aplikace. V současnosti je aditivní technologie výroby používána nejen pro stavbu prototypových dílů, ale i dílu určených ke konečnému užití velmi rozšířena. Jedná se o moderní metodu stavby součástí.

Celý proces stavby může být ovlivněn velkým množstvím faktorů. Některé z nich jsou ovlivnitelné obsluhou stroje. Jiné nepřesnosti jsou zakotveny přímo ve stroji nebo omezeních dané technologie. Nepřesnosti samotného stroje či technologie ovlivnit nelze. Proto je důležité vyvarovat se chyb, kterými může obsluha stroje ovlivnit kvalitu postaveného dílu. Optimalizace procesu stavby dílů je velmi důležitým faktorem k dosažení maximální přesnosti a využitelnosti těchto technologií. Jak víme z jiných technologií 3D tisku, přesnost, vlastnosti a celková kvalita dílu stavěných touto technologií se může v různých směrech stavby lišit. Přesnost deklarovaná výrobcí a dodavateli těchto technologií je jedna věc, ale skutečná přesnost stavby se může od udávaných hodnot lišit právě díky vlivům vnesených obsluhou stroje a kvalitou nastavení celého procesu.

Vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům nejen stroje, ale i materiálu pro stavbu dílů je nutné tuto technologii maximálně využít a dosáhnout co nejlepších parametrů stavby. To znamená dosažení maximální možné přesnosti při použití minimálního množství prášku a času, potřebného ke stavbě součástí.



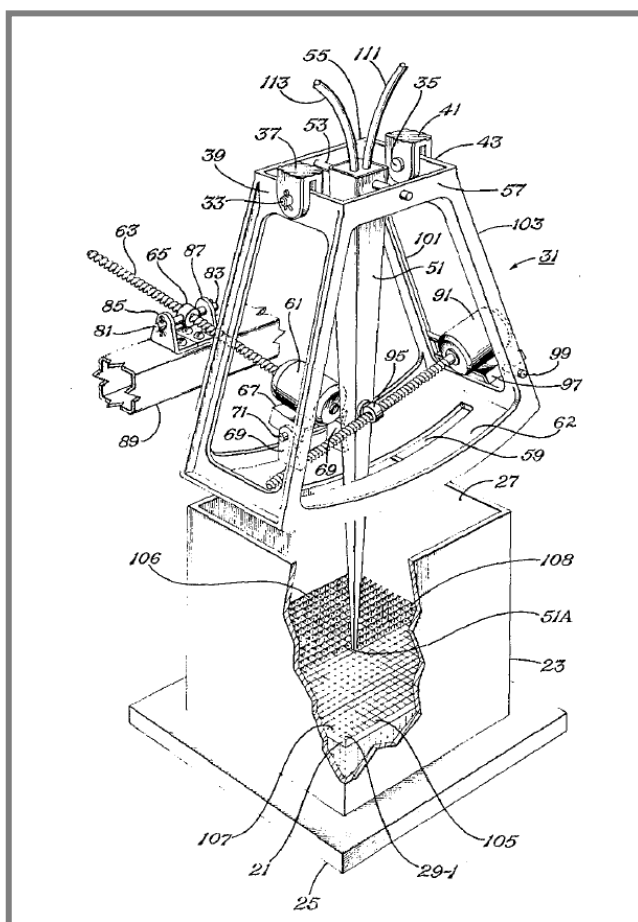
Obr. 0.1 Příklad využití technologie SLM

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1 Aditivní technologie výroby

Podle normy ASTM je aditivní výroba oficiálním standardním termínem a je definována jako proces spojování materiálu, obvykle vrstvu po vrstvě, vedoucí k výrobě objektu z 3D modelu. Jedná se o opak klasického obrábění, kdy je materiál odebrán a vzniká tak odpad. Prakticky jediným omezením při návrhu výsledného dílu jsou schopnosti projektanta. Aditivní technologie přináší svobodu designu, možnost volby ze širokého spektra materiálů, snižuje náklady na odpadní materiál a snižuje dodací lhůty. Vnitřní struktura a materiálové vlastnosti mají vliv na výsledné mechanické vlastnosti dílu, které takto lze přizpůsobovat výsledným požadavkům. Aditivní technologie výroby jsou nejčastěji využívány v oblasti biomedicíny, leteckém průmyslu a designu. [1] [2]

První myšlenky na stavbu dílů z kovu za pomoci aditivních technologií sahají do roku 1971 k patentu P. Cirauda, obr. 1.1, a do roku 1977 k patentu Rosse F. Housholdera, který popsal koncepci SLS a SLM systémů. Tyto myšlenky nebyly připraveny ke komerčnímu využití z důvodu nedostatku výkonných počítačů a vysoké ceně laserových systémů v dané době. Hlavní rozvoj aditivních technologií výroby nastává na přelomu 80. a 90. let 20. století. [3]



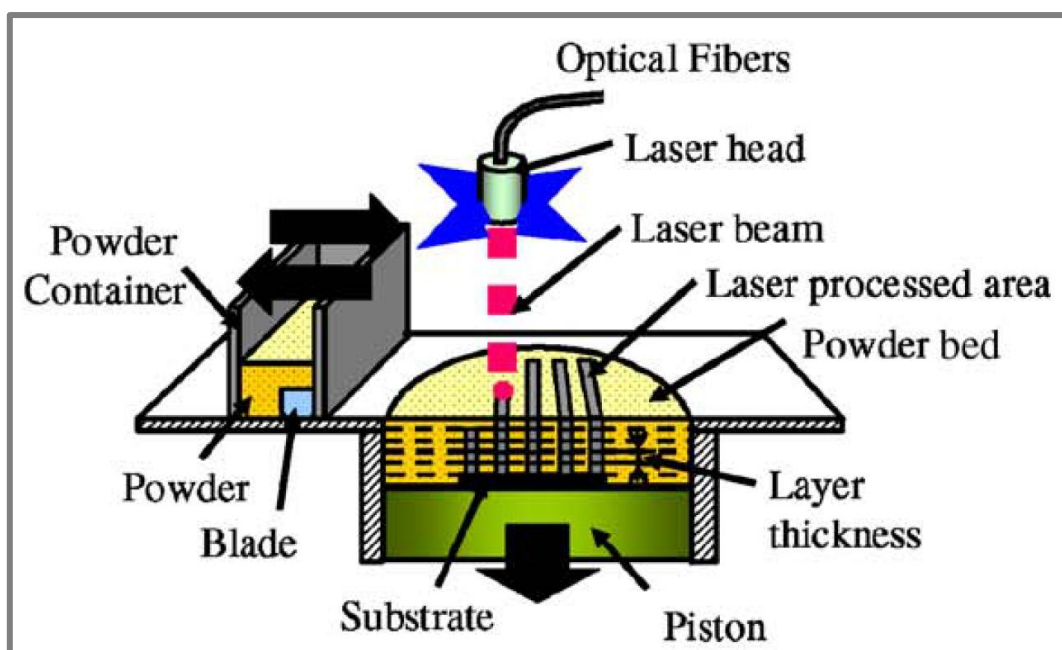
Obr. 1.1 Proces lití [4]

1.2 Technologie SLM

Jedná se o aditivní proces výroby, kdy za pomoci výkonného laseru (obvykle vláknového ytterbiového) dochází k tavení základního prášku a tím tvorbě trojrozměrného objektu. Tyto prášky nemusí být pouze na kovové bázi, ocelové, chromové, titanové nebo hliníkové, ale mohou být i na bázi křemíku. Zrnitost těchto prášků musí být na atomární bázi.

Jako zdrojová data se používají 3D CAD data. Standardně používaný datový formát je formát STL, který se používá ve většině technologiích 3D tisku. Tento soubor je následně nahrán do software, kde dojde k nastavení požadovaného materiálu, umístění podpor a umístění modelu v pracovním prostoru stroje. Data jsou rozdělena do jednotlivých vrstev o síle 20 až 100 mikrometrů. Každá vrstva tvoří 2D obraz daného objektu v dané výšce.

V pracovním prostoru stroje jsou následně nanášeny jednotlivé vrstvy prášku, podle předem zadané tloušťky, které jsou na základě 2D řezů taveny laserem, obr. 1.2. Vždy dojde nejprve k vytvoření okrajů, následně pak zbylého plného profilu materiálu. Energie laseru je do prášku převáděna optickým vláknem, které určuje průměr laserového paprsku, a za pomoci zrcadel, která jsou schopna vysokofrekvenčního pohybu v osách X a Y. Osa Z je svislou osou stroje a vždy po dokončení vrstvy se základní deska posune o tloušťku další vrstvy směrem dolů. [5] [6]

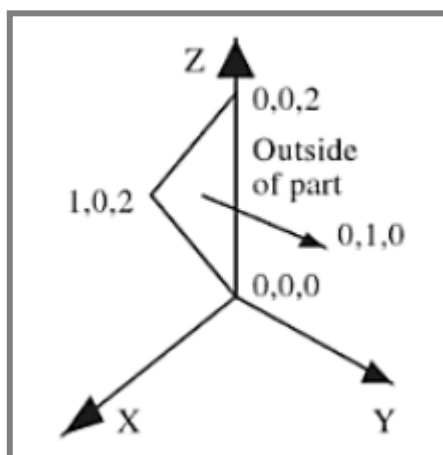


Obr. 1.2 Princip stavby dílů technologií SLM

1.3 Formát STL

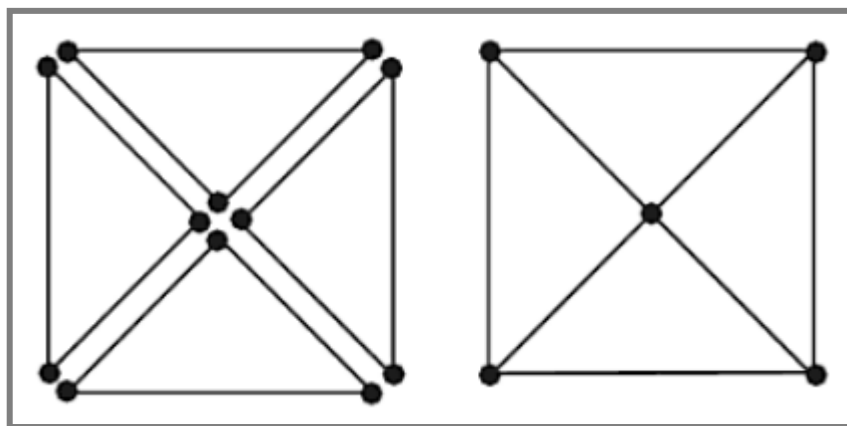
Tento formát nahrazuje povrchové plochy objemového CAD modelu trojúhelníkovou sítí. Trojúhelníky této sítě jsou přesně geometricky definovány. Množství trojúhelníků a hustota sítě je dána detaily daného modelu. Pozice trojúhelníků je popsána principy analytické geometrie. Vzhledem k tomu, že trojúhelník je jedním z nejjednodušších geometrických tvarů, je i jeho matematický popis velmi jednoduchý. K popisu se používají souřadnice vrcholových bodů

trojúhelníka a úhel normálového vektoru. Těmito informacemi je absolutně popsána pozice a natočení, vnitřní a vnější plocha, každého trojúhelníku, obr. 1.3.



Obr. 1.3 Popis trojúhelníku v STL

Velikost STL dat může při vysoké tvarové složitosti a vysokém stupni přesnosti převodu dat přesáhnout velikost původního CAD modelu. Toto je způsobeno tím, že při nahrazení povrchu trojúhelníkovou sítí dochází k duplikaci některých bodů. Tyto duplicitní body se nacházejí v místech styku vrcholů trojúhelníků. Pokud tedy bod leží na vrcholku čtyř trojúhelníků, jsou jeho souřadnice zaznamenány čtyřikrát, pro každý trojúhelník samostatně, obr. 1.4. [7]



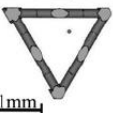
Obr. 1.4 Způsob duplikace bodů STL sítě

1.4 Kontrola geometrické přesnosti pro medicínské aplikace

VAN BAELE, S., Y.C. CHAI, S. TRUSCELLO, M. MOESEN, G. KERCKHOFS, H. VAN OOSTERWYCK, J.-P. KRUTH a J. SCHROOTEN. The effect of pore geometry on the in vitro biological behavior of human periosteum-derived cells seeded on selective laser-melted Ti6Al4V bone scaffolds. *Acta Biomaterialia*. 2012, vol. 8, issue 7, s. 2824-2834. DOI: 10.1016/j.actbio.2012.04.001.

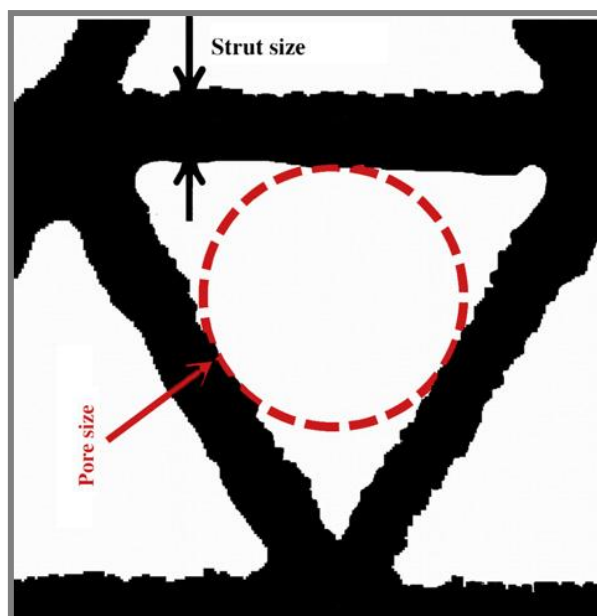
Technologie SLM je velmi často využívána v lékařství. Cílem studie bylo získat informace o vlivu velikosti a tvaru pórů a propustnosti příhradové konstrukce na okosticové buňky. Pro tyto testy byly navrženy testovací příhradové konstrukce

s póry přesně definovaných rozměrů ve 2-D rovině, obr. 1.5. Velikost pórů byla dvojího typu, a to 500 μm a 1000 μm . Tyto velikosti byly definovány jako průměr vepsané kružnice vepsané do póru v základní struktuře příhradové konstrukce, obr. 1.6.

Design	T1000	T500	H1000	H500	R1000	R500
Strut size	200 μm	200 μm	200 μm	200 μm	200 μm	200 μm
Pore size	1000 μm	500 μm	1000 μm	500 μm	1000 μm	500 μm
A) Unit cell (CAD)	Horizontal					
	Vertical					

Obr. 1.5 Testované struktury okostice

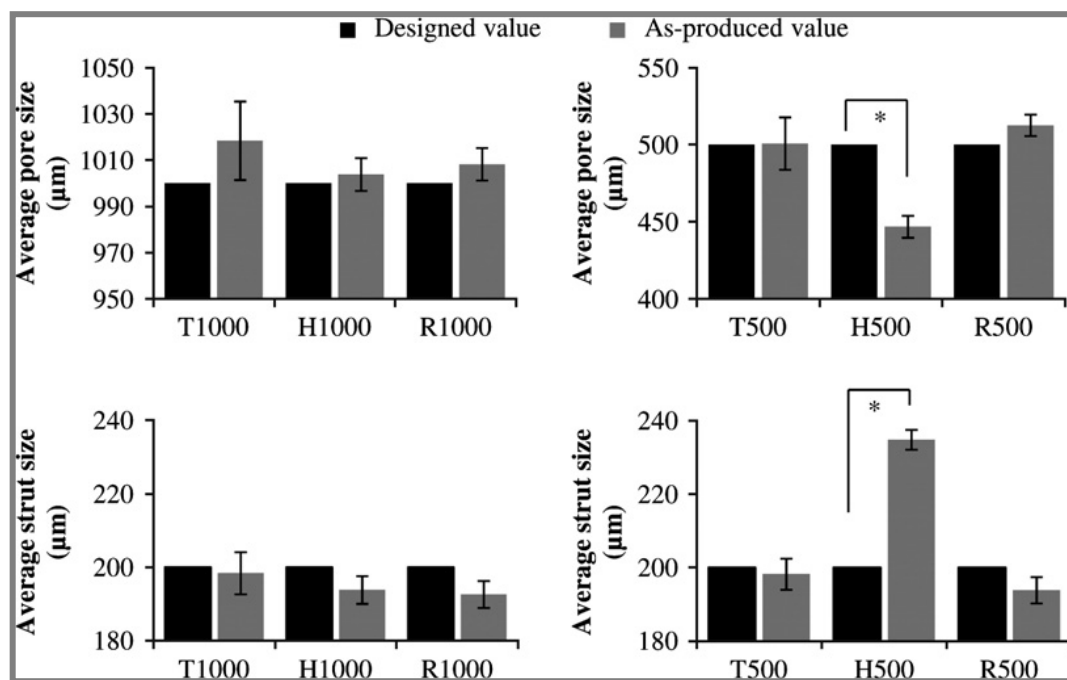
U technologie SLM je nutné použití podpurných konstrukcí, zejména proto, aby docházelo k lepšímu odvodu tepla ze stavěných dílů, ale také z důvodu podepření stavěného 2D řezu výsledného dílu. Podpory je ale následně nutno z dílu odebrat a může tak dojít k jeho částečnému poškození. Z tohoto důvodu byly ve vertikální rovině (u stroje rovina procházející osou Z) navrženy póry jako kosočtverce, kdy úhel nosného prutu vůči základní desce byl vždy vyšší nebo roven 30°. Síla všech prutů příhradové konstrukce byla navržena jako 200 μm . Tyto základní buňky konstrukce byly spojeny do konstrukcí o výšce a průměru 6 mm.



Obr. 1.6 Princip měření geometrie

Všechny díly byly postaveny na nekomerčně vyvinutém SLM stroji vybaveném Ytterbiovým laserem s výkonem 300 W a průměrem bodu paprsku na prášku 80 μm . Stavba dílu byla realizována po vrstvách o tloušťce 30 μm , kdy byl výkon laseru nastaven na 42 W a rychlost posuvu laserového paprsku po vrstvě prášku na 260 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Aby bylo dosaženo nejvyšší možné přesnosti měření, byla výsledná

konstrukce po stavbě očištěna ponořením do chemického roztoku 0,5 ml kyseliny fluorovodíkové a 50 g vody. Po deseti minutách byl vzorek z roztoku vyjmut, a opláchnut demineralizovanou vodou, následně opláchnut etanolem a nakonec vysušen na vzduchu. Velikost pórů ve 2D byla měřena pomocí CNC měřicího stroje Quickvision Pro 202. Pro každou z konstrukcí bylo provedeno měření pěti náhodně vybraných pórů, průměrů jejich vepsaných kružnic, a šířky pěti náhodně vybraných vzpěr. Průměrné hodnoty velikostí a průměrů byly následně srovnány s původně navrženými rozměry, obr. 1.7. [8]



Obr. 1.7 Srovnání velikostí pórů a vzpěr struktury

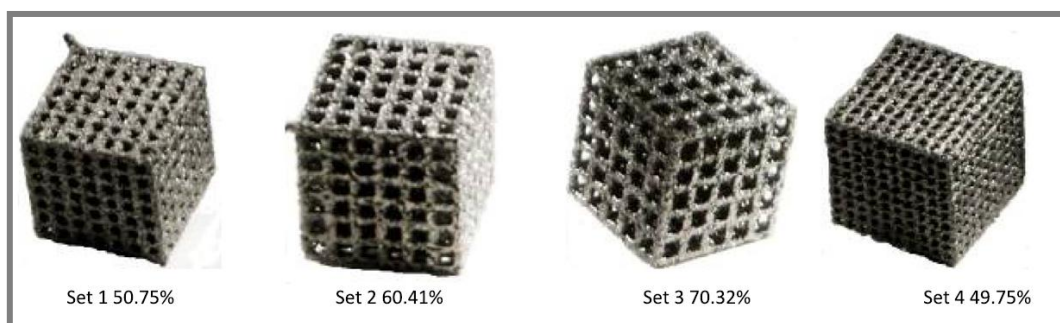
PARTHASARATHY, Jayanthi, Binil STARLY, Shivakumar RAMAN, M. MOESEN, G. KERCKHOFS, H. VAN OOSTERWYCK, J.-P. KRUTH a J. SCHROOTEN. A design for the additive manufacture of functionally graded porous structures with tailored mechanical properties for biomedical applications. *Journal of Manufacturing Processes*. 2011, vol. 13, issue 2, s. 160-170. DOI: 10.1016/j.jmapro.2011.01.004.

Článek se zabývá tvorbou periodické buněčné struktury zaměřené na medicínské aplikace. Pro tyto potřeby bylo postaveno celkem 28 testovacích dílů, jejich základem je krychle o hraně 15 mm, tvořená pruty. U 21 zkušebních dílů měly tyto pruty tloušťku 800 μm, u zbylých sedmi je tloušťka prutů 450 μm. 21 zkušebních dílů bylo stavěno v sadách po sedmi dílech, kdy se mezi jednotlivými sadami lišila velikost pórů mezi jednotlivými pruty. Čtvrtá sada byla navržena s velikostí pórů 1000 μm.

Tab. 1.1 Označení a parametry stavby zkušebních dílů

Sada	Síla prutů [μm]	Tloušťka prutů [μm]	Počet pórů	Pórovitost [%]
1	800	1230	7	60,91
2	800	1570	6	68,6
3	800	2040	5	75,83
4	450	1000	10	74

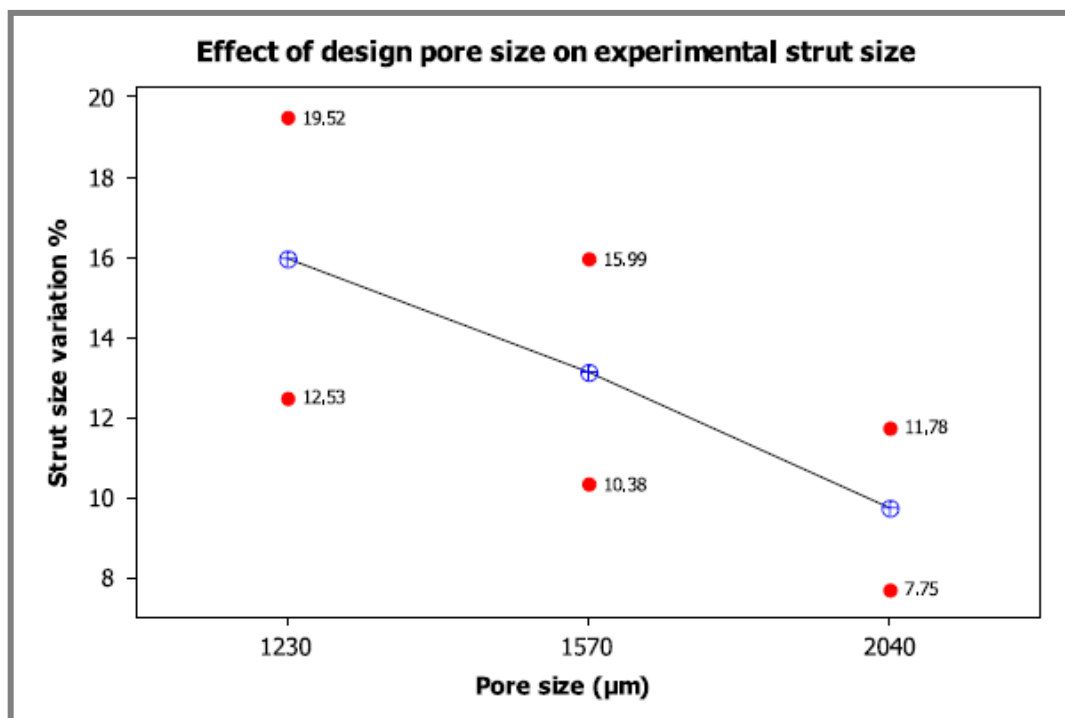
Stavba dílů probíhala na stroji ARCAM, pracujícím na bázi elektronového paprsku¹. Všechny díly byly v experimentu orientovány tak, že svíraly s pracovní rovinou stroje, rovina, ve které je prášek, úhel 45° a to především z důvodu rovnoměrného rozložení sil ve vodorovném i kolmém směru na směr stavby. Tloušťka jednotlivých vrstev prášku o zrnitosti $40 - 80 \mu\text{m}$ byla nastavena na $100 \mu\text{m}$. Tak jako tloušťka jednotlivých vrstev, tak i rychlost posuvu paprsku a výkon paprsku byly nastaveny pro každou vrstvu na stejnou hodnotu a to $1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a 15 mA . Pro zjištění rozměrů jednotlivých prutů a pórů byl použit optický mikroskop.



Obr. 1.8 Buněčné struktury

Průměrná délka jednotlivých dílů, původně navržená na 15 mm , byla změřena jako $15,15 (\pm 0,046) \text{ mm}$. Odchylka od původních rozměrů je tedy více než 1% . Průměrný objem dílů byl proti původnímu návrhu, 3375 mm^3 , větší o $3,29\%$, $3479,365 (\pm 31,80) \text{ mm}^3$. [9]

¹ Princip stavby dílu u této technologie, je obdobný, s principem stavby dílu u SLM. Prášek je nanášen v jednotlivých vrstvách, kdy po zpracování dané vrstvy platforma klesne o tloušťku vrstvy a je nanášen další prášek. Zpracování materiálu probíhá pomocí elektronového paprsku, který je emitován elektronovým dělem a za pomoci elektromagnetických cívek je směřován a zaostřen na vrstvu prášku. Celý proces je realizován ve vakuové komoře.

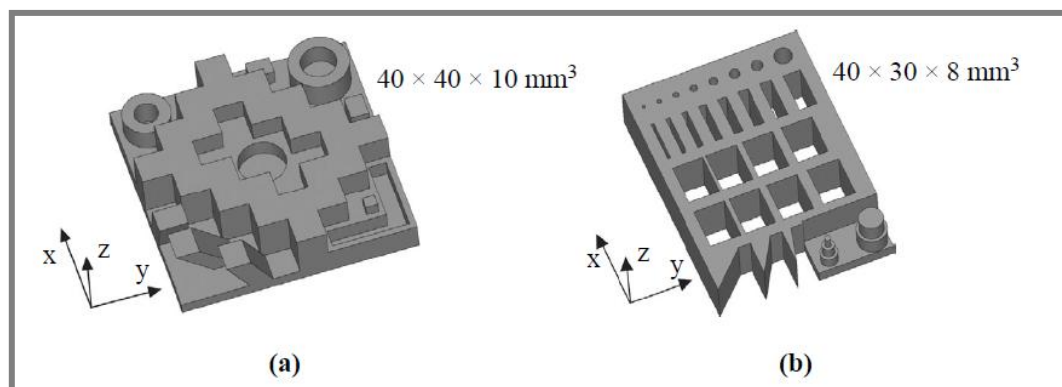


Obr. 1.9 Vliv velikosti pórů na sílu prutů

VANDENBROUCKE, Ben, Jean-Pierre KRUTH, Shivakumar RAMAN, M. MOESEN, G. KERCKHOFS, H. VAN OOSTERWYCK, J.-P. KRUTH a J. SCHROOTEN. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2007, vol. 13, isme 4, s. 196-203. DOI: 10.1108/13552540710776142.

Tento článek popisuje SLM jako technologii pro biomedicínské aplikace. Pro lékařské a dentální aplikace je tato technologie vhodná zejména proto, že dokáže produkovat složité geometrie a umožňuje silnou individualizaci. Vzhledem k prostorovým možnostem technologie SLM je možné současně stavět několik dílů. V této studii byl SML proces optimalizován pro dva biokompatibilní kovové materiály, Ti-6Al-4V a Co-Cr-Mo.

Všechny zkušební vzorky byly stavěny na stroji M3 linear produkovaném německou firmou Concept Laser GmbH. Stroj je vybaven Nd:YAG laserem o výkonu 95 W s průměrem laserového paprsku 200 µm. Titanový prášek byl zpracováván v komoře se stálým průtokem argonu a obsahem kyslíku pod 0,1%. Kobalt-chromový prášek byl zpracováván v komoře s obsahem dusíku. Hlavními experimentálními parametry byl výkon laseru, tloušťka vrstvy prášku, rychlost laseru a překryv jednotlivých drah laseru. Pro možnosti charakterizovat SLM na procesní omezení a proveditelnost byly navrženy dva testovací díly, obr. 1.10.



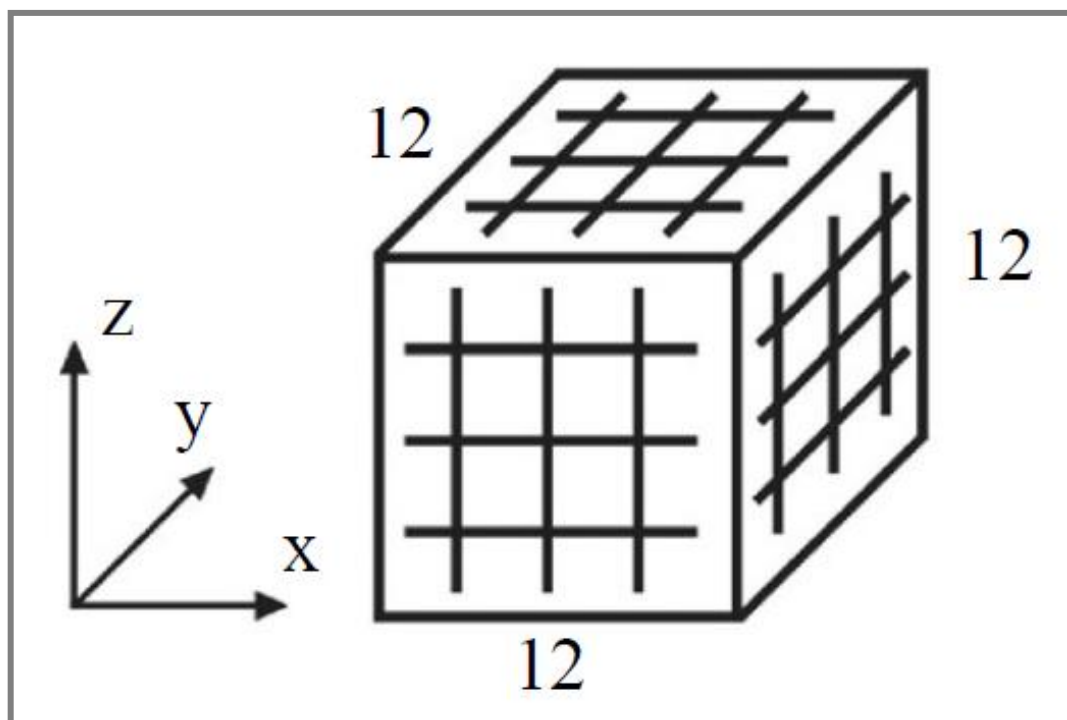
Obr. 1.10 Zkušební díly pro testy procesních omezení

Po stavbě byly oba zkušební díly analyzovány pro zjištění přesnosti. Nejenže bylo vyhodnocení použito pro charakterizaci procesních omezení, ale také k iterativní optimalizaci parametrů celého procesu. První testovací díl, obr. 1.10 (a), byl použit ke zjištění přesnosti stavby v osách X, Y a Z, k měření přesnosti válcových a šikmých prvků. Rovinná plocha o tloušťce 2 mm byla určena k zjištění deformací v důsledku teplotního namáhání. Druhý testovací díl, obr. 1.10 (b), byl určen k ověření přesnosti a rozlišení procesu. Na dílu se nacházejí malé otvory s kruhovým a obdélníkovým průřezem a tenké stěny v rozmezí rozměru 0,5 – 3 mm. Ostré hrany s úhlem 15 – 45° byly určeny k testování vlivu akumulace tepla ve špičce úhlu. Referenční geometrické tvary obou testovacích dílů byly třikrát změřeny dotykovou sondou na 3D NC souřadnicovém stroji. Nejmenší rozměry byly měřeny na optickém mikro-měřicím stroji. Odchyłky naměřené na postaveném dílu jsou zobrazeny v tabulce 1.2. K navrženým rozměrům jsou vztahovány jak absolutně (Abs.), tak relativně (Rel.), vždy v průměrné (Avrg.) a maximální hodnotě (Max.)

Tab. 1.2 Odchyłky rozměrů od návrhu zkušební dílu

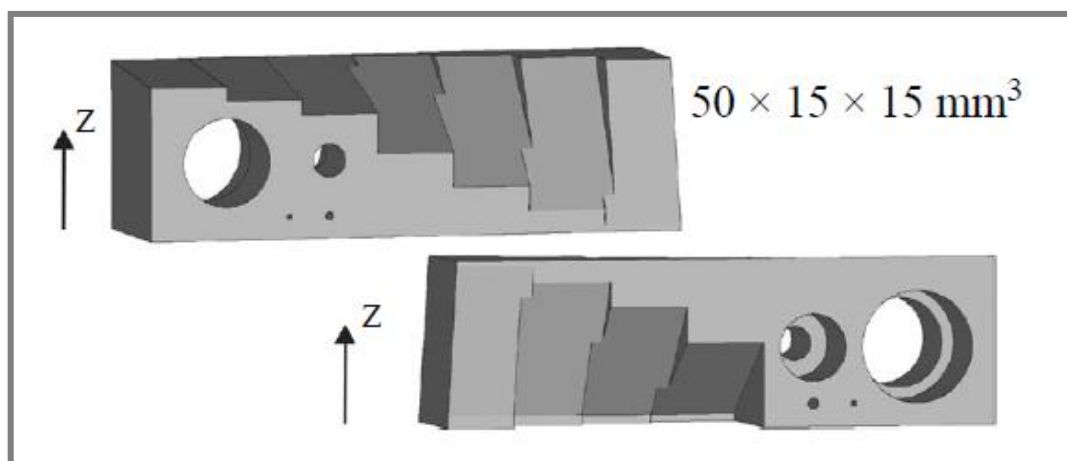
	Směr X		Směr Y		Směr Z		Průměry		Úhly	
	Avrg.	Max.	Avrg.	Max.	Avrg.	Max.	Avrg.	Max.	Avrg.	Max.
Abs. [μm]	15	36	17	30	11	21	24	36	0,51°	1,33°
Rel. [%]	0,25	0,97	0,30	1,40	0,21	0,52	0,38	0,90	x	x

Vzhledem k tomu, že drsnost povrchu postavených dílů je relativně vysoká, což může být pro některé aplikace velmi nevhodné, byla provedena analýza vlivů ovlivňujících drsnost povrchu. Drsnost povrchu je závislá na tloušťce vrstvy prášku, úhlu sklonu k základní desce a na následném opracování povrchu. Pro každý materiál došlo ke stavbě tří zkušebních vzorků, krychlí o hraně 12 mm. Každá série vzorků se lišila povrchovým zpracováním. První byla bez následného zpracování povrchu, povrch zkušebních vzorků druhé série byl ošetřen tryskáním skleněnými elementy. U třetí série došlo k ošetření povrchu keramickými elementy za použití ultrazvuku. Drsnost povrchu byla měřena na horní a dvou bočních plochách v několika směrech, jak je znázorněno na obrázku 1.11.



Obr. 1.11 Způsob měření drsnosti povrchu testovacího dílu

Testovací model na obrázku 1.12 je určen k posouzení vlivu sklonu vůči platformě stroje. Díl obsahuje plochy, které nejsou stavěny ve vodorovné pozici, ale jsou skloněny vzhledem k platformě stroje v rozsahu $0 - 90^\circ$ z horní strany a $30 - 90^\circ$ ze spodní strany zkušebního dílu.



Obr. 1.12 Model k měření drsnosti povrchu při různém sklonu vůči platformě

Tyto díly byly postaveny ve třech provedeních, kdy se vždy lišila tloušťka vrstvy prášku. Ta byla nastavena na 20, 30 a 50 μm . Při stavbě všech dílů byl nastaven maximální výkon laseru, tj. 95 W. Rychlosti laseru, stejně jako vzdálenosti jednotlivých drah, byla nastavena na tři rozdílné hodnoty, 90, 140 a 190 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, respektive 100, 120 a 140 μm . Tím bylo získáno devět experimentálních vzorků, z nichž každý měl jiné parametry tisku. Pro vzorky s nastavenými drahami laseru ve vzdálenosti 100 μm (50% překryv drah laseru) muselo dojít ke zrušení stavby

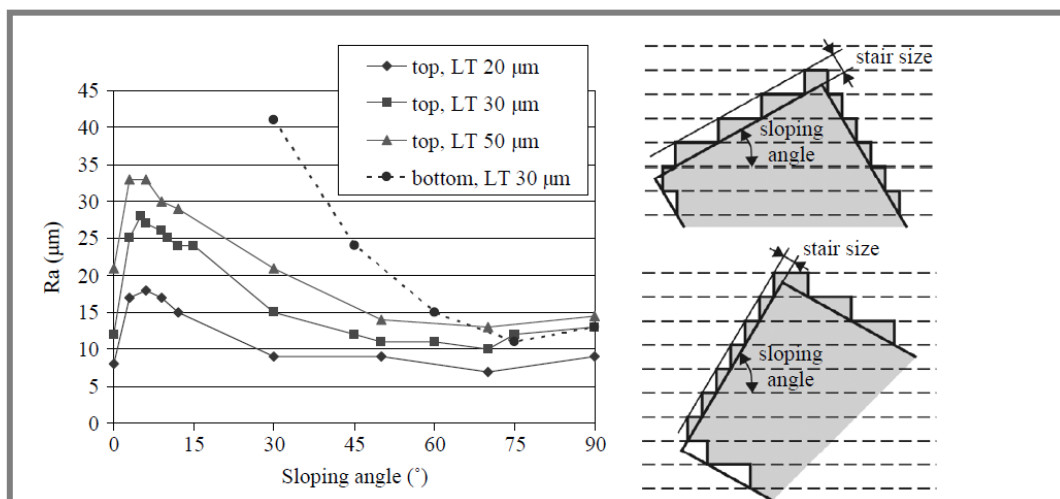
z důvodu velmi vysoké drsnosti horní plochy. To vedlo k problémům s ukládáním prášku.

Drsnost povrchu u horní a boční plochy testovaného dílu je téměř srovnatelná. Po opracování povrchu skleněnými kuličkami, případně keramikou je patrný výrazný pokles drsnosti povrchu., tabulka 1.3.

Tab. 1.3 Drsnost povrchu testovacích dílů

	SLM Ti-6Al-4V		SLM Co-Cr-Mo	
	Horní strana	Boční strana	Horní strana	Boční strana
SLM				
Ra	18	20	15	15
Rz	92	110	87	90
Tryskání				
Ra	12	13	12	8
Rz	70	81	66	43
Ultrazvuk				
Ra	10	11	7	5
Rz	45	64	40	25

Na obrázku 1.13 je znázorněn vliv úhlu plochy k platformě. Drsnosti byly naměřeny na testovacím dílu vyrobeném z titanového prášku. Drsnost povrchu by měla teoreticky úměrně klesat s hodnotou kosinu úhlu šikmé stěny.



Obr. 1.13 Vyhodnocení drsnosti povrchu

V důsledku toho může být schodovitý efekt snížen vhodným umístěním dílu na platformu stroje. Při větším úhlu dojde při stavbě k nanesení většího počtu vrstev, takže bude vytvořeno více schodů. Horní plocha těchto schodů bude ale menší, což vede ke snížení drsnosti povrchu. [10]

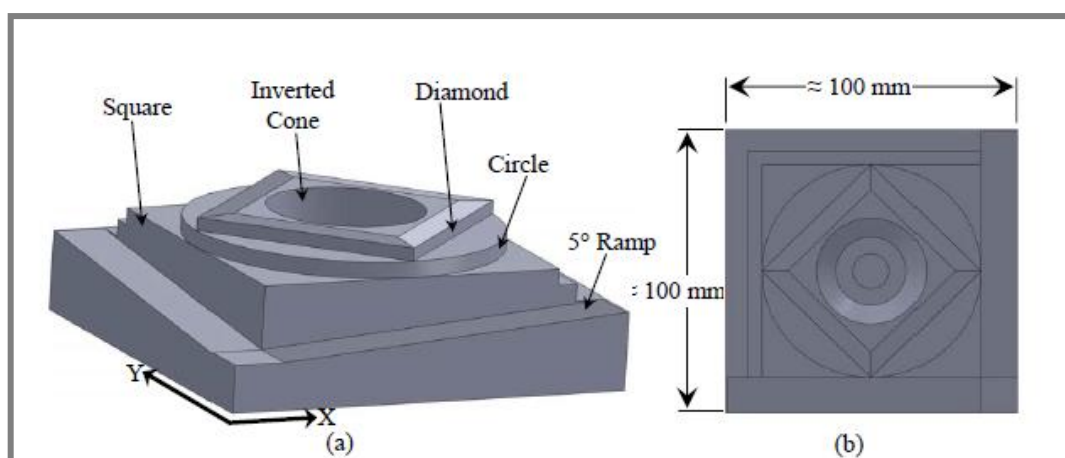
1.5 Srovnávací testy

National Institute of Standards and Technology z Amerického Gaithersburgu provedl studii, ve které došlo ke srovnání několika systémů aditivní výroby součástí. Všechny tyto stroje pracovaly s kovovými prášky. Studie se opírala o normy pro hodnocení výkonnosti obráběcích strojů, které jsou používány v průmyslu pro výběr vhodného stroje, plánování procesu a kontrolu kvality obrobených dílů. Přené normy použité v této studii jsou americké ANSI/ASME B5.54 a ANSI/ASME B5.57 a evropské ISO 230 a ISO 10791. Celkem bylo testováno osm strojů od různých výrobců. Přesná specifikace těchto strojů není ve zprávě uvedena, jedinou specifikací strojů je základní princip, na kterém fungují. Čtyři stroje jsou založeny na bázi elektronového paprsku, další čtyři pak na bázi laseru. U strojů na bázi elektronového paprsku byly zkušební díly stavěny z prášku Ti-6Al-4V. Tloušťka vrstvy byla u všech strojů shodná a to 100 μm . U strojů využívajících laser byla použita nerezová ocel a tloušťky jednotlivých vrstev byly v rozmezí 20 – 40 μm .

Tab. 1.4 Označení a parametry stavby zkušebních dílů

Proces	Označení dílu	Materiál	Počet dílů	Tloušťka vrstvy [μm]
E-Beam	A1	Ti-6Al-4V	1	100
	A2	Ti-6Al-4V	1	100
	A3	Ti-6Al-4V	1	100
	A4	Ti-6Al-4V	2	100
Laser	B1	17-4 Nerezová ocel	1	40
	B2	17-4 Nerezová ocel	2	30
	B3	17-4 Nerezová ocel	1	20
	B4	15-5 Nerezová ocel	1	20

Testovací díl s označením NAS 979, obr 1.14, byl původně vyvinut v roce 1966 jako testovací díl pro kontrolu výkonu CNC obráběcích center. Později byl díl upraven přidáním převráceného kužele. Tento díl byl použit především k usnadnění srovnání strojů založených na aditivní technologii s klasickým obráběním.



Obr. 1.14 Testovací díl NAS 979

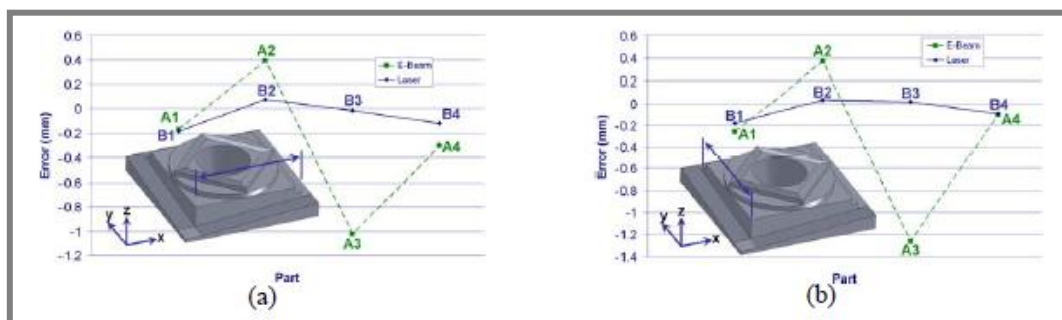
Plochy modelu a měřené rozměry:

- Square a diamond
 - o Velikost
 - o Rovinnost
 - o Kolmost
 - o Rovnoběžnost
 - o Kvalita povrchu
- 5°Ramp
 - o Úhlová odchylka
- Circle
 - o Velikost
 - o Kruhovitost
 - o Kvalita povrchu
- Inverted Cone
 - o Výkon pěti osých CNC

Celkem došlo k výrobě deseti testovacích dílů, po pěti na každé technologii. Všechny díly byly vyrobeny firmami poskytující tyto technologie. Každý z dílů byl vyroben na základní desce v rovině XY vodorovné s povrchem prášku. Díly byly stavěny jako tenkostěnné skořepiny s tloušťkou stěny 3 mm. Jediným dílem, který byl postaven jako plná součást, byl testovací díl s označením B4. U dílů stavěných za pomoci laseru byly použity tenkostěnné podpůrné struktury, které nebyly odstraněny. Jediné následné zpracování dílů bylo jejich oddělení od platformy stroje, na které byly stavěny. Tímto mohlo dojít k deformacím dílů, které byly způsobeny vnitřním pnutím jednotlivých dílů. U dílů stavěných na laserové technologii byly ponechány podpůrné struktury. Tyto struktury mohou částečně bránit deformacím, vzniklým právě vnitřním pnutím.

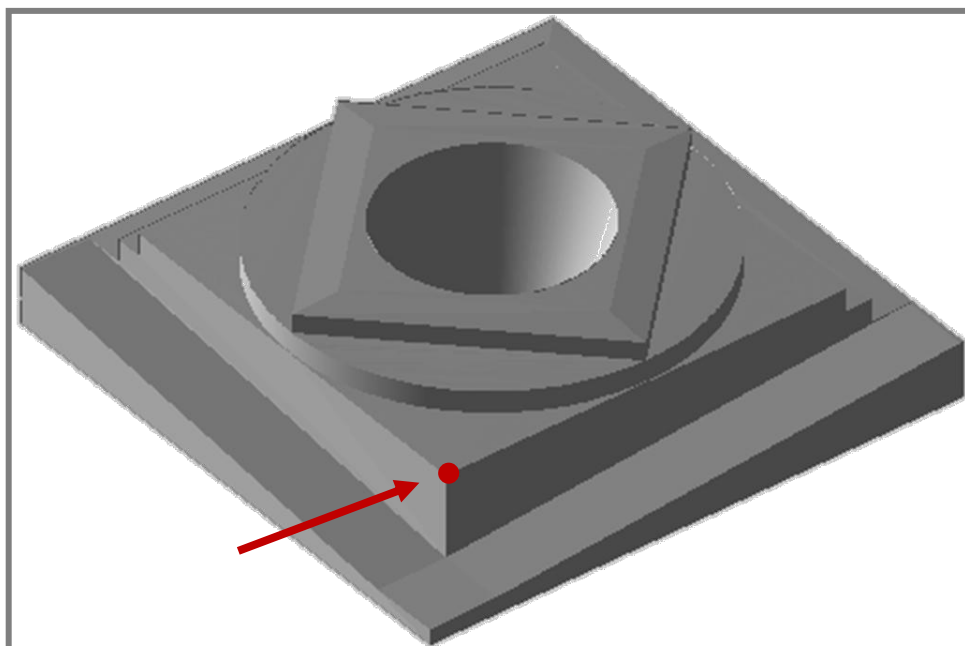
K měření dílů bylo použito technologie CMM se skenovací sondou o poloměru 1,5 mm. Přesnost technologie CMM je $\pm 0,5 \mu\text{m}$ pro měřenou geometrii. Vzniklé nepřesnosti na dílu jsou vypočteny ve vztahu k STL datům. Tento vztah byl zaveden z důvodu možné chyby vzniklé aproximací geometrie STL modelu.

Geometrická přesnost stavby ve směrech osy X (a) a osy Y (b).



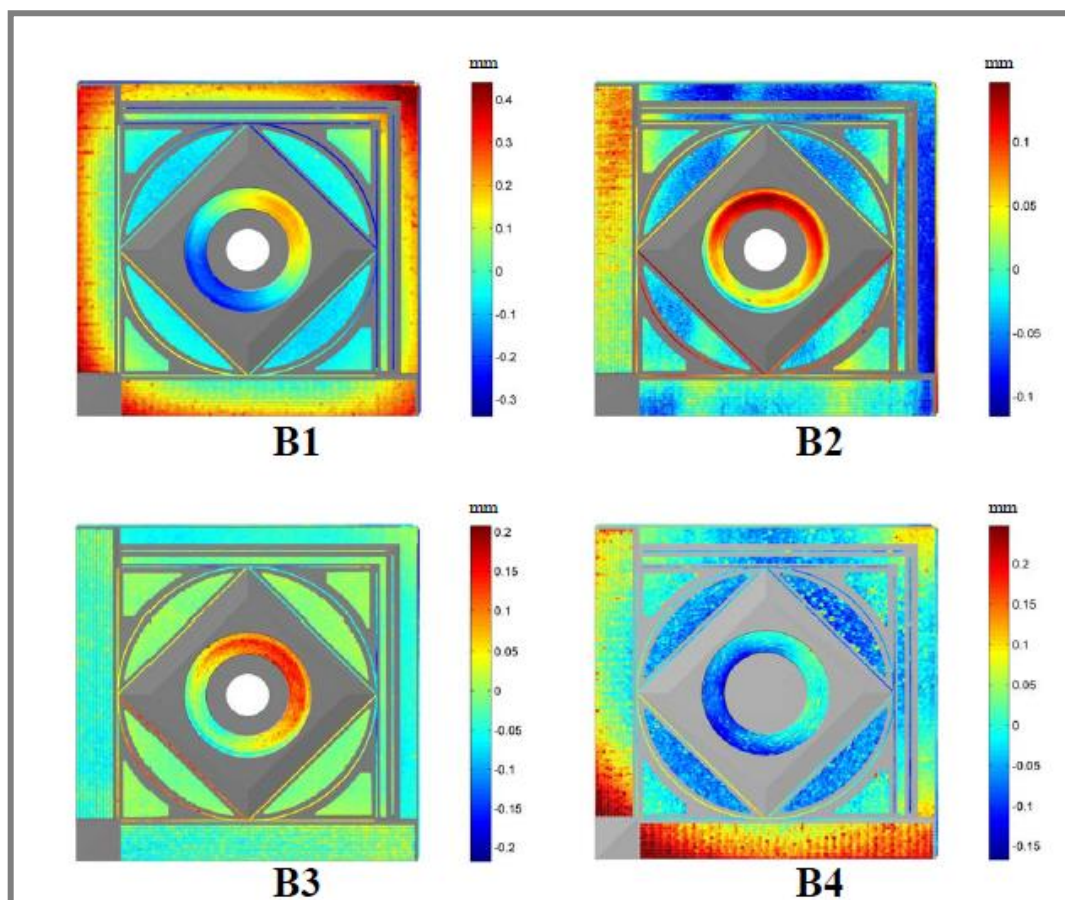
Obr. 1.15 Geometrická přesnost stavby ve směrech osy X (a) a osy Y (b)

Pro porovnání odchylek dílů postavených na jednotlivých strojích bylo nutné posuzovat stejně ustavné díly. Proto byla všechna data zarovnána na stejné roviny s počátkem souřadného systému v jednom daném bodě, obr 1.16.



Obr. 1.16 Počátek souřadného systému

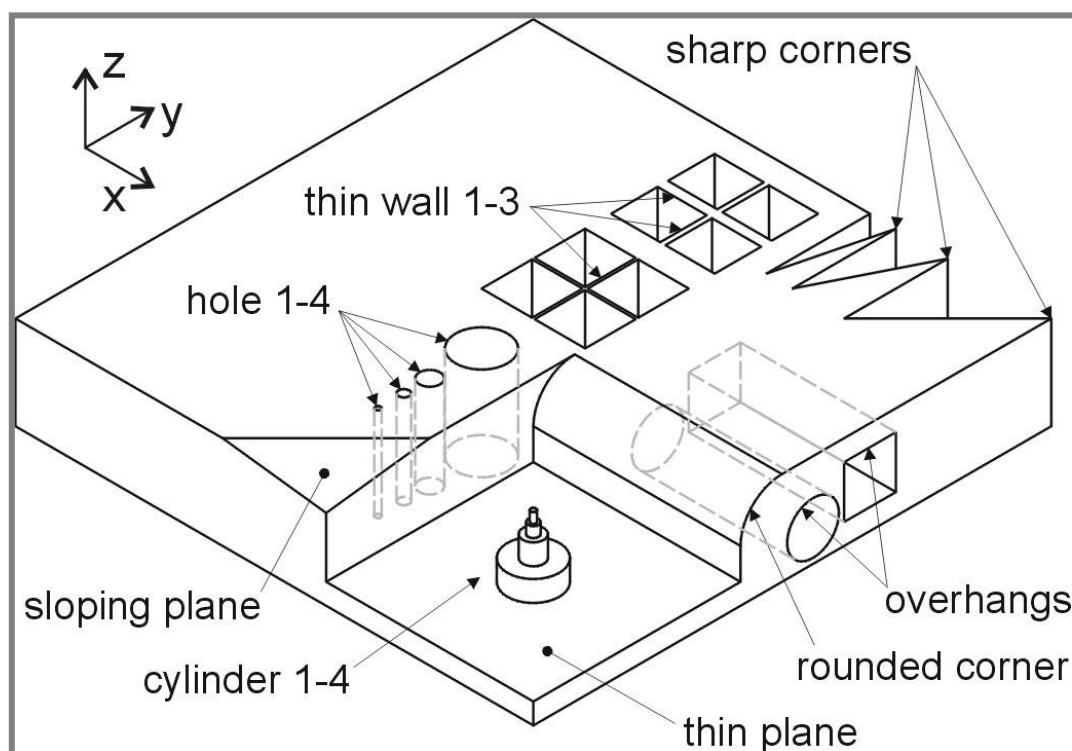
Jak plyne z obrázku 1.17, byl každý díl na strojích na laserové technologii postaven s odlišnou přesností pro dané geometrie. [11]



Obr. 1.17 Nepřesnosti vzniklé při stavbě dílu NAS 979

Obdobné testy byly provedeny také na univerzitě v belgické Lovani. Testováno bylo celkem pět strojů na bázi SLS a SLM. Stroje se lišily parametry stavby, materiálem a způsobem upevnění k platformě. Analýza byla mimo jiné prováděna i pro kontrolu přesnosti procesů a srovnání kvality jednotlivých povrchů.

Srovnání je uplatněno především proto, že pro každou kombinaci pracovního stroje, parametry práškového materiálu a zpracování je nutné jiné, lehce specifické nastavení.



Obr. 1.18 Testovací díl 50 x 50 x 9 mm

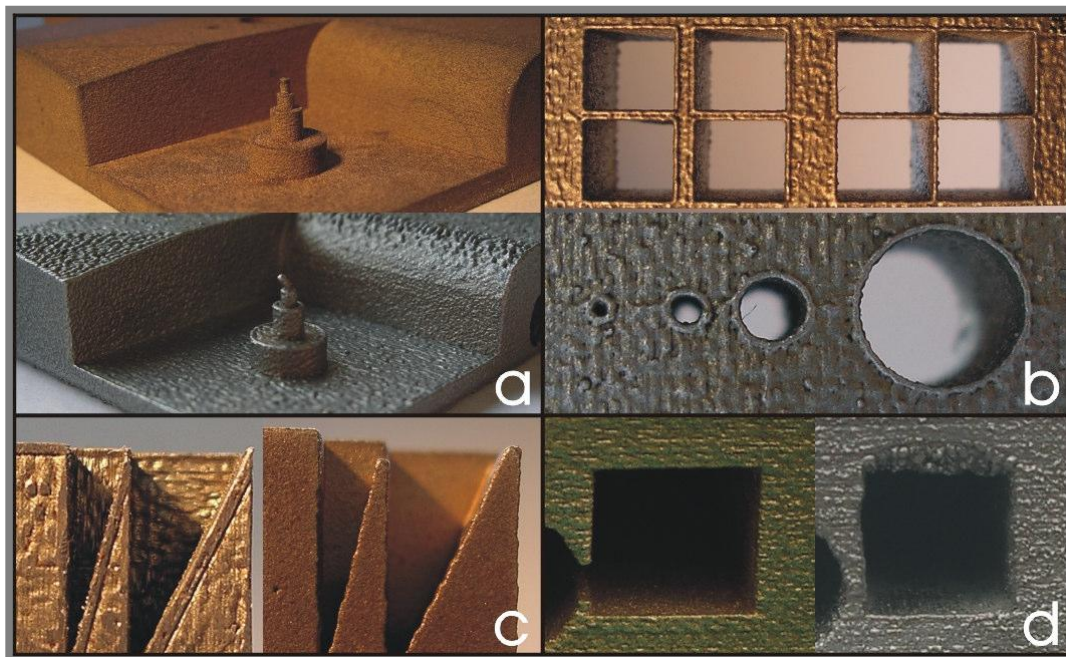
Pro srovnání byl použit testovací díl o rozměrech 50 x 50 x 9 mm, obr. 1.18. Část modelu byla použita pro mechanické zkoušky, druhá část, obsahující geometrické prvky byla použita pro kontrolu a porovnání možností a omezení jednotlivých strojů. Šikmá rovina a zaoblený roh sloužily k analýze schodovitého efektu způsobeného spojováním jednotlivých vrstev. Tenká rovina byla určena k posouzení teplotní deformace. Přesnost a omezení stavby byla analyzována na dírách s kruhový průřezem s průměry 0,5 – 5 mm a tenkých stěnách, jejichž tloušťky byly v rozmezí 0,25 – 1 mm. Ostré hrany s úhly 14 – 45° byly použity pro kontrolu vlivu akumulace tepla na špičku úhlu. Kruhový a obdélníkový převis byl určen pro kontrolu možností stavby bez podpůrných konstrukcí.

V tabulce 1.5 jsou uvedeny stroje, na kterých byly vyráběny testovací díly pro tuto analýzu, materiály, způsob upevnění k platformě a základní parametry stavby.

Tab. 1.5 Specifikace strojů a procesů

Číslo	Stroj	Způsob upevnění k platformě	Materiál	Tloušťka vrstvy Výkon laseru
1	3D Systém DTM	Slinování kapalnou fází (polymer)	Nerezová ocel s polymerním povlakem	80 μm 10 W
2	Concept Laser	Úplné tavení materiálu	Nástrojová ocel	30 μm 100 W
3	Trumpf	Úplné tavení materiálu	Nerezová ocel 316L	50 μm ≤ 200 W
4	MCP-HEK	Úplné tavení materiálu	Nerezová ocel 316	50 μm 100 W
5	EOS	Částečné tavení materiálu	Bronz	20 μm 221 W

Válce s průměrem menším než 0,5 mm nemohou být vyrobeny z důvodu nedostatečné pevnosti materiálu, obrázek 1.19 (a). Tenká stěna s tloušťkou 0,25 mm je stavěna tak, že v každé vrstvě laser po této stěně urazí pouze jednu dráhu. Proto je tedy velikost stěny omezena na velikost bodu paprsku laseru, obrázek 1.19 (b). U ostrých rohů může docházet k nedokonalé stavbě špiček rohů, obrázek 1.19 (c), a to především tehdy, není-li procesními parametry zabráněno akumulaci tepla v této špičce. Vzhledem k tomu, že laserový paprsek proniká hluboko do prášku, dochází k natavení nezpracovaného prášku, a proto nemohou být převislé geometrie stavěny zcela přesně. Při použití podpurných struktur by k tomuto jevu nedocházelo, obrázek 1.19 (d).



Obr. 1.19 Nepřesnosti při stavbě testovacího dílu

U stavby je mimo jiné důležitá i časová náročnost celého procesu. Nezáleží tak pouze na geometrických, ale i ekonomických parametrech procesu. Z tohoto důvodu je vhodné provádět stavbu většího množství dílů na platformě. Odpadá tak totiž příprava stroje na nový tisk a celý proces se tím zrychluje. [5]

2 CÍL PRÁCE, VĚDECKÁ OTÁZKA A PRACOVNÍ HYPOTÉZA

2.1 Cíl práce

Cílem práce je návrh testovacích dílů, jejich výroba technologií SLM a následné ověření geometrické přesnosti užitím optické digitalizace a analýzy odchylek a geometrických tolerancí softwaru ATOS 7.5. Zjištěné odchylky budou dále kompenzovány vhodným nastavením parametrů systému SLM.

Mělo by dojít k vyhodnocení tisku a iterativním způsobem zvýšit přesnost stavby dílů.

2.2 Pracovní hypotéza

Stavba dílů by měla být ovlivněna mnoha faktory. Nepřesnosti stroje není možné ovlivnit. Proto musí dojít ke zjištění dalších parametrů ovlivňujících přesnost stroje. Tyto parametry je pak nutné blíže analyzovat a získat tak co možná nejlepší nastavení pro stavu dílů.

3 MATERIÁLY A METODY

3

3.1 SLM 280HL

Všechny tisky byly provedeny na stroji SLM 280HL vyráběného a dodaného firmou SLM Solutions GmbH sídlící v Německém Lübecku. Firma se zabývá technologií SLM téměř patnáct let a patří ke světovým leaderům v této technologii. [12]

Stroj SLM 280HL, obrázek 3.1, umožňuje stavbu dílů ze širokého spektra kovových prášků v komoře o rozměrech $280 \times 280 \times 350 \text{ mm}^3$. Je vybaven výkonným laserem, který je schopen pracovat v rozmezí od 400 do 1000 W. Stroj umožňuje stavbu dílů rychlostí až 35 cm^3 za hodinu, v závislosti na pozici na platformě a složitosti geometrie. Po celou dobu stavby dílu je do komory, v níž je umístěna platforma, vháněn argon, případně dusík, o průtoku 2,5 litru za minutu. Celkové rozměry stroje jsou $1800 \times 1900 \times 1000 \text{ mm}$ (V x Š x H) a hmotnost, pokud není naplněn zásobník práškem, je cca 1000 kg. [13]



Obr. 3.1 Stroj SLM 280 HL

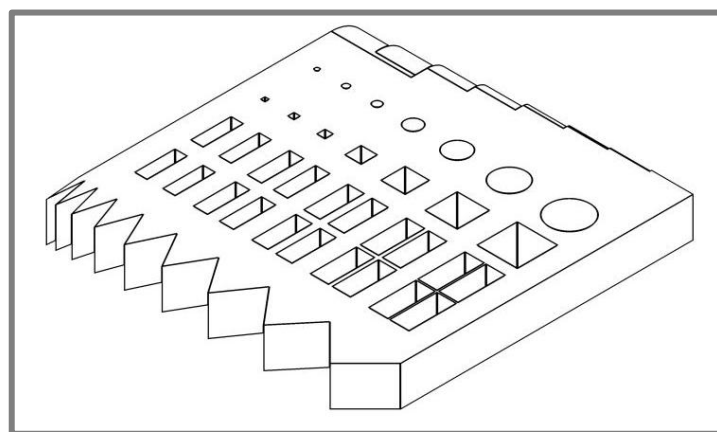
3.2 Testovací model

Testovací díl neslouží pouze pro analýzu procesních omezení, ale slouží také k optimalizaci procesu tisku. Několik srovnávacích testů u jednoho modelu může vést k dosažení optimálních parametrů celého procesu. Geometrické a mechanické vlastnosti vyrobeného dílu se liší pro každou kombinaci stroje, parametrů práškového materiálu a zpracování při tisku.

Návrh testovacích dílů proběhl na základě poznatků získaných v rešerši a k jejich vymodelování byl použit program Autodesk Inventor.

3.2.1 Testovací model pro zjištění geometrických rozměrů

Vzhledem k požadavkům na tisk různých geometrických tvarů je nutno zjistit možnosti stroje a zjistit tak odchylky, které vznikají. Není však možné testovat nahodile geometrické tvary. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k návrhu testovacího dílu, který obsahuje základní geometrické tvary, válcovou a čtvercovou díru. Průměry válců a délky hran jednotlivých elementů jsou v rozmezí od 0,5 mm do 5 mm. Rozměry těchto geometrických tvarů jsou měřeny jako rozměry děr. Dalšími geometrickými prvky jsou tenké stěny o síle od 0,25 mm do 2 mm a zuby, které svírají úhly od 10 do 90 stupňů. U těchto geometrických tvarů jde o naopak o rozměry plného materiálu, stejně jako u celkových rozměrů testovacího dílu, které jsou 40,25 mm v směru mezi rovnými plochami (při tisku směr osy X) a 41 mm ve směru přes úhlové zuby (při tisku směr osy Y). Výška testovacího dílu (při tisku směr osy Z) byla původně navržena na 5 mm. Po konzultaci se zastupiteli firmy SLM Solutions GmbH byla změněna výška testovacího dílu na 10 mm. Díky této změně mělo dojít k lepšímu měření velikosti součásti ve směru osy Z. Vzhledem k tomu, že testovací díl byl spojen s platformou stroje za pomoci podpor, bylo velmi obtížné najít hranici mezi podporami a samotným testovacím dílem. Proto z důvodu úspory materiálu byl proveden pouze jeden tisk s takto vysokým dílem. K dalším tiskům byly použity opět testovací díly o výšce 5 mm, obrázek 3.2.



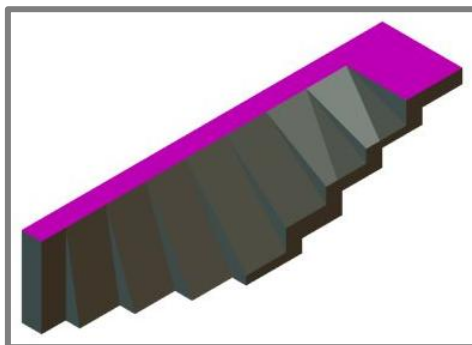
Obr. 3.2 Testovací model – Geometrická přesnost

3.2.2 Testovací model pro zjištění drsnosti ploch

Při tisku dílů dochází k roztavení vrstvy prášku o síle 50 μm a následnému nanesení další vrstvy. Pokud je tedy plocha tvořena jinak než kolmo k základní platformě stroje, dochází odskoku jednotlivých hran plochy. Výsledná drsnost ploch s různým sklonem vzhledem k základní platformě by se pak měla lišit. Z tohoto důvodu byl

připraven testovací díl pro zjištění drsnosti povrchu na plochách v téměř celém úhlovém spektru.

Testovací díl se skládá z jednotlivých ploch, které jsou vůči sobě pootočený o 10° . Plochy pro následné měření drsnosti jsou orientovány, jejich normály, tak, aby každá plocha svírala jiný úhel s platformou. Vzhledem k nutnosti spojit testovací díl s platformou není možné zjistit drsnosti všech ploch. Plocha, jejíž normála svírá s normálou platformy úhel 180° , na obrázku 3.3 barevně zvýrazněna, byla spojena pomocí podpůrného materiálu s platformou.



Obr. 3.3 Testovací díl – drsnost ploch

3.2.3 Testovací model pro zjištění vlivu parametrů stavby

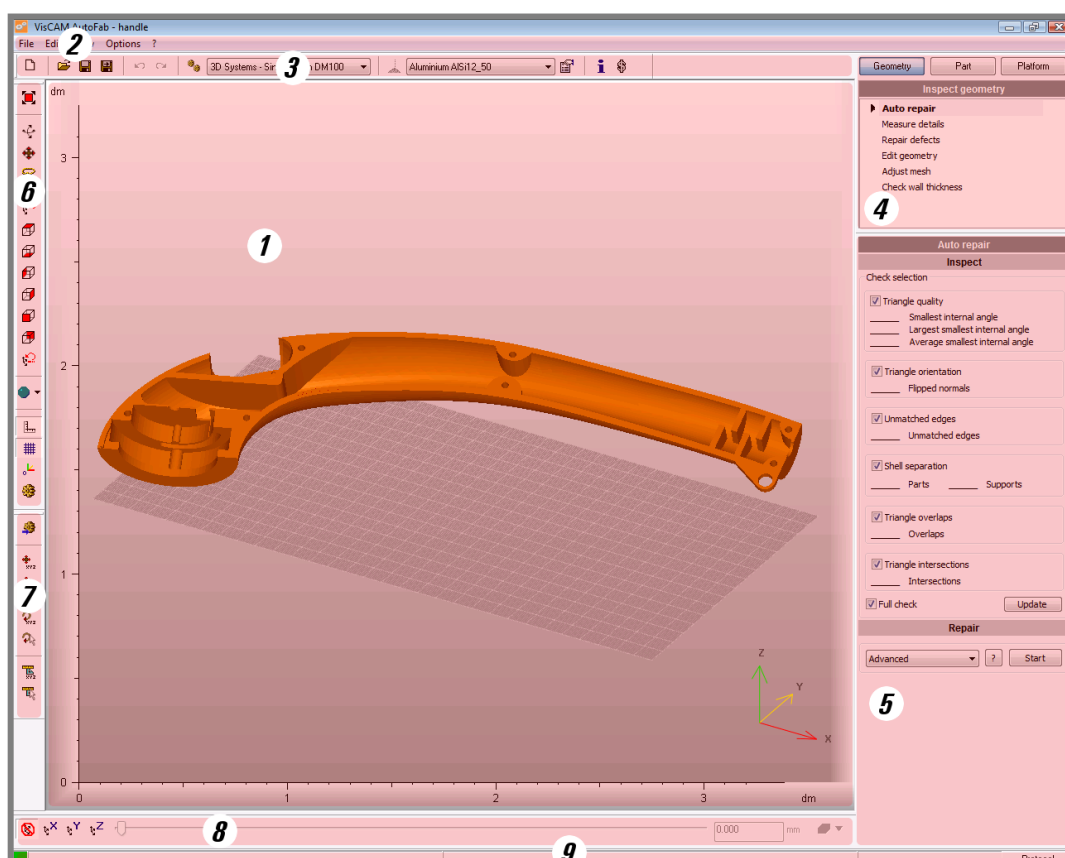
Nastavení parametrů tisku ovlivňuje přesnost stavby. Není nutné, aby díl obsahoval složité geometrie. Pro tento účel byl vyvinut testovací díl ve tvaru válce o průměru a výšce 10 mm. Válcový tvar byl zvolen především proto, že kruh neobsahuje žádné koncentrátoři napětí. Z tohoto důvodu by mělo docházet k bezproblémové stavbě a nemělo by docházet k odtržení dílu od platformy.

3.3 Příprava modelu k tisku a tisk

Aby bylo možné 3D model vytvořený v jakémkoliv CAD systému zpracovat na tisk, je třeba jej exportovat do vhodného formátu. Ať už pro SLM, nebo jinou formu 3D tisku, je nejvhodnějším datovým formátem formát STL.

3.3.2 Příprava modelu na tisk

Model převedený do formátu STL lze načíst v programu SLM AutoFab.

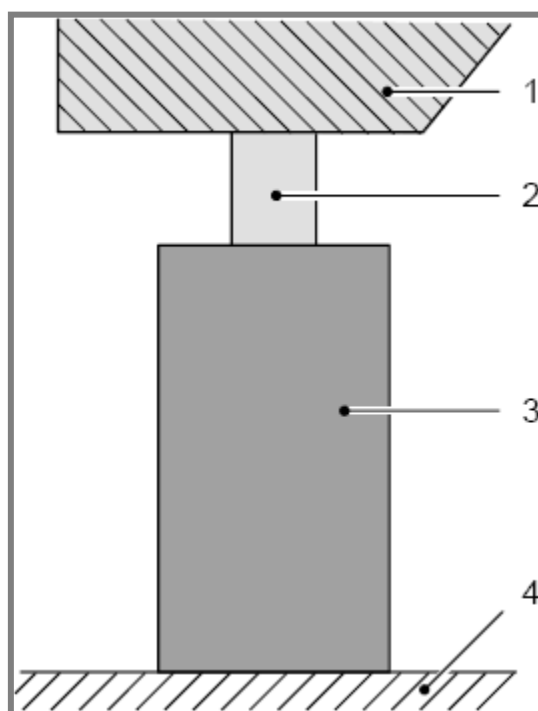


Obr. 3.4 Popis pracovního prostředí systému AutoFab

Prostředí programu je rozděleno na několik pracovních částí. Hlavní a největší částí okna se nachází pohled na model (1), v horní části okna je klasické menu (2), pod kterým se nachází panel nástrojů pro rychlý přístup (3). Pracovní menu (4), které se nachází v pravé části programu, slouží k výběru jednotlivých operací, nutných pro přípravu tisku. Po zvolení požadované akce se změní funkční menu (5), kde je možné vybrat konkrétní úpravu. V levé horní části se nachází panel nástrojů pro pohled na model (6). Obsahuje standardní pohledy, ale také možnost volného otáčení, či pohybu pohledu. Volné otáčení a pohyb pohledu je možné realizovat také pomocí tlačítek myši. Další panel nástrojů, který se nachází v levé dolní části (7) je určen k editaci polohy modelu. V dolní části okna se pak nachází posuvník (8), kterým lze přecházet mezi jednotlivými 2D řezy modelu. Poslední částí pracovního okna je stavový řádek programu (9).

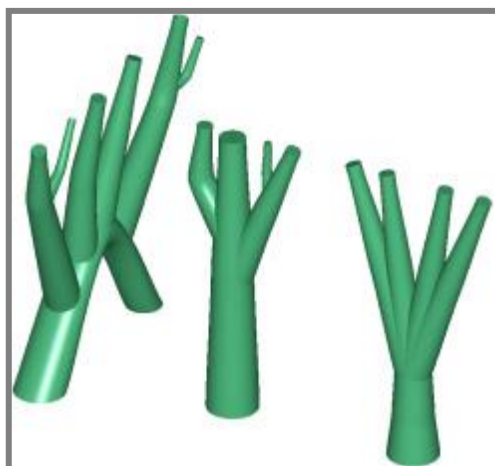
Nejprve je nutno vybrat v panelu pro rychlý přístup (3) typ stroje a použitý materiál. Po exportu STL dat do programu je nejprve nutno zkontrolovat, jestli je celý model uzavřený a při převodu na něm nevznikly nějaké chyby. Toto vyhodnocení, stejně

jako případnou opravu je možné provést přímo v programu. Pokud jsou data pořádku, je možné provést operace nutné k přípravě modelu na tisk. Nejprve je nutné určit pozici dílu na platformě. V programu je díl, podle základního nastavení, umístěn v rovině XY do středu platformy. Ve směru osy Z, je díl umístěn 4 mm nad platformu. Pozici, stejně jako natočení dílu vůči platformě je možné zadat dvěma způsoby. Manuálně, nebo pomocí přesně zadaných přírůstků. Pozice a vzdálenost dílu od platformy nemusí být taková, jak je defaultně nastaveno v programu. Díl může být umístěn a vzdálen od platformy podle uvážení uživatele. Díl může být umístěn přímo na platformu stroje, což sice zajišťuje nejlepší odvod tepla, ale také přináší více práce při odstraňování dílu z platformy. Pokud není model umístěn přímo na platformu, je nutné ho k ní připojit pomocí podpůrných struktur.

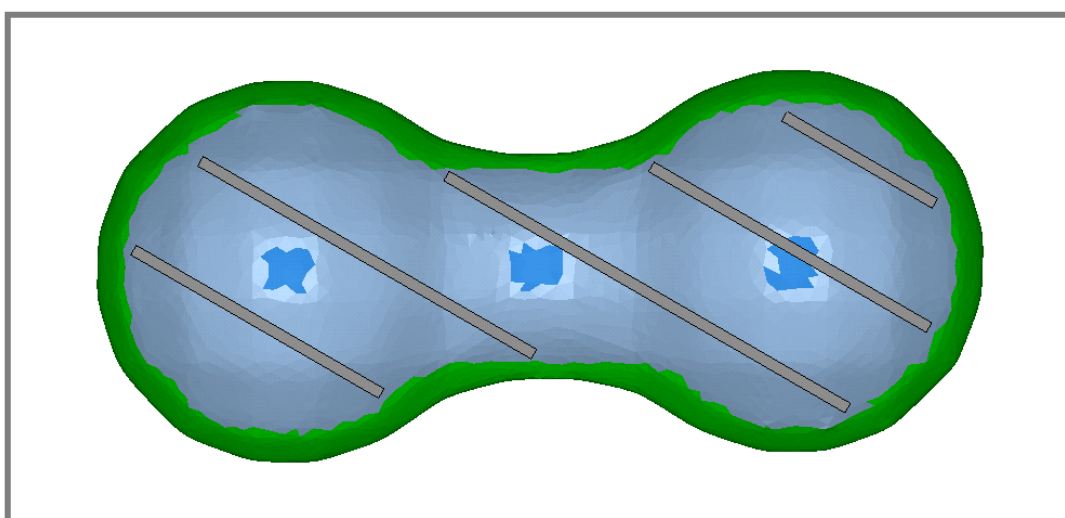


Obr. 3.5 Spojení modelu s platformou stroje

Model (1) je podporou (3) spojen s platformou (4). Podpora může, ale nemusí, být u modelu i u platformy zeslabena (2) aby došlo k lepšímu a snadnějšímu odlomení podpory. To sebou může nést také negativní vliv. Může dojít k odtržení stavěného modelu od podpor a tak k přerušení celého tisku a tím pádem ke tvorbě zmetku. Podpory mohou být generovány formou pole, nebo manuálně uživatelem. Podle potřeby použití mohou být podpory umísťovány ve třech typech. Bodové, úsečkové nebo speciální stromové. Stromové podpory jsou velmi složité, dochází u nich k vysoké úspoře materiálu proti úsečkovým podporám, ale opět je zde riziko odlomení modelu od podpor a tím zničením celého tisku.



Obr. 3.6 Stromové porpory



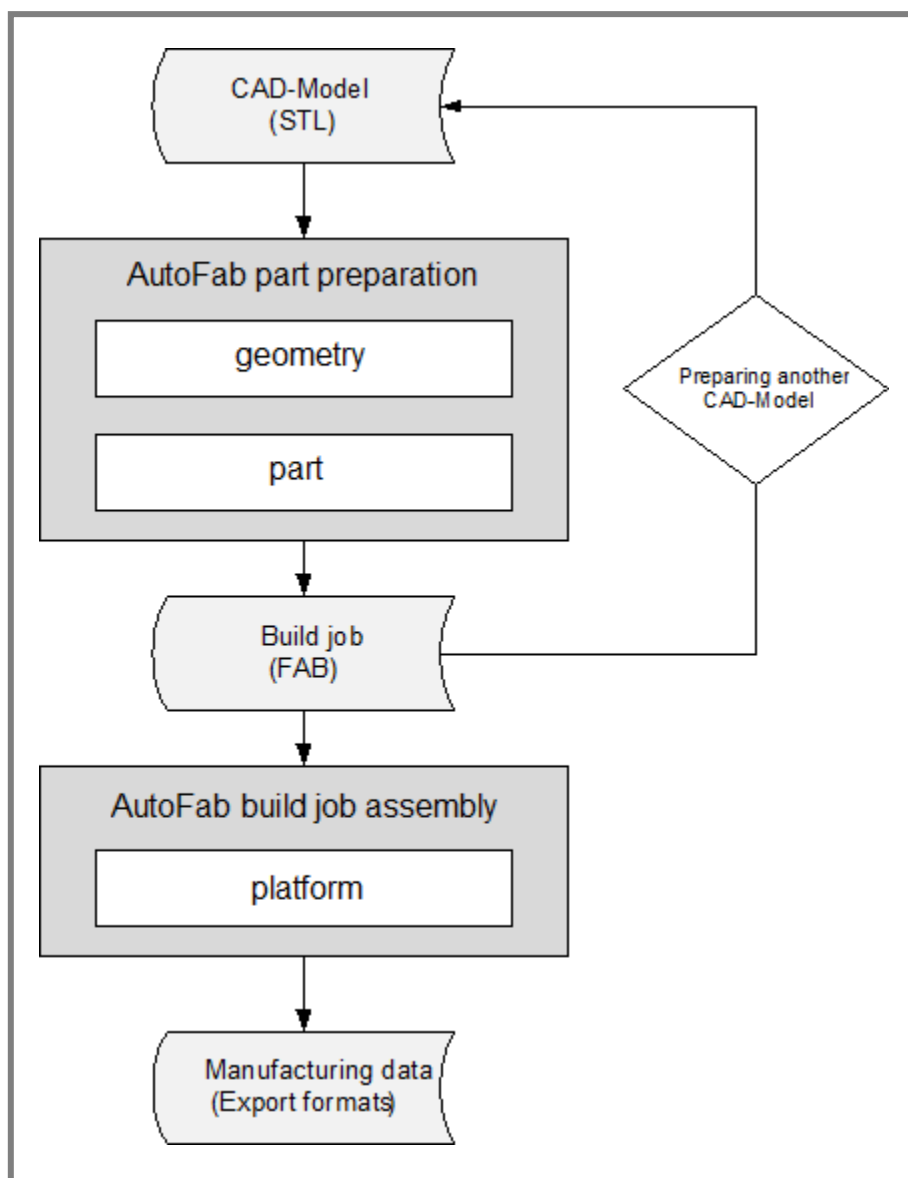
Obr. 3.7 Úsečkové podpory na modelu

Program umožňuje barevně zvýraznit plochy do určitého úhlu. Takto lze jednoduše zjistit, která plocha modelu potřebuje přidavek podpůrného materiálu a plochu, kterou není nutno podepírat. Podpory by měly být generovány pro plochy se sklonem platformě do 45° .

Po umístění všech podpor je možné přejít ke generování 2D řezů a drah laseru v těchto řezech. Před samotným generováním řezů je nutné zkontrolovat, případně nastavit, tloušťku jednotlivých vrstev. Tloušťka vrstev se odvíjí především od zrnitosti použitého prášku. Po vygenerování 2D řezů je možné procházet jednotlivé vrstvy a provést kontrolu, jestli jsou správně vygenerovány všechny prvky, které se v dané rovině řezu mají nacházet. K tomuto slouží posuvník (8) ve spodní části obrazovky.

Pokud je vše v pořádku, je možné umístit model na platformu. Umístit zde můžeme jeden díl samostatně, několikrát, případně můžeme na platformu umístit různé díly, které byly předem připraveny. Program vypočte orientační čas pro celou stavbu. Čas se odvíjí od velikosti součástí, plochy materiálu v jednotlivých řezech a rychlosti laseru.

Jakmile jsou všechna data ke stavbě modelu připravena a zkontrolována, je možné vyexportovat soubor s daty čitelnými strojem. Tento soubor je následně nahrán do stroje a je možné spustit stavbu modelu. [14]



Obr. 3.8 Proces přípravy dat k tisku

3.3.3 Příprava stroje na tisk

Proces tisku vyžaduje pro každou stavbu vysokou čistotu. Je důležité, aby byla plocha na, kterou se umísťuje platforma, čistá. Platforma je upevněna čtyřmi šrouby, po jednom v každém rohu. Jakmile je platforma na svém místě, je možné do stroje zabudovat zásobník prášku. Ze spodní strany tohoto zásobníku se nachází gumový břit, který slouží k distribuci prášku a urovnávání jeho vrstev na platformě. Je velmi důležité, aby tento břit nebyl mechanicky poškozen. Pokud by se na tomto břitu vyskytovaly nějaké vrypy, docházelo by k nerovnoměrné distribuci prášku. Jak již bylo zmíněno, je velmi důležitá celková čistota v komoře stroje. Proto je nutné po ustavení všech komponent stroje na svá místa důkladně vyčistit skleněný kryt laseru. Následně je možné spustit odsávání vzduchu a začít komoru předehřívat a napouštět

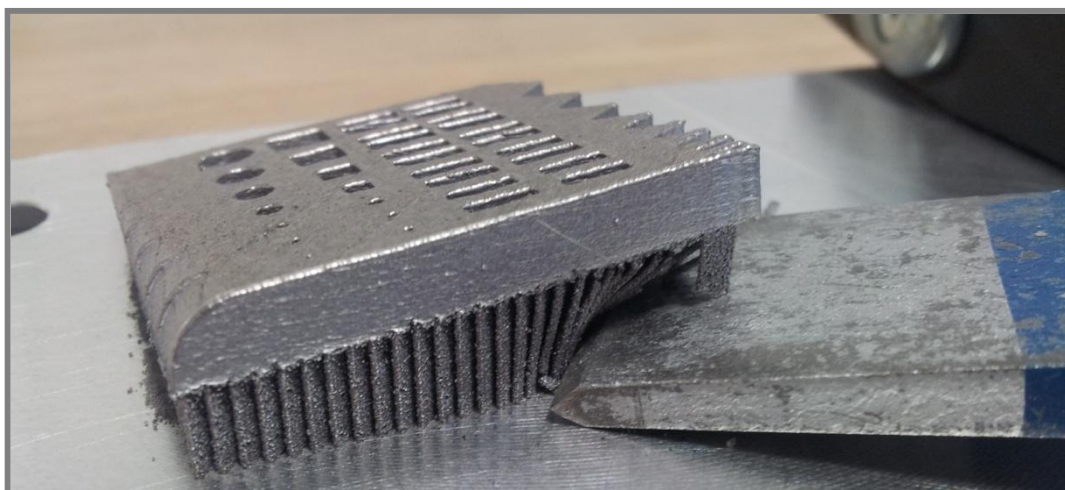
argonem. Jakmile je obsah kyslíku v komoře nižší než 0,2%, je možné začít se samotnou stavbou dílu. [15]

3.3.4 Vyjmutí dílu z komory stroje

Po dokončení tisku je nutné vyjmutí dílu z prostoru stroje. Prášek, který obklopuje hotový díl, je nutno z jeho okolí odstranit. K tomu slouží odpadní kanály v přední a zadní části komory. Vzhledem k tomu, že částice prášku jsou velmi jemné a dochází k jejich víření do okolí, je nutné použít ochranné pomůcky. Při odstraňování prášku je tedy nutné použít odsávání, aby bylo eliminováno rozšíření rozvířeného prášku. Důležitým faktorem při ochraně zdraví je použití respirační masky s velmi jemným filtrem.

Postavený díl je pevně spojen s platformou stroje. Před dalším zpracováním dílu je tedy nutné vyjmutí platformy z komory stroje. Vzhledem k vysoké teplotě v komoře v průběhu stavby dílu, je vhodné nechat platformu zchladnout, aby nedošlo k poranění.

Po vyjmutí z komory stroje je možné oddělit díl od platformy. K tomuto účelu lze použít ruční nástroje, sekáč a kladivo, nebo díl odstranit odřezáním od platformy. Jak při řezání, tak i při odsekávání je třeba dbát vysoké opatrnosti. Platforma je určena k opakovanému použití a jakékoli její mechanické poškození může zhoršit kvalitu následujícího tisku.



Obr. 3.9 Oddělení dílu od platformy stroje

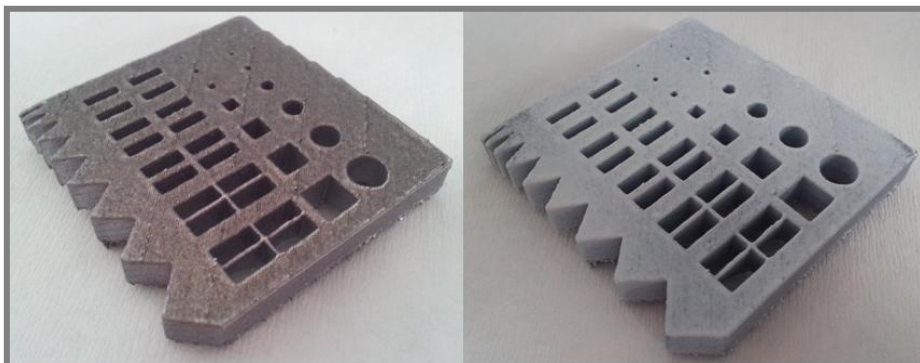
3.4 Převod dílu na 3D data

K převodu dílu zpět na digitální data bylo využito systému ATOS III Triple Scan. Tento systém používá speciální měřicí a projekční technologii vyvinutou společností GOM. Tato technologie poskytuje skeneru přesnější a kvalitnější snímání lesklých ploch a složitých součástí s hlubokými dírami, jemnými hranami nebo složitými detaily. Hmotnost a velikost měřeného objektu je téměř neomezená. [16]

3.4.1 Příprava dílu

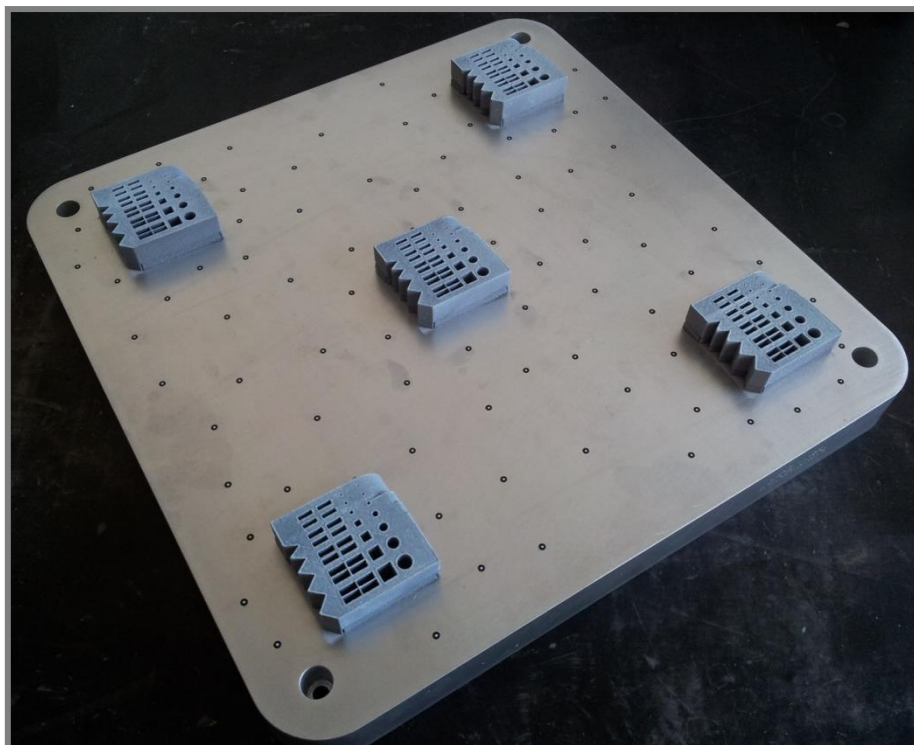
Vytištěný díl bylo před skenováním nutno připravit tak, aby bylo možné naskenovat jeho povrch co možná nejlépe a v co nejkratším čase. Z tohoto důvodu bylo nutné zkušební díl, který má relativně drsný povrch ošetřit tak aby jeho skenování probíhalo bez problémů a data z plochy byla získána jedním skenem. Povrch

testovacího dílu byl proto nastříkán roztokem, tvořeným titanovým práškem a denaturovaným lihem. Před samotným nástřikem bylo nutné rozmíchat titanový prášek v lihu. K tomu byla využita ultrazvuková čistička. Po asi 5 – 10 minutách bylo možné provést nástřik pomocí stříkací pistole. Jak stříkací pistole, tak i prášek byly součástí příslušenství systému ATOS.



Obr. 3.10 Testovací díl před a po nástřiku titanem

Většina dílů byla skenována ve speciálním rámečku určeném přímo ke skenování malých objektů. Jedna testovací série byla ale naskenována přímo na platformě stroje. Aby bylo možné provést správný výpočet pozic naskenovaných bodů modelu, je třeba použít referenční body. Skenovací rámeček již tyto body obsahuje. Proto muselo dojít k nanesení referenčních bodů přímo na platformu, na které byly stavěné díly, obrázek 3.11. Pokud by byly referenční body umístěny na povrch skenovaných dílů, došlo by ke ztrátě dat právě pod těmito referenčními body.

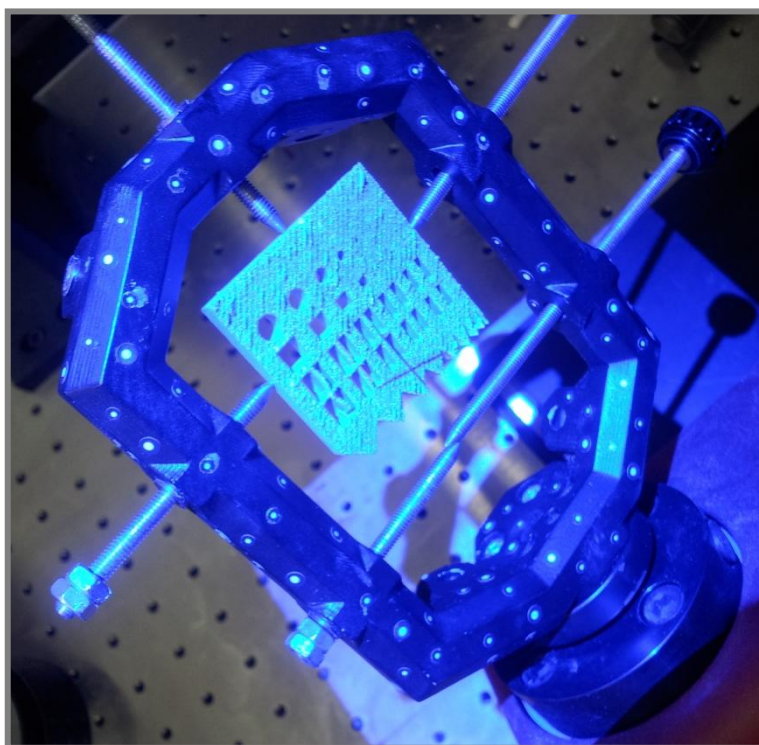


Obr. 3.11 Platforma s referenčními body ke skenování

3.4.2 Proces skenování

Skenovaný objekt, testovací součást, byla umístěna do rámečku pro skenování. Součástí rámečku jsou referenční body, které slouží k výpočtu polohy objektu. Rámeček, případně platforma, byl umístěn na rotační stůl, který tvoří tmavé pozadí a umožňuje snadný pohyb se skenovaným objektem.

Vzhledem k rozměrům skenovaných dílů, byla použita optická soustava s označením SO 170. Tato optická soustava je schopna snímat prostor o objemu 170 x 130 x 130 mm. Minimální vzdálenost dvou bodů, kterou je skener schopen zachytit je 0,055 mm. V kombinaci s touto optickou soustavou jsou doporučeny referenční body o průměru 0,8 mm. Skenovací rámeček je připraven pro skenování malých objektů optickými soustavami, u kterých je doporučen tento průměr referenčních bodů. Proto je těmito body označen. [17]

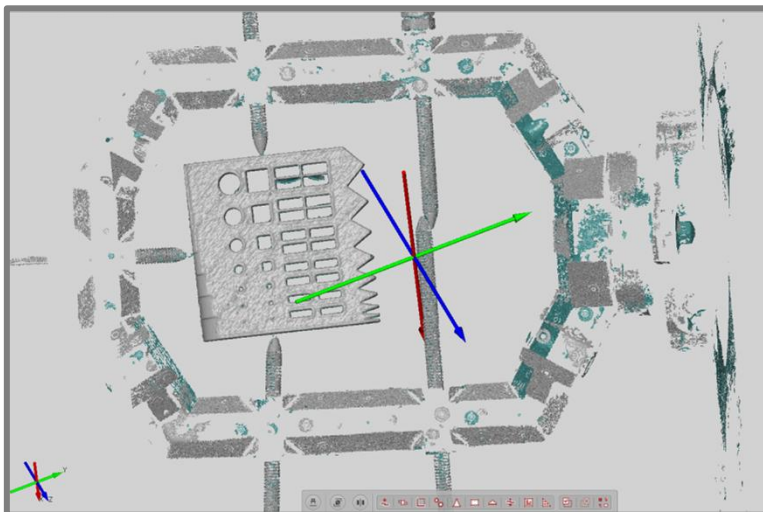


Obr. 3.12 Skenování dílu ve skenovacím přípravku

3.5 Vyhodnocení 3D dat

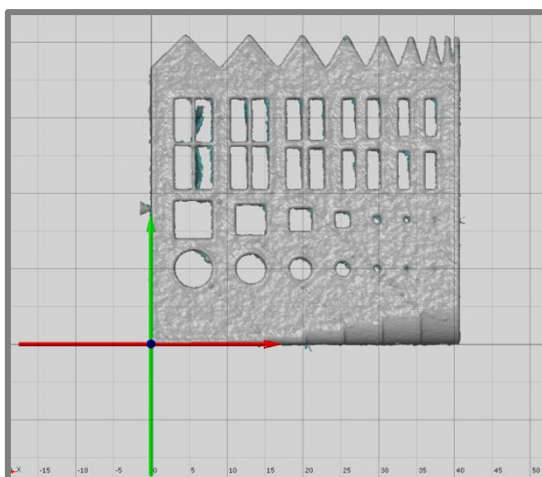
3.5.1 Rozměry

K vyhodnocení dat bylo použito softwaru GOM Inspect. Jedná se o volně dostupnou verzi programu GOM Inspect Professional. Tato verze neobsahuje některé možnosti verze Professional, ale veškeré základní operace jsou zde dostupné a plně funkční. Do programu jsou načítána data získaná systémem ATOS III Triple Scan, která byla převedena na polygonální síť. [18]



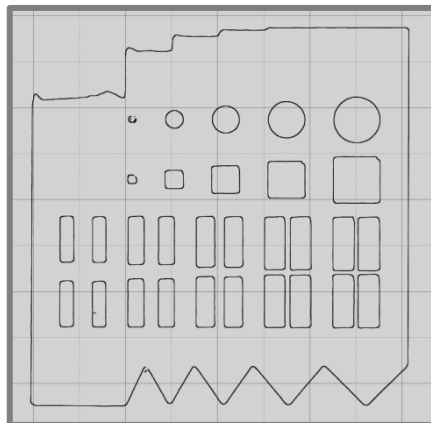
Obr. 3.13 Naskenovaná data

Při skenování dílu nedojde pouze k naskenování požadovaných ploch, ale na skenu se vyskytují také okolní plochy. Z důvodu minimalizace dat je vhodné nepotřebné plochy odstranit. Práce s modelem je pak rychlejší a přehlednější. Po vyčištění 3D dat od nepotřebných ploch bylo nutné provést zarovnání modelu. Při skenování je do modelu umístěn souřadný systém, ale pro následné zpracování je nutná jeho změna.



Obr. 3.14 Díl s ustaveným souřadným systémem

Zarovnání modelu je ideální provést tak, aby osy souřadného systému modelu odpovídaly osám stroje při stavbě dílu. Jakmile dojde k ustavení modelu, je možné provést měření požadovaných rozměrů. Vzhledem k tomu, že nasekovaná data nebyla ve většině případů zcela kompletní, byla většina měření provedena v řezech.



Obr. 3.15 Řez určený k měření rozměrů

Řez, na kterém bylo měřeno největší množství rozměrů, byl umístěn 0,5 mm pod rovinu proloženou horní plochou modelu. V této rovině bylo možno identifikovat veškerou nasekovanou geometrii. Větší geometrické prvky bylo možné analyzovat i v dalších řezech, které byly vzdálenější od horní roviny. U malých otvorů to možné nebylo, protože při skenování nedošlo k dostatečnému převodu celé geometrie, právě z důvodu malého rozměru. Aby bylo možné měřit danou geometrii, je nutné určit geometrii, případně referenční body, mezi kterými bude daný rozměr zjišťován. U válcových děr, v řezu kružnice, byl jako referenční geometrie použit kruh. Po zvolení kruhového elementu došlo systémem k automatickému dopočítání celé geometrie a konstrukci odpovídajícího kruhu. Pro měření ostatních geometrických prvků, čtvercových děr, tenkých stěn a celkových rozměrů zkušebních dílů bylo použito měření vzdálenosti mezi dvěma body. Tyto body ležely na protilehlých stěnách měřené geometrie. Vzdálenost mezi danými body nebyla měřena absolutně, především z důvodu toho, že body nikdy neležely na přímce rovnoběžné s osou měřeného směru. Vzdálenost mezi body byla tedy měřena v směru X a směru Y, právě proto bylo nutné provést ustavení souřadného systému co nejpřesněji. Každý geometrický prvek byl několikrát změřen a následně byla vypočtena střední hodnota. Tyto hodnoty byly následně porovnávány s původně navrženými rozměry zkušebního modelu.

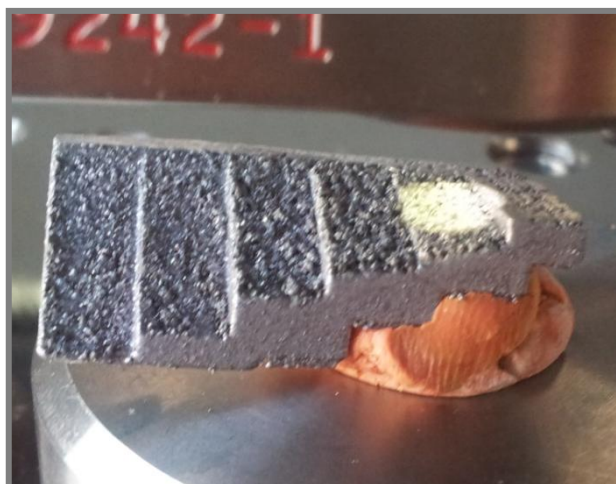
3.5.2 Měření drsnosti povrchu

Pro zjištění drsnosti povrchu postavených dílů bylo použito zařízení společnosti Bruker. Jednalo se o 3D optický profilometr ContourGT-X8. Zařízení poskytuje bezkontaktní 3D měření povrchu. Díky možnosti zvětšení 0,5x – 200x umožňuje získat drsnost povrchu širokého spektra tvarů a textur povrchů. Vertikální rozsah stroje je od méně než angstromu po milimetry. [19]



Obr. 3.16 Optický profilometr Bruker ContourGT-X8 [20]

Drsnost povrchu byla měřena na každé ploše dílu ve dvou místech. Vždy v místě blíže platformě, označeno jako B – Bottom, a v místě vzdálenějším od platformy stroje, T – Top. Pro každou plochu byla měřena plocha o rozměrech 2,169 x 1,626 mm a to za použití objektivu s pětinasobným zvětšením a předsádkou s 0,55x zvětšením.



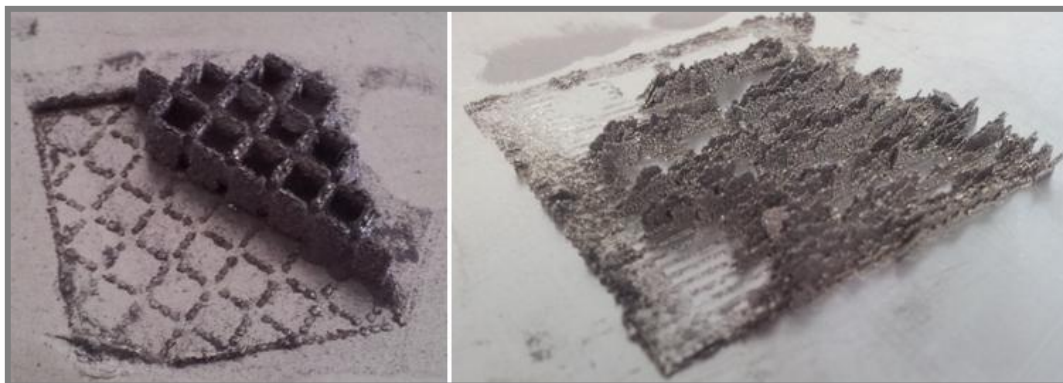
Obr. 3.17 Proces měření drsnosti povrchu

4 VÝSLEDKY

4

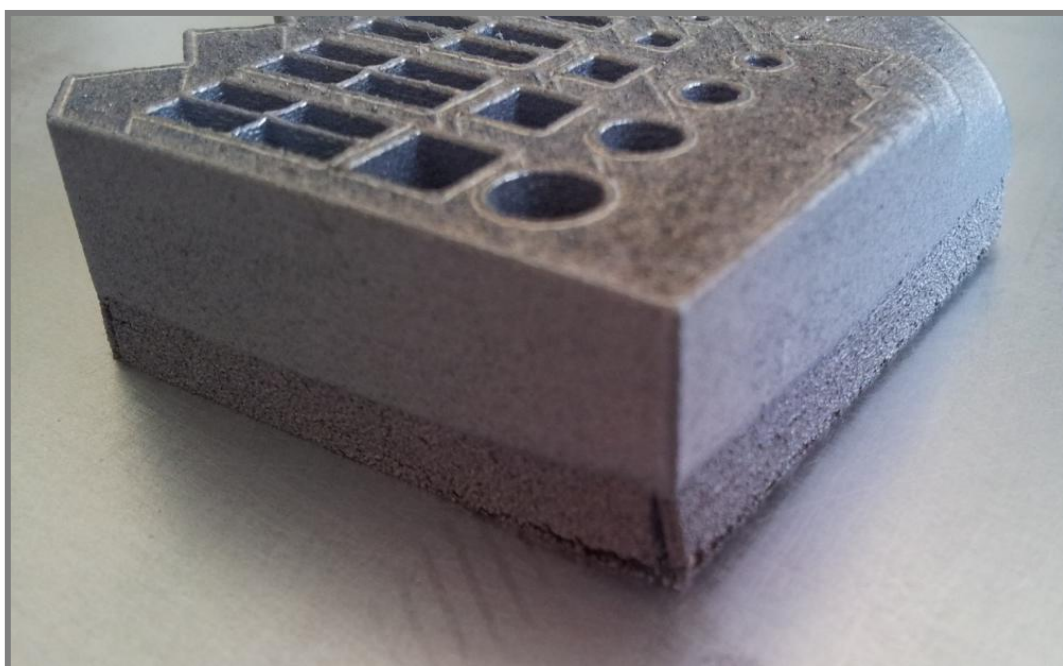
4.1 Geometrie podpůrného materiálu

Při stavbě dílů bylo vyzkoušeno několik typů podpor, sloužících ke spojení stavěného dílu s platformou. Tyto podpůrné struktury významně ovlivňují přesnost stavby dílu.



Obr. 4.1 Příklady použitých podpůrných struktur

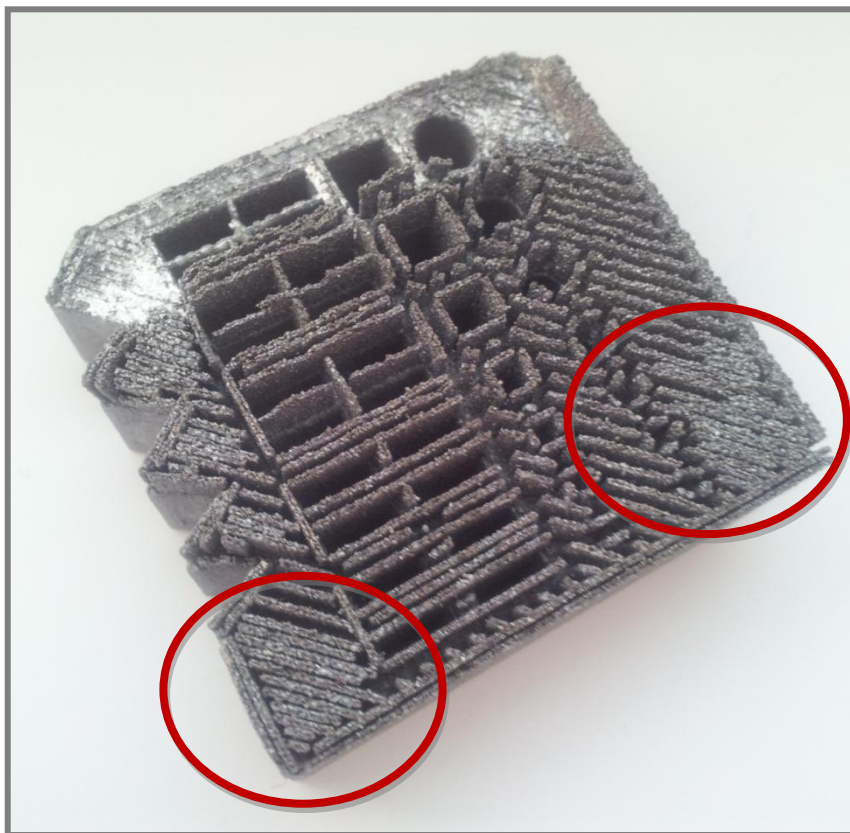
U dílů, které obsahují ostré hrany, docházelo k odtržení v místech rohů těchto hran. Toto vedlo k nadzvednutí stavěné součásti, které mohlo vést k poškození gumového bříty zásobníku s práškem, v nejhorším případě až k zastavení celé stavby.



Obr. 4.2 Održená podpůrná struktura

Jako nejoptimálnější podpory se osvědčily podpůrné struktury ve tvaru úsečky o síle 0,3 mm, mezi nimiž je vzdálenost 1 mm. Pro díly, které obsahovaly ostré hrany, se osvědčilo vyztužení těchto struktur v kritických místech, obrázek 4.3. Stavba takto upevněných dílů probíhala bez problémů a díly byly k platformě přichyceny pevně

a přitom bylo jejich oddělení od platformy po dokončení stavby relativně jednoduché.

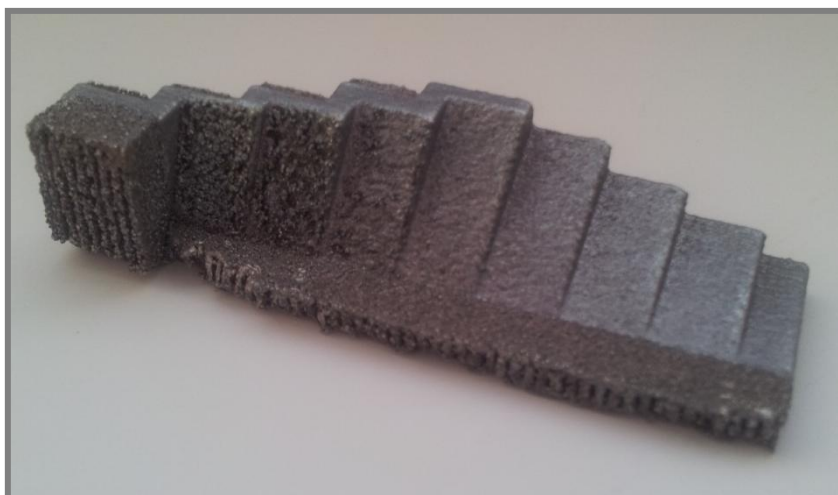


Obr. 4.3 Zesílené podpůrné struktury

Pokud je požadována vysoká jistota toho, že se díl neodtrhne od platformy, je možné na stavěný díl přidat geometrii, kterou bude díl spojen přímo s platformou. Takovou geometrii je vhodné umístit například po obvodu stavěného dílu a zbylý prostor vyplnit standardním podpůrným materiálem.

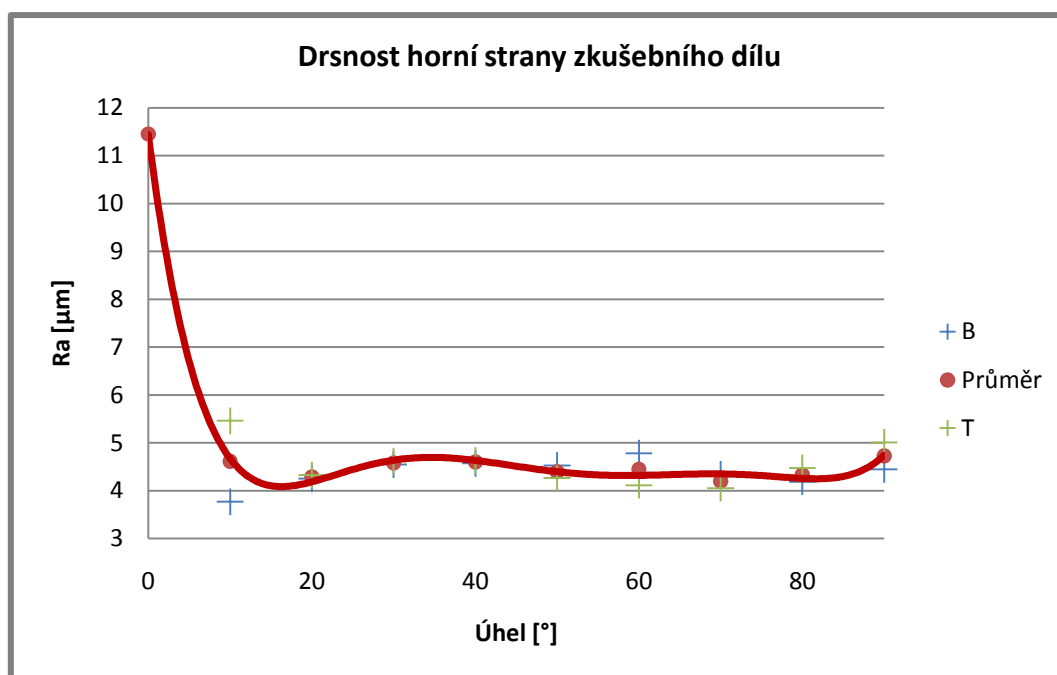
4.2 Drsnost povrchu

Jedním z prvních měření, které proběhlo, bylo měření drsnosti povrchu postavených dílů. Díly nebyly nijak povrchově upravovány nebo modifikovány. Pouze došlo k jejich odstranění z platformy, aby bylo možné získat drsnost jak z horní, tak i ze spodní strany, obrázek 4.4.



Obr. 4.4 Výsledek stavby – díl pro měření drsnosti povrchu

U drsnosti povrchu z horní strany (blíže povrchu prášku) bylo zjištěno, že drsnost povrchu se nijak zásadně nemění, obrázek 4.5. Největší odchylky od ostatních hodnot vykazuje plocha, jejíž normála je rovnoběžná s normálou platformy. Střední aritmetická úchylka R_a této plochy byla naměřena jako $11,452 \mu\text{m}$. Což je více než dvojnásobná hodnota, jaká byla zjištěna u ostatních ploch. Zde se střední aritmetická úchylka R_a pohybovala v rozmezí $4,196 - 4,726 \mu\text{m}$. Vyšší drsnost povrchu horní plochy je způsobena především tím, že na této ploše lze pozorovat jednotlivé dráhy laseru.

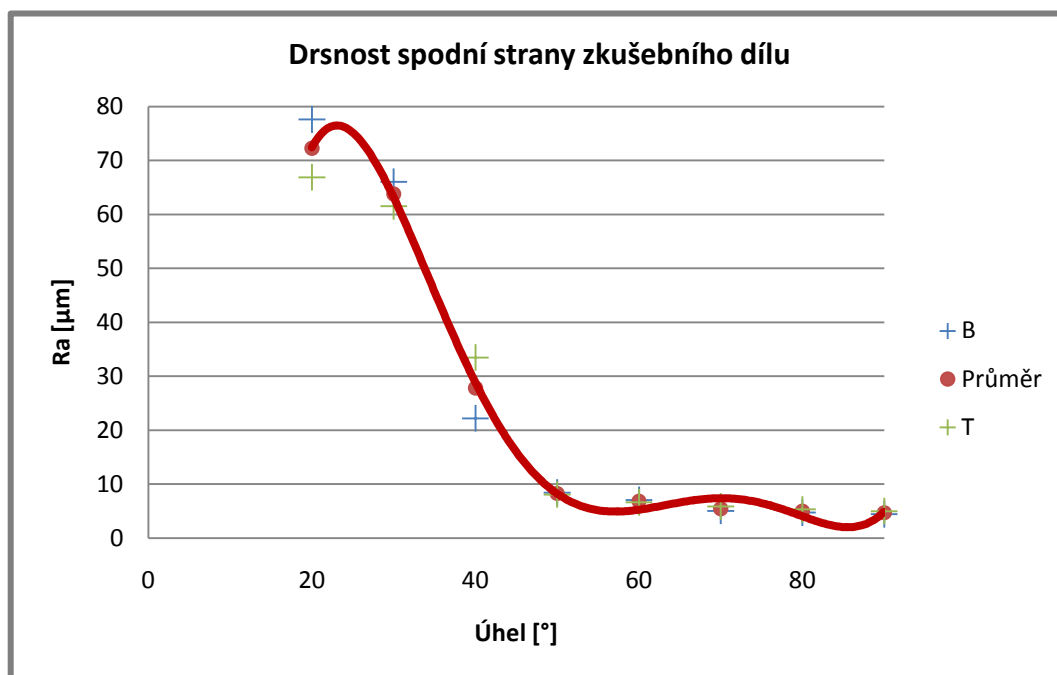


Obr. 4.5 Drsnost povrchu horní strany zkušebního dílu

Drsnost spodní plochy (blíže k platformě) nebyla proměřena v plném úhlovém spektru. Hlavním důvodem byla nutnost spojit stavěný díl s platformou, takže plocha umístěná vodorovně k platformě byla osazena podporami. Pokud by tedy došlo k měření drsnosti této plochy, byly by data zkreslená. Podpory se pouhým

odlámáním nepodaří zcela odstranit a jejich zbytky by významně ovlivnily celkovou drsnost povrchu. U plochy, která svírá s platformou úhel 10° nebyla měřena z důvodu velmi vysoké drsnosti. Tyto dvě plochy tedy v celkovém přehledu drsností chybí. Ostatní plochy již ale byly naměřeny. Výsledky drsností posuzovaných podle středních aritmetických úchylek jsou uvedeny na obrázku 4.6. Jak je vidět, hodnota střední aritmetické úchylky R_a se snižuje až do plochy, která svírá s platformou úhel 50° . Poté se hodnoty ustálí na hodnotách, téměř srovnatelných s těmi, které byly zjištěny u ploch na horní straně testovacího dílu. Zlomová hodnoty střední aritmetické úchylky, hodnota pro plochu svírající úhel 50° je $8,277 \mu\text{m}$. Následující hodnoty jsou v rozmezí $6,862 - 4,726 \mu\text{m}$.

Z měření drsnosti povrchu vyplívá, že plochy, které svírají s platformou úhel menší než 45° je zcela jistě vhodné položit na podpůrný materiál. Pokud by tyto plochy, plochy svírající s platformou úhel 45° stupňů a menší nebyly stavěny na podporách a byla jejich součástí ještě nějaká další geometrie, například vyústění díry, došlo by určitě k deformaci tohoto geometrického tvaru. Chyba ve stavbě by mohla vést až k nárazu do gumového bříty, který urovnává prášek na platformě a tím k jeho poškození, případně přerušení celého tisku.



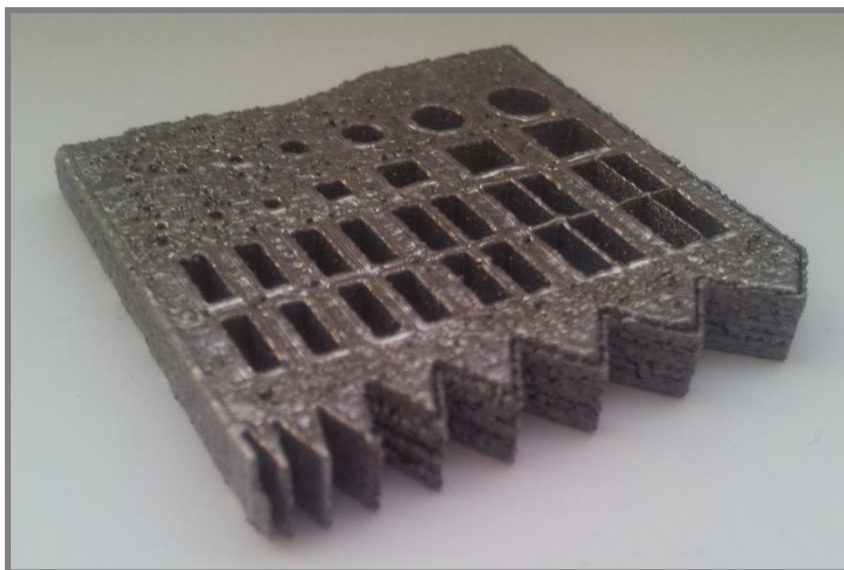
Obr. 4.6 Drsnost povrchu dolní strany zkušebního dílu

4.3 Geometrická přesnost výroby

Pro zjištění geometrické přesnosti výroby bylo provedeno několik testovacích sérií. Díly postavené při těchto sériích byly porovnávány v rámci dané testovací série. Díly stavěné ve stejných pozicích na platformě byly samostatně porovnávány mezi sebou k vyhodnocení vlivu nastavení stavby.

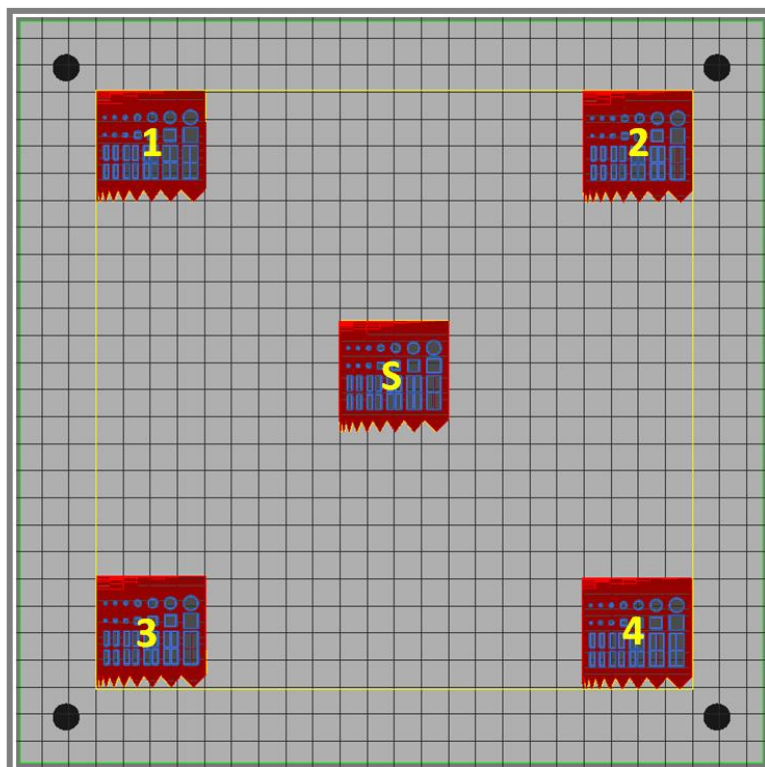
4.3.1 Výchozí testovací série

V prvním tisku, který vycházel z původního nastavení stroje a parametrů pro daný materiál, bylo vytištěno pět zkušebních vzorků.



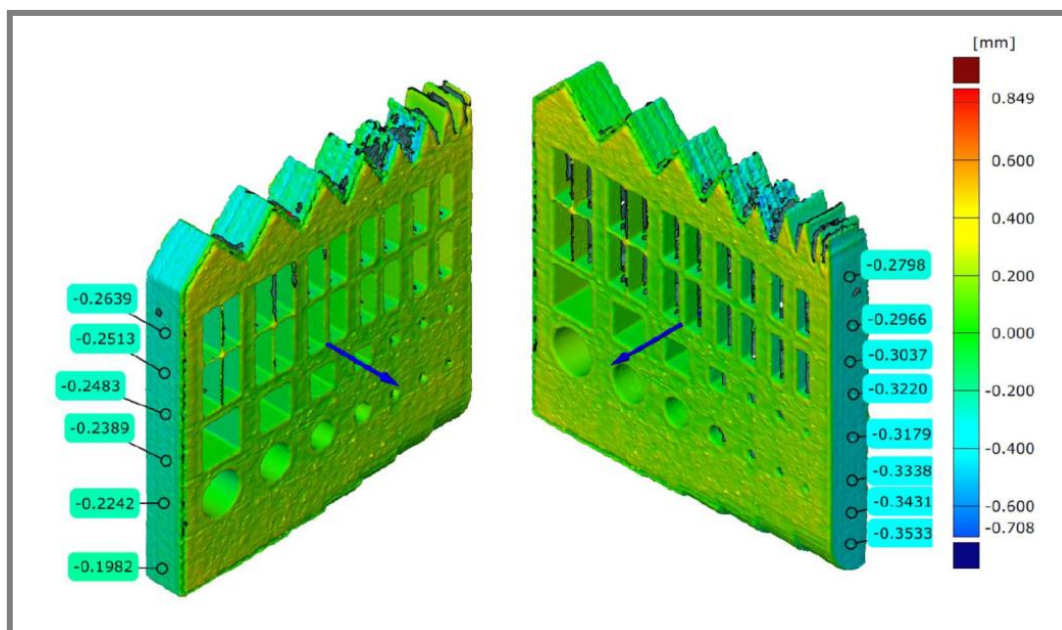
Obr. 4.7 Výsledek stavby – díl pro kontrolu rozměrů

Vzorky byly umístěny na platformě do rohů a do středu, obrázek 4.8. Díky tomu bylo možno ověřit nejen geometrickou přesnost stavby dílů, ale také vliv umístění dílu na platformě na jeho přesnost. Díly byly označeny podle pozice na platformě. Rohové díly byly označeny čísly 1 – 4, středový díl písmenem S. Již na první pohled byla u všech dílů patrná výrazná kontura okolo každé geometrie, obr. 4.7. Další výraznou viditelnou nepřesností stavby byla schodovitou bočních stěn dílu. Vždy po několika nanesených vrstvách prášku došlo k mírnému odskočení okraje dílu jiným směrem. Na první pohled to byly jediné dva defekty, ke kterým v průběhu stavby došlo.



Obr. 4.8 Rozložení testovacích dílů na platformě

Po změření rozměrů z dat, naskenovaných ze zkušebního vzorku, byly nejprve porovnávány základní rozměry jednotlivých dílů. Rozměry v osách X a Y. U těchto rozměrů byly zjištěny velmi vysoké odchylky od původně navržených hodnot. Základní rozměry všech dílů byly v obou směrech menší než navrhované hodnoty, v některých případech byl rozdíl téměř 1,5 mm. Největších odchylek od původně navrhované hodnoty dosáhl zkušební díl číslo 1, který byl ve směru X menší o 1,015 mm a ve směru Y o 1,160 mm. Naopak nejpřesněji postavený díl nebylo možné jednoznačně určit. Ve směru osy X byl nejpřesněji postaven díl číslo 4, jehož odchylka od navrhované hodnoty byla v tomto směru pouze -0,113 mm. Ve směru osy Y byl nejpřesněji postaven díl číslo 3 s odchylkou -0,483 mm. Vzhledem k udávané přesnosti stoje, která by měla být $\pm 0,2$ mm, jsou téměř všechny tyto odchylky mimo danou toleranci. Pro kontrolu odchylek na dílu byla naseknovaná 3D data srovnána s původními STL daty. Aby nedocházelo k chybnému vyhodnocení odchylek 3D dat a STL sítě, bylo použito automatické ustavení dílů. Systém automaticky vypočítal polohu dílů tak, aby bylo co nejvíce geometrií společných, případně stejně orientovaných. Výsledné odchylky jsou znázorněny na dílu stavěném ve středu platformy, obrázek 4.9.



Obr. 4.9 Grafické znázornění odchylek na testovacím dílu

U vnitřních geometrických prvků již nebyly odchylky tak výrazné. Tenké stěny byly postaveny ve směru osy X nejpřesněji postaveny na dílu číslo 2. Průměrná odchylka tloušťek stěn byla $-0,0389$ mm s tím, že všechny stěny, až na stěnu o tloušťce $0,5$ mm, byly menší, než bylo navrženo. Nejhorší přesnost byla zjištěna u dílu číslo 4, kde byly naopak všechny stěny postaveny menší než, bylo navrženo. Průměrná odchylka měla hodnotu $-0,0711$ mm. Ve směru osy Y byla stavba tenkých stěn provedena nejpřesněji u dílu číslo 1. Tenké stěny tohoto dílu byly postaveny s průměrnou odchylkou $-0,0409$ mm. U tohoto dílu byly postaveny tenké stěny s tloušťkou $0,25$ mm a $0,5$ mm větší než bylo navrženo, další tři tenké stěny, s tloušťkami $1 - 2$ mm, byly postaveny o něco menší, než bylo původně navrženo. Největší průměrná odchylka, $-0,0496$ mm, byla zaznamenána u dílu číslo 2.

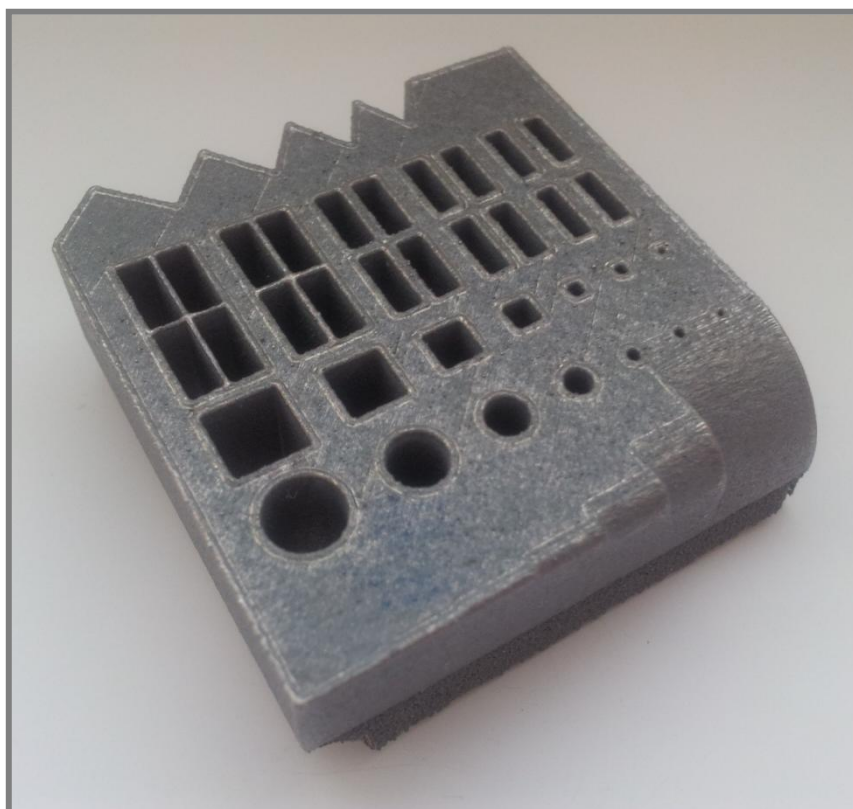
Čtvercové díry, jak je vidět na obrázku 4.11, byly postaveny všechny. Z důvodu velmi malého rozměru díry o straně $0,5$ mm, u středového dílu také u díry o straně $0,75$ mm, se při skenování nepodařilo získat dostatečné množství dat. Proto nebylo možné tyto díry změřit. Stavba těchto děr byla provedena pro směr osy X nejpřesněji provedena pro díl číslo 3, kdy byla průměrná odchylka pouze $-0,0005$ mm. Naopak nejmenší přesnost stavby byla zjištěna u dílu číslo 4. Zde činila průměrná odchylka $0,0651$ mm. Ve směru osy Y byla stavba čtvercových děr provedena nejpřesněji u dílu číslo 1. Průměrná odchylka stavby byla $-0,0016$ mm. Menší díry, do délky hrany 2 mm, byly postaveny o něco větší, zbylé díry byly postaveny menší. Nejhorší přesnost stavby, průměrná odchylka $0,0624$ mm, v tomto směru byla zaznamenána u dílu číslo 4. Všechny postavené díry byly na tomto díle větší, než bylo navrženo.

Válcové díry byly měřeny celkově. Měřil se pouze průměr, aniž by byl rozlišován směr v rovině XY. Podobně jako u čtvercových děr byly postaveny všechny navržené průměry, ale díru o průměru $0,5$ mm se opět nepovedlo převést na 3D data. Nejpřesnějších výsledků bylo dosaženo na díle číslo 2, všechny válce byly postaveny s menším průměrem, v průměru o $-0,0184$, naopak nejméně přesná byla stavba děr na díle číslo 1. Zde byly všechny díry také postaveny s menším průměrem, než bylo požadováno, v průměru o $-0,0686$ mm.

Z vyhodnocení prvního zkušební tisku nebylo možné přesně definovat, který z dílů je postaven nejlépe. U vnitřních geometrických prvků jsou odchylky velmi malé a všechny bez výjimky splňují deklarovanou přesnost $\pm 0,2$ mm. Podle základních rozměrů stavěných dílů je jasné patrné, že přesnost stavby není ve všech místech platformy stejná. Teoreticky by mělo být možné určit místo na platformě, kde by měl být tisk těchto rozměrů nejpřesnější. Toto místo teoreticky vychází do pravého dolního rohu, nachází se zde díl číslo 4. Aby byla stavba teoreticky nejpřesnější, musel by být díl umístěn ještě víc doprava a dolů. To již ale není možné, protože stavba by probíhala zcela v rohu platformy, čímž by došlo k zablokování díry pro šroub, která slouží k uchycení platformy ve stroji. Zjištěné rozměry byly předány zástupcům firmy SLM Solutions GmbH. Zde došlo k přezkoumání nastavení stroje a nastavení vlastností tisku pro daný materiál. Zpětnou reakcí na tyto hodnoty bylo nové materiálové nastavení a také instalace kalibračního balíčku od stoje.

4.3.2 Kontrolní série

Po instalaci kalibračního balíčku bylo možné provést další tisk k porovnání parametrů stavby. Testovací série obsahovala stejný počet dílů umístěných ve stejných pozicích jako při první testovací sérii. Testovací díl byl ale na doporučení zástupců firmy upraven. Byla zdvojnásobena jeho výška a nejostřejší úhly byly odebrány. Pro potřeby lepšího měření rozměru ve směru osy Y byly tyto úhly nahrazeny rovnou plochou.



Obr. 4.10 Testovací díl kontrolní série

Tato testovací série byla skenována jako jeden celek. Před skenováním tedy nedošlo k odstranění dílů z platformy stroje. Povrch dílů působil na první pohled mnohem lépe. Stěny kolmé k platformě byly postaveny kompaktně bez výrazných známek

jednotlivých vrstev prášku. Na horní ploše dílu jsou patrné jednotlivé dráhy laseru a v některých místech dochází k jejich výraznému vystoupení z povrchu dílu. Kolem vnitřních geometrií a také okraje dílu je patrná kontura. Jedná se opět o viditelné dráhy laseru při stavbě dílu.

Prvním zkoumaným rozměrem byly celkové rozměry naskenovaných 3D dat. Ve směru osy X bylo dosaženo největší shody s původně navrženými daty u dílu stavěného uprostřed platformy. Rozměr tohoto dílu v daném směru byl naměřen jako 40,0579 mm, což proti navrhované hodnotě 40,25 mm činí odchylku -0,1921 mm. U středového dílu tedy bylo při stavbě v ose X dosaženo rozměru, který spadá do rozmezí deklarované nepřesnosti stroje. Nejmeně přesná byla naopak stavba dílů v levé části platformy. Naměřená hodnota odchylky zde činila -0,8378 mm, pro díl číslo 1, a -0,7661 mm pro díl číslo 3. Oba díly na levé straně platformy tedy byly postaveny menší, než bylo navrženo. V pravé části platformy došlo k opačnému jevu. Díly zde byly postaveny o něco větší, než bylo původně navrženo. Při stavbě ve směru osy Y došlo ke stavbě nejpresnějších dílu v horní části platformy, tj. dílů číslo 1 a 2. Tyto díly byly postaveny s odchylkou 0,0513 mm, pro díl 1, a 0,0413 mm pro díl 2. Nejmenší přesnosti bylo dosaženo u dílů 3 a 4 v dolní části platformy. Odchylka těchto dílů byla -0,3620 mm a -0,3120 mm. U středového dílu byla odchylka stavby ve směru osy Y naměřena jako -0,1042 mm. Středový díl byl tedy v testovací sérii postaven v toleranci a jednalo se tak o první nezmetkový díl. Teoreticky nejpresnější stavba by podle takto naměřených hodnot měla probíhat v pravém horním kvadrantu platformy. V kvadrantu, v jehož rozích se nachází středový díl a díl číslo 4. Vzhledem k velikosti bodu laseru působícího na prášek a změně parametrů materiálu při stavbě došlo při stavbě stěn o tloušťce 0,25 mm ke změně procesu. Laserem zde nebyla vykonána pouze jedna dráha, ale dráhy dvě. Proto byla u všech pěti zkušebních dílů tloušťka této stěny podstatně vyšší, než bylo navrhováno. Ve směru osy X se tloušťka těchto stěn pohybovala v rozmezí od 0,3983 mm do 0,4311 mm, ve směru osy Y pak bylo toto rozmezí od 0,3860 mm do 0,4623 mm. Tloušťka této stěny se v některých případech tedy nevešla do požadované tolerance. U ostatních tenkých stěn tento problém nenastal a jejich rozměr byl ve výrobní toleranci. Stavba tenkých stěn byla v ose X nejpresnější u dílu číslo 1, kde byla průměrná odchylka² 0,0337 mm. Nejmeně přesná stavba pak proběhla u dílu číslo 2, kde byla průměrná odchylka 0,0530 mm. Nejpresněji postavené tenké stěny ve směru osy Y byly na dílu číslo 3, jejichž průměrná odchylka činila 0,0327 mm. Naopak nejhůře byly postaveny tenké stěny na dílu číslo 1, u kterých dosahovala průměrná odchylka 0,0782 mm. Tloušťka všech stěn byla vyšší, než bylo původně navrženo. Pokud by tedy nebyla dosažená přesnost stavby dostatečná, bylo by možné následné opracování takovýchto geometrií do požadovaného rozměru.

Vzhledem k jinému způsobu skenování vzorků se nepodařilo získat dostatečné množství dat pro rekonstrukci některých děr čtvercového průřezu. Stejně tak jako v předchozím případě byly tyto díry na postavené součásti zřetelné a průchozí. Porovnávání celkové přesnosti stavby bylo provedeno pouze pro díry, které bylo možné změřit na všech dílech. Jednalo se o díry s hranou o velikosti 2 mm a více. Nejmenší průměrné odchylky, 0,0209 mm, bylo dosaženo ve směru X u dílu

² Průměrné odchylky od navrženého rozměru jsou počítány pouze ze stěn o tloušťce 0,5 – 2 mm. Stěna s tloušťkou 0,25 mm není z důvodu vysoké nepřesnosti a velkého ovlivnění výsledku započítána.

číslo 2. Největší nepřesnost byla zjištěna u dílu číslo 3, hodnota byla -0,1064 mm. Nepřesnosti jednotlivých děr ve většině případů rostly s velikostí hrany díry. Nejednalo se však pouze o nárůst velikosti, ale také o její snižování. Jedinou výjimkou byl středový díl, kde s rostoucí velikostí díry rostla přesnost, snižovala se odchylka. Nejpresněji postavené čtvercové díry byly v ose Y u dílu číslo 2, kdy průměrná odchylka činila 0,0125 mm. Nejméně přesně byly vyrobeny díry u dílu číslo 1, které byly v průměru menší o 0,0555 mm proti navrženým hodnotám.

Válcové díry byly naskenovány lépe, ve dvou případech došlo k naskenování všech děr a bylo tedy možné zkontrolovat všechny tyto geometrické tvary. U většiny dílů ale došlo k naskenování děr průměru 1 mm a větších. Nejlépe postaveny byly tyto díry na dílu číslo 2, jejich průměrná odchylka byla -0,0431 mm. U ostatních dílů se odchylka pohyboval v okolí 0,1 mm, a nejhorší pak u dílu číslo 3 a to -0,1440 mm.

U kontrolního tisku bylo ověřeno, že pozice na platformě hraje svou roli při přesnosti stavby dílu, především co se týká celkových rozměrů. Malé vnitřní geometrie nejsou tímto vlivem významně ovlivněny a jejich přesnost se liší jen nepatrně.

4.3.3 Porovnání výchozí a kontrolní série

Pro posouzení vhodnosti úprav provedených na stroji a parametrech materiálu bylo nutné provést srovnání obou staveb. Nedošlo k posuzování průměrné hodnoty za celou testovací sérii, ale byly vzájemně posuzovány díly na stejných pozicích.

Z TABULKY je patrné, že celkové rozměry dílů jsou v obou případech tisku odlišné. Zatímco při prvním tisku byly rozměry všech testovacích dílů menší než původně navržené, při druhém tisku došlo v určitých místech platformy ke stavbě dílů větších. V tabulce je vždy zvýrazněn přesnější rozměr.

Tab. 4.1 Srovnání celkových rozměrů dílů

Navržený rozměr [mm]	Označení	Rozměr výchozí stavby [mm]	Rozměr kontrolní stavby [mm]
40,25 – osa X	1	39,2352	39,4122
	2	40,0534	40,7630
	3	39,3474	39,4839
	4	40,1374	40,7961
	S	39,6938	40,0579
41,00 – osa Y	1	39,8401	41,0513
	2	39,9621	41,0413
	3	40,5169	40,6380
	4	40,3334	40,6880
	S	40,2127	40,8958

Jak je vidět, po kalibraci stroje došlo k výraznému zvýšení přesnosti stavby, zejména ve směru osy Y. Při výchozí stavbě byly díly v tomto směru stavěny s odchylkou, která v některých případech přesahovala 1 mm. Odchylka stavby v tomto směru se pohybuje v rozmezí asi -0,3 – 0,05 mm. U stavby ve směru osy X došlo k zlepšení rozměrů, především v levé části platformy. Díly jsou zde proti výchozí stavbě přesnější zhruba 0,15 mm a jejich odchylka je asi -0,8 mm od navrženého rozměru. V pravé části platformy dochází ke stavbě dílů, které jsou proti navrženým hodnotám

asi o 0,5 mm větší. Tato hodnota sice nepatří do tolerančního pole udávaného výrobcem stroje, ale případná nepřesnost ne dá mechanicky odstranit.

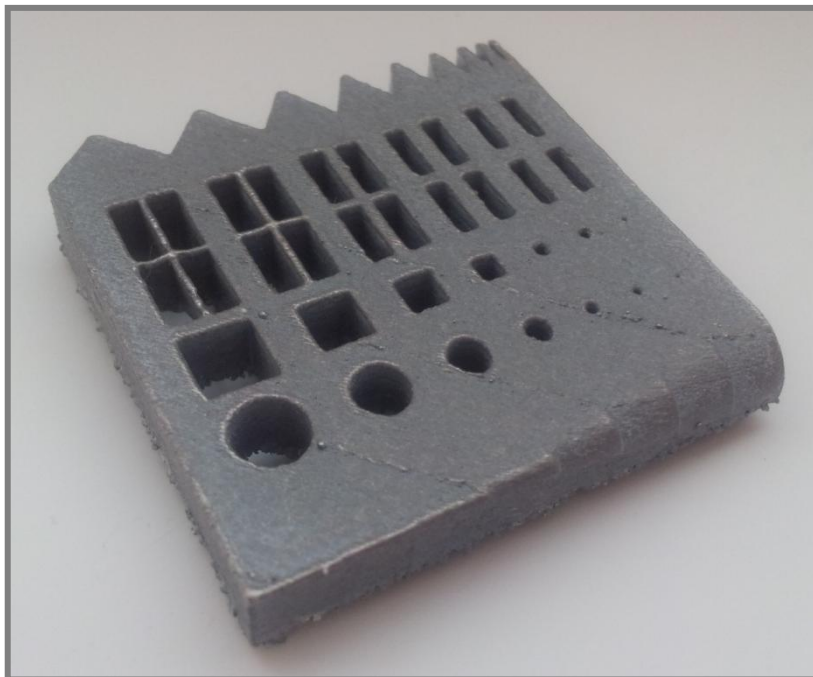


Obr. 4.11 Srovnání dílů výchozí a kontrolní série

U geometrií obsažených uvnitř testovacího dílu došlo také ke změně. Negativní změnou, kterou s sebou přineslo nové materiálové nastavení je zvýšení tloušťky nejtenčích stěn o tloušťce 0,25 mm. Tato stěna byla při kontrolním tisku postavena více než 1,5x silnější než měla být. Ostatní vnitřní geometrické prvky nesou ve většině případů známky snížení odchylky od navrhované hodnoty. Vzhledem k tomu, že všechny vnitřní geometrické tvary byly již při výchozím tisku v tolerančním poli stroje, nejsou zlepšení jejich rozměrů až tak podstatná. Ke zlepšení, případně zhoršení přesnosti těchto rozměrů došlo v řádu setin milimetru.

4.3.4 Vliv natočení vůči platformě na geometrickou přesnost

Vzhledem k výsledkům testu kde byla posuzována drsnost povrchu v závislosti na úhlu plochy vůči platformě, došlo také k testu vlivu úhlu na geometrickou přesnost výroby. V tomto testu již nebyla stavěna celá testovací série, ale pouze jeden díl. Vybraný díl byl tisknut v prvním horním rohu, takže byl následně srovnáván s díly označenými číslem 2. Jak již bylo v této práci zmíněno, nejlepší drsnosti povrchu je dosaženo na plochách, jejichž normála svírá s normálou platformy úhel 10 – 90°. Z důvodu úspory materiálu a času stavby byla testovací součást umístěna na platformu tak, že svírala jak s osou X, tak i osou Y úhel 5°.



Obr. 4.12 Díl stavěný pod úhlem

Rozměry tohoto dílu nebyly vyhodnocovány samostatně, ale byly přímo porovnávány s rozměry ostatních dvou zkušebních dílů. Proti ostatním zkušebním dílům byla horní strana dílu odlišná. Díl postrádal kontury okolo geometrických prvků a obvodu součástí. Další odlišností od zbylých dílů byl celý povrch horní plochy. Na dílech jejichž horní plocha byla rovnoběžná s platformou, byly jasně viditelné dráhy laseru. Povrch tohoto dílu postrádá stopy po drahách laseru, ale byly zde patrné jednotlivé vrstvy stavby dílu. V pravidelných intervalech se na povrchu a bočních plochách dílu opakovala vystupující rýha. U ostatních dílů se podobný jev nevyskytoval. Celkové rozměry, stejně jako rozměry vnitřních geometrií byly srovnatelné s rozměry kontrolního tisku. Největší rozdíly v rozměrech byly naměřeny u nejmenších geometrických tvarů v obou směrech roviny stavby. Na stěnách o tloušťce 0,25 mm a 0,5 mm, díře se čtvercovým průřezem o hraně 0,75 mm a dírách s kruhovým profilem o průměru 0,75 mm a 1 mm. Tyto rozdíly byly negativní, u některých rozměrů byla odchylka více než o 100% vyšší než u kontrolního tisku. V tabulce 4.2 jsou uvedena srovnání všech tří testovacích dílů.

Tab. 4.2 Srovnání rozměrů všech tisků pro osu X

Geometrie	Návrh [mm]	Výchozí stavba [mm]	Kontrolní stavba [mm]	Natočená stavba [mm]
Celkový rozměr	40,25	40,0534	40,7630	40,7618
Tenké stěny	0,25	0,2387	0,4279	0,5086
	0,50	0,5200	0,5632	0,6189
	1,00	0,9464	1,0470	1,0713
	1,50	1,4228	1,5580	1,5758
	2,00	1,9276	2,0437	2,0685
Čtvercové díry	0,50	Nezměřeno	Nezměřeno	Nezměřeno
	0,75	0,7737	Nezměřeno	0,6457
	1,00	1,0634	0,9338	0,9563
	2,00	2,0570	1,9871	1,9692
	3,00	3,0818	2,9782	2,9782
	4,00	4,0632	4,0006	4,006
	5,00	5,0677	5,0144	5,0144
Kruhové díry	0,50	Nezměřeno	Nezměřeno	Nezměřeno
	0,75	0,7305	Nezměřeno	0,4604
	1,00	0,9670	0,9769	0,8438
	2,00	1,9791	1,9272	1,8908
	3,00	2,9975	2,9381	2,9312
	4,00	3,9918	3,9612	3,9397
	5,00	4,9738	4,9813	4,9596

4.3.5 Vliv změny parametrů tisku na geometrickou přesnost

Měněnými parametry tisku byla rychlost posuvu laseru a výkon laserového paprsku. Pro tyto potřeby byla vytvořena testovací série, u které byly nastaveny pro každý díl odlišné parametry stavby. Testovací série obsahovala celkem dvacet pět dílů, které byly označeny v řadách písmeny A – E a ve sloupcích čísly 1 – 5. Díly byly tedy označeny jako A1 – E5. Tyto díly byly na platformě umístěny do míst, kde byla předpokládána nejvyšší přesnost stavby.

Každá stavba standardně probíhá v několika fázích, kdy jsou pro každou fázi stavby nastaveny jiné parametry výkonu a rychlosti. Základními fázemi jsou stavba okraje dílu, která probíhá jako první, následně je pak stavěna vnitřní struktura. Parametry tisku byly měněny pro obě tyto fáze tisku.

Tab. 4.3 Původní parametry stavby

Fáze stavby	Rychlost posuvu laseru [mm·s ⁻¹]	Výkon laseru [W]
Okraj dílu	500	350
Objem dílu	930	350

V testovací sérii byly tyto parametry nastaveny tak aby po řadách rostla rychlost posuvu laseru po prášku. A ve sloupcích rostl výkon laseru. Obě hodnoty byly v minimu nastaveny na 80% původní hodnoty, v maximu pak na 120% původní hodnoty. Hodnoty rychlostí posuvu laseru a výkonu laseru jsou uvedeny v tabulkách 4.4 a 4.5.

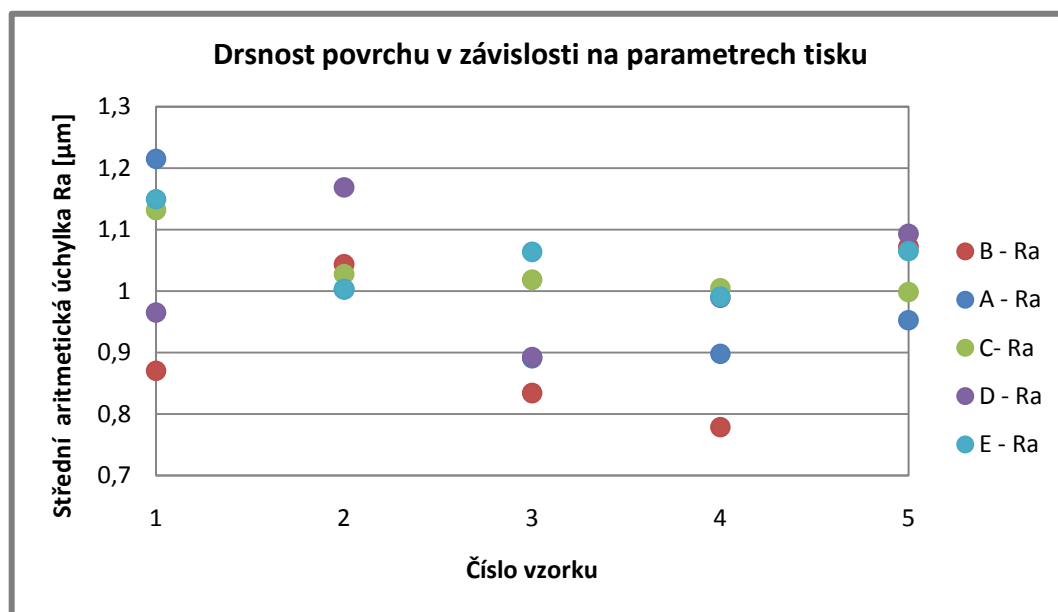
Tab. 4.4 Hodnoty rychlostí posuvu laseru v $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Fáze stavby	80%	90%	100%	110%	120%
Okraj dílu	400	450	500	550	600
Objem dílu	744	837	930	1023	1116

Tab. 4.5 Hodnoty výkonu laseru ve Wattech

Fáze stavby	80%	90%	100%	110%	120%
Okraj dílu	280	315	350	385	420
Objem dílu	280	315	350	385	420

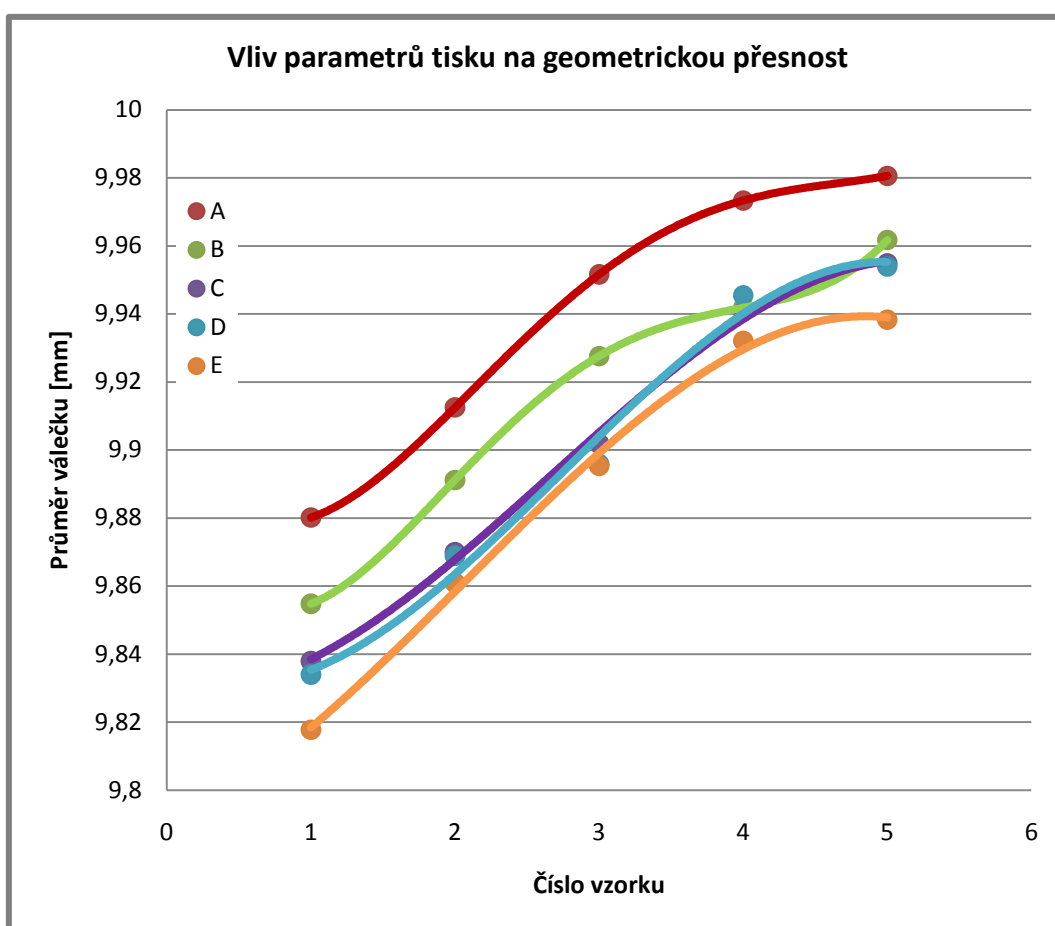
U testovacích dílů došlo nejprve k vyhodnocení drsnosti povrchu, následně pak k vyhodnocení rozměrové přesnosti. Při vyhodnocování drsnosti povrchu byla drsnost měřena pouze ve směru Z. Drsnost v rovině stavby XY nebyla měřena z důvodu přítomnosti drah laseru. Bylo zjištěno, že s rostoucí rychlostí posuvu laseru klesá relativní aritmetická úchylka povrchu R_a až do hodnoty 110% původní nastavené rychlosti. U 120% hodnoty rychlosti dochází k nárůstu drsnosti povrchu. Nejlepší drsnosti povrchu pak bylo dosaženo při 100% a 110% rychlosti posuvu laseru. Vliv výkonu na drsnost povrchu, reprezentovanou střední aritmetickou úchylkou povrchu, je takový, že drsnost povrchu mírně klesá, pokud je výkon laseru nastaven na 80%, případně 90% původního výkonu laseru. U vyšších nastavení výkonu laseru se drsnost povrchu mírně zvyšuje.



Obr. 4.13 Drsnost povrchu při různých parametrech stavby

Celkový rozsah naměřených středních aritmetických úchylek povrchu R_a je v rozsahu od $0,77 \mu\text{m}$ do $1,21 \mu\text{m}$. Celkový rozsah středních aritmetických úchylek povrchu je tedy velmi malý. Z tohoto důvodu se nedá přesně specifikovat vliv těchto parametrů na výslednou drsnost povrchu.

To se ale nedá říct o vlivu těchto parametrů na geometrickou přesnost stavby dílů. Jak je vidět na OBRÁZKU, přesnost stavby dílu roste s narůstajícím výkonem laseru. Pro maximální nastavený výkon laseru, 120% původní nastavené hodnoty výkonu laseru, byla zjištěna nejvyšší přesnost stavby pro všechny rychlosti. Celkově nejlepších parametrů stavby bylo dosaženo u dílu s označení A5, při jehož stavbě bylo využito maximálních parametrů laseru a minimálních parametrů rychlosti posuvu laseru, tj. $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a 420 W pro okraj testovacího dílu a $744 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a 420 W pro vnitřní objem testovacího dílu. Nejhorší přesnosti tisku bylo naopak dosaženo u dílu E1, který byl stavěn maximální rychlostí, při použití minimálního výkonu laseru, tj. $600 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a 280 W pro okraj testovacího dílu a $1116 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a 280 W pro vnitřní objem testovacího dílu.



Obr. 4.14 Geometrická přesnost dílů při různých parametrech stavby

5 DISKUZE

V průběhu kontroly geometrie byla provedena série několika staveb. Tyto stavby byly mezi sebou porovnány a analyzovány. Při prvním tisku byla geometrická nepřesnost velmi vysoká, odchylka postavených dílů byla v některých případech vyšší než 1,5 mm. Po konzultacích se zastupiteli výrobce a dodavatele stroje byly zjištěny problémy, ke kterým došlo při instalaci a základní kalibraci stroje. Po počáteční úpravě byly zjišťovány geometrické odchylky a změny, ke kterým došlo po stavbě dílů. Změny v kvalitě dílů, ke kterým se dospělo, vedly ke zlepšení geometrické přesnosti stavby.

V první stavbě se nepodařilo postavit ani jeden díl, jehož rozměry by byly v tolerančním poli udávaném výrobcem. Ve druhé stavbě dílů, kdy již byl stroj na dálku kalibrován, došlo k podstatnému zlepšení celkových rozměrů stavěného dílu. Druhou sérii dílů se podařilo postavit až na druhý pokus. Při prvním pokusu byla odhalena chyba v materiálovém nastavení. Z tohoto důvodu docházelo pouze ke stavbě kontury ale nikoli vnitřní struktury testovacího dílu. Druhá série testovacích dílů, označená jako kontrolní, obsahovala díl, který se svými rozměry vešel do tolerančního pole přesnosti udávané výrobcem. Tímto dílem byl testovací díl stavěný ve středu platformy stroje. Celkově pak došlo k výraznému zlepšení parametrů tisku ve směru osy Y. Rozměry dílů stavěných ve směru osy Y, byly téměř v tolerančním poli. Při stavbě dílů v ose X byla přesnost také zvýšena, ale odchylky v tomto směru byly stále dosti vysoké a odchylky překračovali danou toleranci více než třikrát.

Jedním z prováděných testů bylo také srovnání stavby vodorovně s rovinou platformy se stavbou nakloněného dílu. Podle výsledků při měření drsnosti povrchu se nejprve zdálo, že by výsledky stavby měly být přesnější a postavený díl by měl být celkově kvalitnější. Po vyhodnocení výsledků se ale ukázalo, že rozměry dílu jsou srovnatelné se stavbou ve vodorovné pozici. Z tohoto důvodu se ukázalo naklonění dílu jako ne zcela vhodné. Naklonění zvyšuje spotřebu materiálu, je třeba postavit vyšší podpůrné struktury. Za druhé, naklonění zvyšuje dobu stavby, takže cenová náročnost na provoz stroje také roste.

Naopak naklonění dílu napomáhá ke snížení opotřebení gumového břitů, kterým jsou urovnávány vrstvy prášku. Při naklonění dílu se může dostat břit do kontaktu se stavěným dílem v menší ploše. Pokud by došlo k poškození břítu, bude tato poškozená plocha v kontaktu s dílem jen krátkou dobu. Při stavbě dílu pod úhlem také došlo k odstranění výrazných kontur po obvodu součásti a v okolí vnitřních geometrických tvarů.

Jako nejvýhodnější nastavení pro stavbu dílu se ukázalo nastavení, při kterém jsou původní parametry stavby poněkud modifikovány. Tyto parametry byly testovány pouze na zkušebních válečkách. K testům tohoto nastavení, kdy byla nastavena rychlost posuvu laseru na $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a výkon na 420 W pro okraj testovacího dílu a $744 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a 420 W pro vnitřní objem testovacího dílu, na testovacím díle s vnějšími a vnitřními geometrickými prvky nedošlo z důvodů nového nastavování stroje.

ZÁVĚR

V průběhu testování geometrie dílů bylo odhaleno několik problémů, které byly způsobeny instalací a kalibrací stroje. Při zpracovávání práce bylo komunikováno s dodavatelem stroje, firmou SLM Solutions GmbH. Došlo ke změnám nastavení materiálu i samotného stroje. Původní kalibrace, se kterou byl stroj umístěn do laboratoří NeTME centra byla zcela chybná. Z tohoto důvodu bylo po vyhodnocení prvního tisku nutné vyčkat, než servisní pracovníci dodavatele stroje SLM 280 HL vyhodnotí naměřená data a nainstalují do stroje kalibrační soubory.

Po tomto zásahu došlo ke zlepšení parametrů stroje, ale pořád se nepodařilo dosáhnout deklarované přesnosti stavby stroje, přesnosti $\pm 0,2$ mm. Proto byla domluvena další návštěva technika dodavatele, která byla spojena s kontrolou stroje, jeho případnou kalibrací a kontrolou přesnosti. Došlo k rozebrání stroje a kontrole jeho dílů. Při této kontrole byla zjištěna nutnost výměny některých částí stroje a nutnost nové kalibrace laserového paprsku. Po dokončení této kalibrace došlo ke kontrolnímu tisku. Data tohoto tisku by měla být vyhodnocována techniky dodavatele a podle zjištěných odchylek by mělo dojít k případným kompenzačním nepřesnostem stroje.

Všechny prováděné testy byly tedy realizovány na špatně kalibrovaném stroji. Při testech došlo ke zlepšení parametrů stavby dílů. Bylo zjištěno několik parametrů, které ovlivňují přesnost stavby dílů. Mezi faktory ovlivňující stavbu dílu zásadním způsobem patří rozložení podpůrného materiálu a umístění dílu na platformě stroje. Nepřesnosti způsobené umístěním na platformu stroje je možné kompenzovat přídatky na obrobení dílu. Na rozdíl od tohoto faktoru může vést nevhodné rozmístění podpor ke zničení stavby. Umístění podpor je zásadní také pro odvod tepla ze stavěného dílu.

Po případné kompenzaci nepřesností stroje by mělo dojít k dalším kontrolám geometrie, aby byla jistota správné kalibrace stroje. Jakmile bude vše korektně nastaveno, bude možné provádět na tomto stroji další výzkum vlivů ovlivňujících přesnost stavby.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Wohlers Associates. [online]. 2010 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://wohlersassociates.com/additive-manufacturing.html>
- [2] PARTHASARATHY, J., B. STARLY a S. RAMAN. A design for the additive manufacture of functionally graded porous structures with tailored mechanical properties for biomedical applications. 2011.
- [3] SANTOS, Edson Costa, Masanari SHIOMI, Kozo OSAKADA a Tahar LAOUI. Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006, vol. 46, 12-13, s. 1459-1468. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.09.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695505002683>
- [4] Molding process [patent]. US Patent 4247508. Uděleno 1979.
- [5] KRUTH, J.-P., B. VANDENBROUCKE, J. VAN VAERENBERGH a P. MERCELIS. Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques. 2005.
- [6] SANTOS, E.C., M. SHIOMI, K. OSAKADA a T. LAOUI. Rapid manufacturing of metal components by laser forming. 2006, s. 1459-1468.
- [7] CHUA, C. K., K. F. LEONG a C. S. LIM. Rapid prototyping: principles and applications. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, 2010, xxv, 512 p. ISBN 98-127-7897-7.
- [8] VAN BAELE, S., Y.C. CHAI, S. TRUSCELLO, M. MOESEN, G. KERCKHOFS, H. VAN OOSTERWYCK, J.-P. KRUTH a J. SCHROOTEN. The effect of pore geometry on the in vitro biological behavior of human periosteum-derived cells seeded on selective laser-melted Ti6Al4V bone scaffolds. *Acta Biomaterialia*. 2012, vol. 8, issue 7, s. 2824-2834. DOI: 10.1016/j.actbio.2012.04.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1742706112001481>
- [9] PARTHASARATHY, Jayanthi, Binil STARLY, Shivakumar RAMAN, M. MOESEN, G. KERCKHOFS, H. VAN OOSTERWYCK, J.-P. KRUTH a J. SCHROOTEN. A design for the additive manufacture of functionally graded porous structures with tailored mechanical properties for biomedical applications. *Journal of Manufacturing Processes*. 2011, vol. 13, issue 2, s. 160-170. DOI: 10.1016/j.jmapro.2011.01.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612511000053>
- [10] VANDENBROUCKE, Ben, Jean-Pierre KRUTH, Shivakumar RAMAN, M. MOESEN, G. KERCKHOFS, H. VAN OOSTERWYCK, J.-P. KRUTH a J. SCHROOTEN. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2007, vol. 13,

- issue 4, s. 196-203. DOI: 10.1108/13552540710776142. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/10.1108/13552540710776142>
- [11] COOKE, A.L. a J.A. SOONS. Variability in the Geometric Accuracy of Additively Manufactured Test Parts. 2010. Dostupné z: http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub_id=906639
- [12] SLM Solutions GmbH. Milestones [online]. 2012 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.slm-solutions.com/en/company/milestones/>
- [13] [SLM Solutions GmbH. SLM 280 HL [online]. 2012 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.slm-solutions.com/en/products/slm-equipment/slm280-hl/>
- [14] MARCAM ENGINEERING. *AutoFab User Manual*. 2012.
- [15] SLM SOLUTION GMBH. *Selective Laser Melting System SLM 280HL*. 2012.
- [16] ATOS Triple Scan: GOM. [online]. 2013 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/atos-triple-scan.html>
- [17] GOM OPTICAL MEASURING TECHNIQUES. *ATOS III TripleScan User Manual*. 2009.
- [18] GOM Inspect: GOM. [online]. 2013 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.gom.com/3d-software/gom-inspect.html>
- [19] Měřicí technika - Morava. [online]. 2008 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.mt-m.eu/products/opticka-profilometrie/contourgt-x8>
- [20] Bruker Corporation. [online]. 2012 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.bruker.com/>

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

ASTM	American Society for Testing and Materials
SLS	Selective laser sintering
SLM	Selective laser melting
CAD	Computer aided design
STL	Stereolithography
CNC	Computer numeric control
Nd:YAG	Neodymium-doped yttrium aluminum garnet
ANSI	American National Standards Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ISO	International Organization for Standardization
NAS	National Aerospace Standard
CMM	Coordinate-measuring machine

Označení	Jednotka	Název veličiny
<i>P</i>	<i>W</i>	výkon
<i>Ra</i>	μm	střední aritmetická úchylka
<i>v</i>	$mm \cdot s^{-1}$	rychlost posuvu laseru

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK**Seznam obrázků**

Obr. 0.1 Příklad využití technologie SLM	15
Obr. 1.1 Proces lití [4]	16
Obr. 1.2 Princip stavby dílů technologií SLM	17
Obr. 1.3 Popis trojúhelníku v STL	18
Obr. 1.4 Způsob duplikace bodů STL sítě	18
Obr. 1.5 Testované struktury okostice	19
Obr. 1.6 Princip měření geometrie	19
Obr. 1.7 Srovnání velikostí pórů a vzpěr struktury	20
Obr. 1.8 Buněčné struktury	21
Obr. 1.9 Vliv velikosti pórů na sílu prutů	22
Obr. 1.10 Zkušební díly pro testy procesních omezení	23
Obr. 1.11 Způsob měření drsnosti povrchu testovacího dílu	24
Obr. 1.12 Model k měření drsnosti povrchu při různém sklonu vůči platformě	24
Obr. 1.13 Vyhodnocení drsnosti povrchu	25
Obr. 1.14 Testovací díl NAS 979	26
Obr. 1.15 Geometrická přesnost stavby ve směrech osy X (a) a osy Y (b)	27
Obr. 1.16 Počátek souřadného systému	28
Obr. 1.17 Nepřesnosti vzniklé při stavbě dílu NAS 979	28
Obr. 1.18 Testovací díl 50 x 50 x 9 mm	29
Obr. 1.19 Nepřesnosti při stavbě testovacího dílu	30
Obr. 3.1 Stroj SLM 280 HL	33
Obr. 3.2 Testovací model – Geometrická přesnost	34
Obr. 3.3 Testovací díl – drsnost ploch	35
Obr. 3.4 Popis pracovního prostředí systému AutoFab	36
Obr. 3.5 Spojení modelu s platformou stroje	37
Obr. 3.6 Stromové porpory	38
Obr. 3.7 Úsečkové podpory na modelu	38
Obr. 3.8 Proces přípravy dat k tisku	39
Obr. 3.9 Oddělení dílu od platformy stroje	40
Obr. 3.10 Testovací díl před a po nástřiku titanem	41
Obr. 3.11 Platforma s referenčními body ke skenování	41
Obr. 3.12 Skenování dílu ve skenovacím přípravku	42
Obr. 3.13 Naskenovaná data	43
Obr. 3.14 Díl s ustaveným souřadným systémem	43
Obr. 3.15 Řez určený k měření rozměrů	44
Obr. 3.16 Optický profilometr Bruker ContourGT-X8 [20]	45
Obr. 3.17 Proces měření drsnosti povrchu	46
Obr. 4.1 Příklady použitých podpůrných struktur	47
Obr. 4.2 Odtržená podpůrná struktura	47
Obr. 4.3 Zesílené podpůrné struktury	48
Obr. 4.4 Výsledek stavby – díl pro měření drsnosti povrchu	49
Obr. 4.5 Drsnost povrchu horní strany zkušebního dílu	49
Obr. 4.6 Drsnost povrchu dolní strany zkušebního dílu	50
Obr. 4.7 Výsledek stavby – díl pro kontrolu rozměrů	51
Obr. 4.8 Rozložení testovacích dílů na platformě	52

Obr. 4.9 Grafické znázornění odchylek na testovacím dílu	53
Obr. 4.10 Testovací díl kontrolní série	54
Obr. 4.11 Srovnání dílů výchozí a kontrolní série	57
Obr. 4.12 Díl stavěný pod úhlem	58
Obr. 4.13 Drsnost povrchu při různých parametrech stavby	60
Obr. 4.14 Geometrická přesnost dílů při různých parametrech stavby	61

Seznam tabulek

Tab. 1.1 Označení a parametry stavby zkušebních dílů	21
Tab. 1.2 Odchyly rozměrů od návrhu zkušebního dílu	23
Tab. 1.3 Drsnost povrchu testovacích dílů	25
Tab. 1.4 Označení a parametry stavby zkušebních dílů	26
Tab. 1.5 Specifikace strojů a procesů	30
Tab. 4.1 Srovnání celkových rozměrů dílů	56
Tab. 4.2 Srovnání rozměrů všech tisků pro osu X	59
Tab. 4.3 Původní parametry stavby	59
Tab. 4.4 Hodnoty rychlostí posuvu laseru v $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	60
Tab. 4.5 Hodnoty výkonu laseru ve Watech	60

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** Výkres součásti – testovací díl pro kontrolu geometrie
- Příloha 2** Protokoly z měření dílů výchozího tisku
- Příloha 3** Protokoly z měření dílů kontrolního tisku
- Příloha 4** Protokol z měření dílu stavěného pod úhlem
- Příloha 5** Odborný článek
- Příloha 6** Prezentační poster