

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 **Strojní inženýrství**

Studijní obor: 2301N016 **Strojírenská technologie obrábění**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: **Bc. Veronika Čapková**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D**

Akademický rok 2014/2015

ZADÁNÍ

PODĚKOVÁNÍ

V této části bych ráda poděkovala svému vedoucímu panu doktorovi Miroslavu Zetkovi a konzultantce paní inženýrce Ivaně Zetkové za vedení této práce, jejich ochotu, vstřícnost, pozitivní přístup a hlavně trpělivost.

Dále velké díky patří mé rodině, která mě při studiu velice podporovala a prožívala se mnou všechny úspěchy i občasné nezdary. V neposlední řadě bych ráda poděkovala všem, kdo alespoň trochu přispěli k tvorbě této práce a byli mi ve všech ohledech nápomocni.

PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

AUTORSKÁ PRÁVA

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské/diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Čapková	Jméno Veronika		
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie - technologie obrábění			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph.D	Jméno Miroslav		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Omezující parametry 3D tisku			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2015
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	90	TEXTOVÁ ČÁST	63	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	---

STRUČNÝ POPIS	Diplomová práce je zaměřena na omezující parametry technologie 3D tisku, používanou pro výrobu kovových součástí. Cílem této práce je shromáždit co nejvíce kritických parametrů a provést jejich teoretický rozbor. V závislosti na těchto omezujících parametrech došlo k navržení součásti, která obsahuje řadu geometrických prvků, na kterých byly kritické parametry měřeny.
KLÍČOVÁ SLOVA	3D tisk, kritické parametry, technologie, metoda, součást

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Čapková	Name Veronika	
FIELD OF STUDY	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
SUPERVISOR	Surname Ing. Zetek, Ph.D	Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Restrictive parameters of 3D printing		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2015
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	90	TEXT PART	63	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION	The aim of this work is to collect as many critical parameters as possible and carry out their theoretical analysis. In dependence on these limiting parameters there was carried out the design of a component that contains a series of geometric elements on which critical parameters will be measured.
KEY WORDS	3D printing, Restrictive parameters, technology, method, component

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM PŘÍLOH	12
PŘEHLED POUŽITÝCH OZNAČENÍ A JEDNOTEK	13
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	13
ÚVOD	14
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	15
1.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE.....	15
1.2 VÝROBNÍ POSTUP	16
1.2.1. Vytvoření 3D modelu.....	16
1.2.2. Orientace modelu	16
1.2.3. Převod na STL data	17
1.2.4. Výroba.....	17
1.2.5. Očištění.....	18
1.2.6. Dokončovací úpravy	18
2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU	19
2.1 3D TISK	19
2.2 KLADY 3D TISKU	19
2.1.1. Komplikovanost výrobků.....	19
2.1.2. Stavební rychlost.....	19
2.1.3. 3D model	19
2.1.4. Zásoby	20
2.1.5. Gradientní materiály.....	20
2.3 OMEZUJÍCÍ PARAMETRY 3D TISKU	20
2.4.1. ORIENTACE SOUČÁSTI	21
2.4.2. TLOUŠŤKA VRSTVY	22
2.4.3. STAVBA PODPOR	26
2.4.3.1. Podpůrné struktury	27
2.4.3.2. Podpůrné materiály	29
2.4.3.3. Problematika převislých konců	29
2.4.4. RYCHLOST TISKU A VÝKON LASERU	31
2.4.4.1. Materiály a experimentální postup.....	31

2.4.4.2.	Nestabilita tavné lázni při nízké rychlosti tisku	32
2.4.4.3.	Optimální parametry tisku pro různé druhy kovových prášků.....	32
2.4.5.	BALLING	33
2.4.6.	ZBYTKOVÉ PNUTÍ	35
2.4.6.1.	Postup experimentu	36
2.4.6.2.	Pevnostní chování	36
2.5.	POVRCHOVÉ ÚPRAVY	41
3	NÁVRH VLASTNÍHO ŘEŠENÍ	44
3.1	MATERIÁL SOUČÁSTI.....	44
3.2	POPIS SOUČÁSTI.....	45
3.3	POPIS JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ.....	45
3.4	POPIS PLÁNOVANÉHO MĚŘENÍ	48
3.5	VLASTNÍ KONTAKTNÍ MĚŘENÍ	51
3.6	MĚŘENÍ DRSNOSTI.....	62
3.7	MĚŘENÍ TVRDOSTI.....	64
3.8	MĚŘENÍ ŽEBER	66
4	ZHODNOCENÍ	69
5	ZÁVĚR.....	73
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	75

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 1 VYUŽITÍ TECHNOLOGIE 3D TISKU VE VÝROBĚ [1].....	15
OBRÁZEK 2 PŘÍKLADY ORIENTACE SOUČÁSTÍ [1]	17
OBRÁZEK 3 PROCES NAHRAZENÍ ZAKŘIVENÝCH PLOCH [1]	17
OBRÁZEK 4 UKÁZKA SOUČÁSTI S RŮZNOU TLOUŠŤKOU VRSTEV [4].....	22
OBRÁZEK 5 ZÁVISLOST HUSTOTY SLINOVÁNÍ NA TLOUŠŤCE VRSTVY [16].....	24
OBRÁZEK 6 VLIV TLOUŠŤKY VRSTVY NA MIKROSTRUKTURU INCONELU 718 PŘI 1260 °C (A) 100 MM, B) 125 MM, C) 150 MM, D) 200 MM. [16]	25
OBRÁZEK 7 PŘÍKLADY PŘEVISLÝCH KONCŮ [10]	26
OBRÁZEK 8 UKÁZKA PODPŮRNÝCH STRUKTUR [7].....	27
OBRÁZEK 9 POPIS PODPŮRNÉ STRUKTURY [10].....	28
OBRÁZEK 10 POPIS PODPŮRNÉ STRUKTURY [10].....	28
OBRÁZEK 11 PŘÍKLADY PODPŮRNÝCH STRUKTUR [10]	28
OBRÁZEK 12 UKÁZKA POUŽITÍ PODPŮRNÉHO MATERIÁLU [7].....	29
OBRÁZEK 13 PRINCIP DEFORMACE [8]	30
OBRÁZEK 14 UKÁZKA AKUMULACE DEFORMACE [8].....	30
OBRÁZEK 15 ROZDĚLENÍ VÝROBNÍCH ZÓN [8].....	30
OBRÁZEK 16 PRŮŘEZ LASEROVÉ STOPY [12].....	31
OBRÁZEK 17 ZÁVISLOST RYCHLOSTI TISKU NA HLOUBCE PŘETAVENÍ [12]	32
OBRÁZEK 18 TLOUŠŤKA VRSTVY (A) P = 25 W, (B) P = 12,5 W. [12]	33
OBRÁZEK 19 SCHÉMA PRVNÍHO DRUHU BALLINGU [13].....	34
OBRÁZEK 20 UKÁZKA SPEČENÝCH DRAH PŘI RŮZNÝCH RYCHLOSTECH TISKU [13]	35
OBRÁZEK 21 (A) TVAR ČÁSTIC, (B) DISTRIBUCE VELIKOSTI ŽELEZNÉHO PRÁŠKU. [14].....	36
OBRÁZEK 22 (A) TAHOVÁ KŘIVKA SOUČÁSTI, BEZ OŠETŘENÍ, (B) TAHOVÁ KŘIVKA SOUČÁSTI, OŠETŘENÁ ŽÍHÁNÍM	37
OBRÁZEK 23 STRUKTURY TAHOVÝCH LOMOVÝCH PLOCH [14]	37
OBRÁZEK 24 UKÁZKA VZORKU [15].....	38
OBRÁZEK 25 ORIENTACE SOUČÁSTI [15]	39
OBRÁZEK 26 VLIV ORIENTACE VZORKU [15].....	40
OBRÁZEK 27 PROCENTUÁLNÍ SMRŠTĚNÍ [15]	40
OBRÁZEK 28 SMĚR TISKU [15].....	41
OBRÁZEK 29 SMRŠTĚNÍ INCONELU 718 V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ [16].....	41
OBRÁZEK 30 SCHÉMATICKÉ ZOBRAZENÍ STRATEGIE TISKU SOUČÁSTI [11].....	42
OBRÁZEK 31 STAV PŘED ÚPRAVOU [11]	43
OBRÁZEK 32 STAV PO ÚPRAVĚ [11].....	43
OBRÁZEK 33 MODEL SOUČÁSTI A), B)	47
OBRÁZEK 34 VYROBENÁ SOUČÁST.....	47
OBRÁZEK 35 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ PRO KONTAKTNÍ MĚŘENÍ SOUČÁSTI [19]	48
OBRÁZEK 36 PRINCIP ODVRTÁVACÍ METODY [20].....	49

OBRÁZEK 37 ŘEZ Č. 1.....	49
OBRÁZEK 38 ŘEZ Č. 2.....	49
OBRÁZEK 39 ŘEZ Č. 3.....	50
OBRÁZEK 40 ŘEZ Č. 4.....	50
OBRÁZEK 41 ŘEZ Č. 5.....	49
OBRÁZEK 42 ŘEZ Č. 6.....	51
OBRÁZEK 43 ORIENTACE SOUČÁSTI.....	51
OBRÁZEK 44 NÁVRH BODOVÉ SÍTĚ A), B).....	52
OBRÁZEK 45 POPIS PLOCH.....	52
OBRÁZEK 46 POPIS PLOCH.....	52
OBRÁZEK 47 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY – PLOCHA Č. 1.....	53
OBRÁZEK 48 SCHÉMA ZVOLENÉ TOLERANCE.....	54
OBRÁZEK 49 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY - PLOCHA Č. 2.....	54
OBRÁZEK 50 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY - PLOCHA Č. 3.....	54
OBRÁZEK 51 ODCHYLKY OD JMENOVITÝCH ROZMĚRŮ VE ZVOLENÝCH BODECH.....	55
OBRÁZEK 52 ODCHYLKY – PLOCHA Č. 1.....	55
OBRÁZEK 53 ODCHYLKY – PLOCHA Č. 2.....	56
OBRÁZEK 54 ODCHYLKY – PLOCHA Č. 3.....	57
OBRÁZEK 55 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY – PLOCHA Č. 1.....	58
OBRÁZEK 56 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY – PLOCHA Č. 2.....	58
OBRÁZEK 57 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY – PLOCHA Č. 3.....	59
OBRÁZEK 58 ODCHYLKY - PLOCHA Č. 1.....	59
OBRÁZEK 59 ODCHYLKY - PLOCHA Č. 2.....	60
OBRÁZEK 60 ODCHYLKY - PLOCHA Č. 3.....	60
OBRÁZEK 61 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY – PLOCHA Č. 1.....	61
OBRÁZEK 62 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY – PLOCHA Č. 2.....	61
OBRÁZEK 63 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY – PLOCHA Č. 3.....	62
OBRÁZEK 64 MARSURF M 300.....	62
OBRÁZEK 65 UKÁZKA Z MĚŘENÍ DRSNOSTI.....	63
OBRÁZEK 66 MĚŘENÍ TVRDOSTI - PLOCHA Č. 1.....	64
OBRÁZEK 67 SCANY VLNITÉHO ŽEBRA.....	66
OBRÁZEK 68 MĚŘENÍ VÝŠEK ŽEBER.....	66
OBRÁZEK 69 MĚŘENÍ TLOUŠŤKY.....	67
OBRÁZEK 70 SCANY ZKOSENÝCH ŽEBER.....	68
OBRÁZEK 71 MĚŘENÍ JEDNOTLIVÝCH ÚHLŮ.....	68
OBRÁZEK 72 UKÁZKA NEVYROBENÉ SOUČÁSTI.....	82

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1	Hodnoty z 3. kontaktního měření
Příloha č. 2	Hodnoty z 3. kontaktního měření
Příloha č. 3	Hodnoty z 3. kontaktního měření
Příloha č. 4	Fotografie nevyrobené součásti

PŘEHLED POUŽITÝCH OZNAČENÍ A JEDNOTEK

OZNAČENÍ	JEDNOTKA	NÁZEV VELIČINY
Ra	[μm]	střední aritmetická hodnota odchylek profilu
Rz	[μm]	střední hodnota z absolutních hodnot výšek pěti nejvyšších výstupků a hloubek pěti nejnižších prohlubní profilu
Rt	[μm]	svislá vzdálenost od nejvyšší špičky k nejhlubší rýze profilu drsnosti na měřeném úseku
RSm	[μm]	aritmetický průměr šířek prvků
Rmax	[μm]	vzdálenost mezi dvěma čarami rovnoběžnými se střední čarou zjištěného profilu
Rq	[μm]	kvadratický průměr hodnot v rozsahu základní délky
t	[$^{\circ}\text{C}$]	teplota
P	[W]	výkon
H	[HRc]	tvrdost podle Rockwella

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

CNC	Computer Numeric Control
CAD	Computer aided design
SLS	Selective Laser Sintering
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
LENS	Laser Engineered Net Shaping

Úvod

V současné době je technologie 3D tisku čím dál tím více žádaná. I když se jedná o poměrně mladou technologii, je již běžně využívanou a není tedy problém se s ní setkat v řadě průmyslových odvětví.

Tato technologie se nejčastěji vykytuje ve strojírenství, a to jak v oblasti lehkého i těžkého strojírenství (konstrukce lodí, automobilů atd.), elektrotechnice, stavebnictví, ale také ve zdravotnictví, kde má tato technologie v posledních letech velké využití. Touto technologií jsou navrhovány a vyráběny různé druhy protéz, implantátů atd. V neposlední řadě je využívána v designu a uměleckém průmyslu.

Hlavním principem 3D tisku je vytvořit za co nejkratší dobu z 3D modelu reálnou a plně funkční součást v požadované kvalitě. Největším pozitivem této metody je možnost výroby součástí s komplikovanou geometrií, která by se konvenčními metodami nedala vyrobit, nebo by se vyráběla velice složitě.

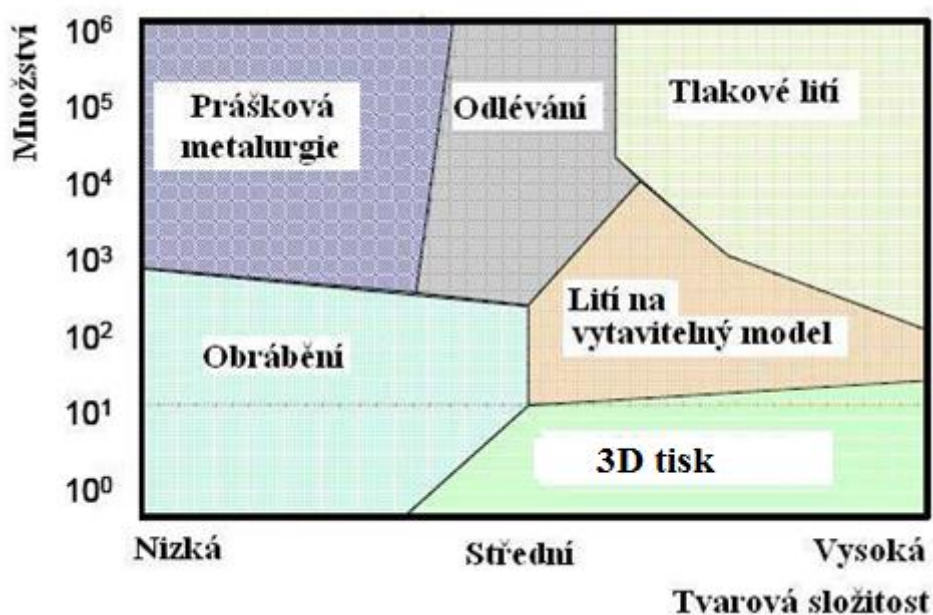
I přesto, že tato technologie může vyřešit různé problémy, co se vyrobiteľnosti součástí týče, jsou zde i určitá omezení, která při výrobě nastávají. Mezi tato omezení patří například přesnost tisku, nutnost stavby podpor, vhodná orientace součástí, zbytkové pnutí atd.

Cílem diplomové práce je definovat kritické prvky 3D tisku a tyto prvky zakomponovat do navrženého modelu. Na základě tohoto modelu bude vyrobena konkrétní součást, která bude následně v praktické části diplomové práce hodnocena z hlediska rozměrové přesnosti, jakosti povrchu a materiálových vlastností.

1 Úvod do problematiky

1.1 Základní informace

Technologie 3D tisku je založena na aditivním způsobu výroby, při němž je výrobek stavěn vrstvu po vrstvě bez potřeby lití, tváření nebo obrábění. Oproti obrábění, kdy postupným odebráním materiálu dochází k tvorbě konečného výrobku, je u 3D tisku výrobek stavěn odspodu směrem nahoru. K výrobě je potřeba tzv. 3D tiskárna, která pracuje podobným způsobem jako laserová nebo inkoustová tiskárna jen s tím rozdílem, že pracuje se speciálním materiálem, ze kterého součást vzniká. Všechny 3D tiskárny používají moderní CAD softwary, které určují průřez každé vrstvy a jak má být jednotlivá vrstva postavena. Na konci výrobního procesu dojde k odstranění nespotřebovaného materiálu, který je v některých případech možné použít pro další výrobu.



Obrázek 1 Využití technologie 3D tisku ve výrobě [1]

Postupným vývojem se od sebe oddělilo několik výrobních principů, které se liší v druhu používaného materiálu (kov, plast), formou polotovaru (drát, prášek), způsobu spojení (laser) atd. Existují výrobní metody, které jsou schopny vyrobít celou vrstvu naráz, jiné ji vytváří postupným nanášením jednotlivých „vláken“. Tyto odlišnosti mají za následek rozdílné stavební rychlosti, mechanické vlastnosti a dosahované přesnosti výrobků.

Přestože se tato výrobní technologie neustále vyvíjí, je stále více vyhledávaná. Technologií 3D tisku je možno vyrobit tvarově složité součásti, které jsou prakticky omezeny jen lidskou fantazií. [1]

1.2 Výrobní postup

Při výrobě součásti 3D tiskem se výrobní postup může u jednotlivých metod výroby lišit, ale v zásadě se skládá z následujících kroků:

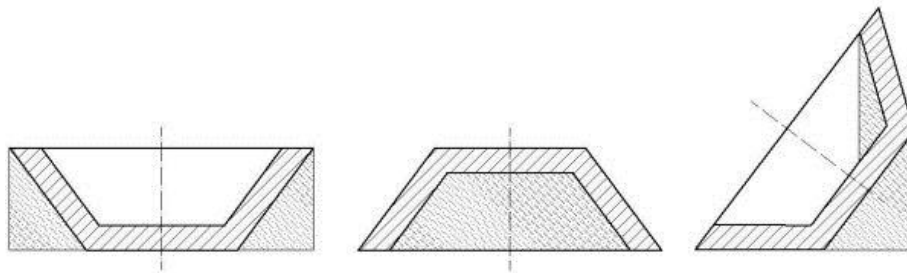
- Vytvoření 3D modelu
- Volba orientace modelu
- Převod na STL formát
- Výroba
- Očištění
- Dokončovací úpravy

1.2.1. Vytvoření 3D modelu

Pro tento krok je zapotřebí moderní CAD systém, ve kterém dojde k vymodelování požadované součásti. Velkou výhodou je, že technologie 3D tisku nepotřebuje speciální software, ale vystačí si s většinou běžně používaných 3D modelářů. [1]

1.2.2. Orientace modelu

Tímto krokem dochází k určení, v jaké pozici bude součást vyráběna. Jedná se o velice důležitý krok výroby, protože při volbě vhodné orientace musí být uvažovány výsledné mechanické vlastnosti, které jsou dány směrem jednotlivých vrstev. Dále se z tohoto kroku odvíjí objem podpor, které je potřeba vytvořit, například u převislých konců, vodorovných děr atd. Pokud je potřeba součást vyrábět s podporami, stoupá cena, objem součásti a i čas potřebný pro výrobu. U výrobních metod, u kterých je součást stavěna z práškového polotovaru, mohou být podpory vytvořeny ze stejného, ale nespečeného polotovaru. Další možností je využití úplně jiného materiálu, jehož mechanické vlastnosti umožňují jeho snadné odstranění. Při řešení orientace a umístění součásti v pracovním prostoru stroje je možné umístit několik součástí najednou a vyrobit je společně, což vede k úspoře vedlejších pohybů a také ke zrychlení výroby. [1]

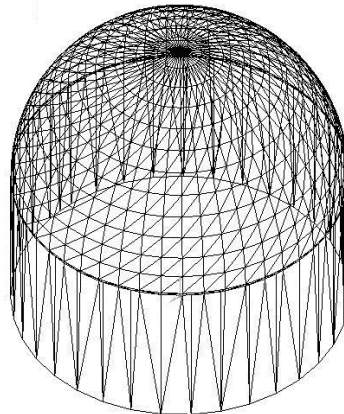


Obrázek 2 Příklady orientace součástí [1]

1.2.3. Převod na STL data

Aby bylo možné součást 3D tiskárnou vyrobit, je zapotřebí vytvořený 3D CAD model převést do formátu STL nebo do formátu podobného, který výrobní zařízení podporuje. Takto převedený model je zjednodušen a zakřivené plochy jsou nahrazeny trojúhelníky. Trojúhelníky jsou v souboru popsány pomocí normálového vektoru, který směřuje z tělesa ven pomocí tří vrcholů. Tvorba trojúhelníků podléhá dvěma pravidlům:

1. Vrcholy trojúhelníků nemohou ležet na některé straně jiného trojúhelníku
2. Každá strana trojúhelníku musí náležet i jednomu z dalších trojúhelníků



Obrázek 3 Proces nahrazení zakřivených ploch [1]

1.2.4. Výroba

Na začátku výroby dochází k nanášení několika vrstev podpurného materiálu z důvodu nepoškození a jednoduššího oddělení součásti od pracovní desky. Po vytvoření základní vrstvy následuje samotná výroba součásti. Touto metodou je možné vyrábět součásti malých

až středních rozměrů, u velkých rozměrů se naráží na problém malých pracovních prostor. U strojů, které pracují na principu spékání, je možné vyrábět kovové součásti zpravidla do 200 x 300 mm. [1]

1.2.5. Očištění

Po dokončení výroby a vyjmutí výrobku z pracovního prostoru je zapotřebí součást očistit od nespéčeného materiálu a odstranit podpory. K tomu dochází za pomoci mechanického očištění, nejčastěji ručním odlamováním nebo je možné využít například otryskání tlakovou vodou atd. [1]

1.2.6. Dokončovací úpravy

Stejně jako čištění i dokončovací operace se provádějí zpravidla ručně. U tvarově komplikovaných součástí se díky dokončování může doba výroby prodloužit i o desítky hodiny. Mezi dokončovací úpravy patří hlavně ty operace, při kterých dochází k úpravě konečné podoby povrchu součásti. Vytištěný výrobek bývá zpravidla pro další použití hrubý, a proto je nutné provést na konci procesu tyto úpravy. K těmto účelům se nejčastěji používají dva postupy a to lakování nebo broušení. Při lakování dochází k zalití nedokonalých prohlubní lakem a broušením jsou odbroušeny vzniklé výstupky. Další možností je natavování, při kterém dochází ke snížení drsnosti povrchu. Tento krok se dá aplikovat pouze u materiálů, které teplem měknou. Asi nejpoužívanější ze zmíněných postupů je broušení, u kterého je konečná kvalita povrchu podmíněna těmito faktory:

1. Drsnost na počátku
2. Tvrdost a druh broušeného materiálu
3. Doba broušení
4. Zrnitost abraziva

Asi nejvhodnější typ broušení je broušení pomocí tryskající vody obsahující abrazivum, protože hlavní výhodou této metody je možnost broušení vnitřních i špatně dostupných míst. [1], [2]

2 Rozbor současného stavu

2.1 3D tisk

Metoda 3D tisku je výrobní technologie, která slouží k výrobě kovových i plastových součástí. Je využíváno již zmíněného aditivního způsobu výroby, při němž je výrobek postaven vrstvu po vrstvě. Hlavní výhodou této metody je schopnost tvorby součástí, které mají velice složitou geometrii a které by se klasickými konvenčními metodami vyráběly velice komplikovaně. Bohužel i tato technologie má řadu nevýhod a omezení. [2], [3]

2.2 Klady 3D tisku

2.1.1. Komplikovanost výrobků

U klasických výrobních metod náročnost výroby roste spolu se složitostí součástí. Stejně tak jsou i větší požadavky na výrobní časy, potřebné strojní vybavení a nářadí, kvalifikaci obsluhy atd. U 3D tisku tomu je naopak, protože výroba jednoduché součásti zabere stejný čas, jako výroba součásti komplikované. Navíc je možné rozdílné součásti vyrobit při jedné operaci, na jednom stroji. K prodloužení výroby dojde i v případě, pokud se z důvodu lepšího provedení konkrétní části výrobku bude materiál nanášet v tenkých vrstvách. [1], [4]

2.1.2. Stavební rychlost

Při výrobě jednoduchých součástí je jistě výhodnější a hlavně i levnější využít klasických konvenčních metod. Stavební rychlost zásadně ovlivňuje výška a objem součást, počet a tloušťka vrstev. Dále má velký vliv požadovaná drsnost povrchu, použitá výrobní metoda a také typ výrobního zařízení.

Výrobní rychlost je možné zvýšit výrobou více součástí najednou. Důležité je dobře rozmístit součásti do pracovního prostoru. Tím dojde ke snížení času vedlejších pohybů. [1], [4]

2.1.3. 3D model

Zmíněnou technologií je součást vyráběna z 3D modelu. Nejsou potřeba přípravky, nástroje, není potřeba provádět složité výpočty, klesá riziko vzniku chyb v přípravě výroby a dochází i k zrychlení přípravné části výroby. Díky existenci 3D modelu, je v přípravné fázi výroby možné provádět různé změny a úpravy součástí. [1],[4]

2.1.4. Zásoby

Při výrobě součást vzniká z kovového prášku, proto není potřeba skladovat různé druhy polotovarů jako u konvenčních metod obrábění. Technologie využívá stejného polotovaru bez ohledu na složitost vyráběné součásti.

Bohužel i zde jsou jisté nevýhody a to například fakt, že tiskárna pro svou funkci potřebuje přibližně 80 kg prášku a to i v případě, že bude vyráběna malá součást. Tím pádem budou v materiálu uloženy velké finance, protože stavební prášek je velice nákladný. [4]

2.1.5. Gradientní materiály

Touto metodou je možné vyrábět i součásti z tzv. gradientních materiálů. U těchto materiálů se jejich vlastnosti mění v určitém směru podle požadavků uživatele. Těchto změn se dosahuje smícháním prášků různých vlastností. Pro využití tohoto materiálu, je potřeba stroj, který bude vybaven dvěma nebo i více tryskami, kterými bude stavební materiál přiváděn. Takto je možné vyrobit například bronzovou formu, které se bude chemické složení směrem dovnitř měnit v ocel. Takto vyrobená součást bude otěruvzdorná, bude dobře odvádět teplo, oproti formě, kde je ostrý přechod mezi bronzem a ocelí. [4]

2.3 Omezující parametry 3D tisku

K největším omezením této metody patří stavební materiály, rychlost výroby, cena a přesnost. Mezi omezení patří i vznik zbytkového napětí. Při výrobě dochází ke změně teplot a skupenství materiálu, vznikají deformace a napětí, která se velice složitě odstraňují. Jedním řešením je předehřev a přihřívání při výrobním procesu. Tímto způsobem nelze nepříznivé vlivy úplně odstranit, pouze dojde k jejich snížení. K dalším omezením patří nepřesnost, která je způsobena tloušťkou stavěné vrstvy.

Zmíněné vlivy je možno eliminovat za pomoci finálních úprav tzv. postprocessingu.

Tyto finální úpravy mohou ovlivnit výrobní čas, efektivnost i flexibilitu výroby. Čas výroby se přitom odvíjí od zvolené tloušťky vrstvy, na jejíž volbě se odráží i přesnost výroby. Nepříznivý vliv má i výrobní cena. Pořizovací cena výrobního zařízení je vysoká, stejně jako cena a příprava stavebního materiálu, proto se tato technologie využívá především v kusové a malosériové výrobě. [4]

2.4.1. Orientace součásti

Adekvátní výběr orientace části je důležitou součástí přípravného procesu, který přímo ovlivňuje stavební čas (produktivitu) i kvalitu součásti (schodišťový efekt).

Vytvoření STL soubor slouží jako vstup do softwaru pro výrobu součásti, kde následuje jeho další zpracování. V této fázi musí konstruktér určit, jak bude stavěná součást v pracovním prostoru uložena, jaká bude její orientace. To, jak je součást při stavbě orientována má velký vliv na její přesnost, kvalitu povrchu, stavební čas, potřebné množství podpůrných struktur a i na náklady, které jsou s výrobou spojeny. Proto nejvhodnější orientace musí být stanovena s ohledem na různé parametry, aby bylo dosaženo všech požadavků, které uživatel preferuje.

Asi nejvýznamnějším kritériem při volbě orientace je finální kvalita vytištěné součásti. Jak již bylo řečeno, jedná se o aditivní způsob výroby, proto se zde často vyskytuje tzv. schodišťový efekt, který ovlivňuje kvalitu výsledného sestavení. Tento efekt se nejčastěji objevuje na zakřivených a šikmých plochách a nepříznivě ovlivňuje jejich rozměrovou přesnost. Bohužel neexistuje žádný způsob, jak schodišťový efekt zcela odstranit. Lepšího účinku může být dosaženo snížením tloušťky jednotlivých vrstev a orientací součásti tak, aby byl tento efekt co nejvíce eliminován.

Pro řešení této problematiky byla provedena řada studií.

Například pánové Allen a Dutta vyvinuly metodu pro automatický výpočet nosné konstrukce a rozhodovací metodu pro nejvhodnější volbu orientace, která se volila ze zvoleného seznamu různých orientací.

Frank a Fadel navrhli expertní systém, který bere v úvahu různé parametry, které mají vliv na výrobu součásti. Tento systém pracuje se zadanými vstupními parametry a vytvořenou rozhodovací maticí, podle kterých systém doporučí nejvhodnější směr stavby a orientaci součásti v pracovním prostoru.

Hur a Lee vyvinuli algoritmus pro výpočet schodišťového efektu. Ten má za úkol vyčíslit procesní chyby podle objemu materiálu, který má být odstraněn, nebo přidán k součásti. Kromě toho umí vyčíslit celkový čas sestavení a objem nosné konstrukce. Optimální orientace je stanovena na základě výběru základních kritérií.

Pan Pham a kolektiv vyvinuli nástroj pro podporu rozhodování, který napomáhá uživatelům stanovit vhodnou orientaci součást. Je zde pracováno s řadou faktorů, jako doba stavby, náklady na výrobu, problematické rysy součásti (díry, osy, kritické plochy atd.), převislé konce, objem podpor atd. K jednotlivým kritériím je intuitivně přiděleno bodové ohodnocení. Následně dojde k vynásobení s body, které jsou přidělené ke každé variantě orientace.

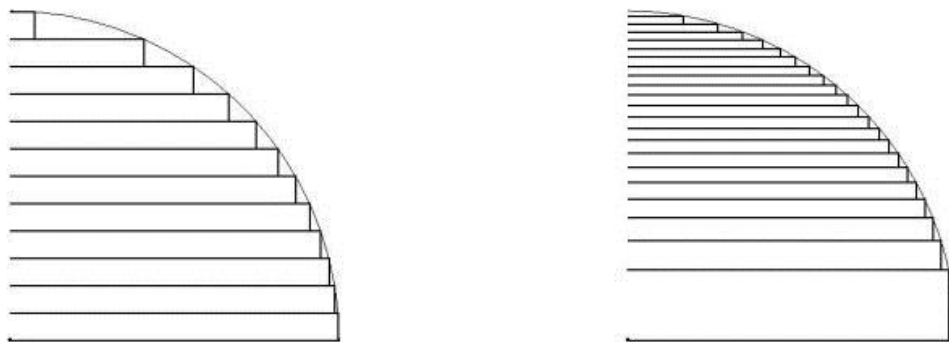
Orientace, která získá největší bodové ohodnocení je žádoucí pro orientace součásti v pracovním prostoru.

Pánové Masood a Rattanawong vyvinuli algoritmus pro výpočet velikosti objemové chyby, která je způsobena řezáním CAD modelu. Objemové chyby jsou počítány pro různé orientace otáčením okolo uživatelem zadaných os. Nejlepší orientace se pak stanoví jako součást s minimální objemovou chybou. [6]

2.4.2. Tloušťka vrstvy

Při porovnání součásti vyrobené 3D tiskem a součásti vyrobené například CNC obráběním, bude tištěná součást velice nepřesná. V literatuře je uváděna hodnota nepřesnosti 0,1 mm na vzdálenosti 100 mm. Tato hodnota se zásadně liší podle použitého materiálu i výrobní metody. Na přesnost velice negativně působí i tepelná dilatace materiálu, která je zapříčiněna natavováním stavebního materiálu.

Negativní vliv na přesnost má i princip této technologie, tedy stavba vrstvu po vrstvě. Jednotlivé vrstvy nejsou schopny vytvořit dokonale spojitou plochu a dochází místo toho k nahrazení schodovitým povrchem, který vzniká po okrajích součásti. Tento defekt se nejvíce projevuje při stavbě válcových těles, které mají vodorovnou osu. Částečným řešením je dostatečné zmenšení tloušťky jednotlivých vrstev. [4]



Obrázek 4 Ukázka součásti s různou tloušťkou vrstev [4]

Obvyklé bývá, že se při stavbě udržuje konstantní tloušťka vrstvy. Postup, kdy dochází ke stavbě s konstantní tloušťkou, je jednoduchý na použití a snadno se implementuje. Tento postup je široce využíván a ke změně parametrů dochází během výroby jen málokdy. Nicméně, při tvorbě součástí s konstantní tloušťkou vrstvy vznikají určité nedostatky. Je pravděpodobné, že na součásti budou chybět malé prvky a detaily. Kromě toho, konstantní

tloušťka vrstvy může zvýšit čas sestavení, protože neustálá aplikace minimální vrstvy je potřebná pro splnění požadavku na drsnost povrchu.

Pokud by byla použita proměnlivá tloušťka vrstvy, část výše uvedených problémů by mohlo být sníženo.

Stále ale platí pravidlo, že vždy je potřeba dodržovat tloušťku vrstvy, kterou doporučuje výrobce výrobního zařízení. Hodnoty jednotlivých tlouštěk se značně liší. Například u firmy Innomia je u výrobního stroje EOSINT M270 / M290 doporučovaná tloušťka vrstvy v rozmezí 20 - 40 μm , kdežto u výrobního zařízení Concept Laser M2 cusing, který dodává firma Misan, je doporučená tloušťka 20 - 80 μm . [21], [22]

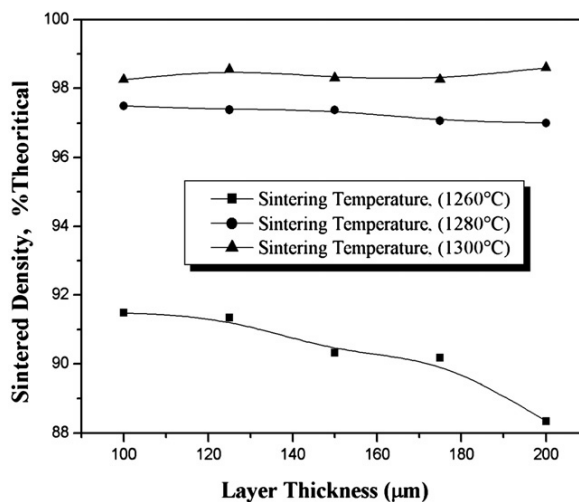
2.4.2.1. Tloušťka vrstvy a velikost zrna

Pánové M. Turker, D. Godlinski a F. Petzoldt se ve své studii zabývali vlivem výrobních parametrů při 3D tisku Inconelu 718. Chemické složení slitiny je uvedeno v Tab. č. 1.

Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	Mn	Si	C	B
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
52,6	18,8	-	5,3	3,2	0,93	0,49	0,12	0,28	0,043	0,004

Tabulka 1 Chemické složení Inconelu 718 [16]

Je mnoho parametrů, které je dobré změřit ještě před samotným tiskem. Jedná se například o měření velikosti částic, sledování jejich povrchu, hustoty atd. Například morfologie prášku byla studována pomocí elektronové mikroskopie. Pro studii byly zvoleny tloušťky jednotlivých vrstev: 100, 125, 150, 175 a 200 μm , které byly spékány při teplotách 1260, 1280 a 1300 $^{\circ}\text{C}$ po dobu 4 hodin. Následné měření hustoty a smrštění vyrobeného vzorku byly měřeny za pomoci Archimedovy metody. Mikrostrukturální vyhodnocení bylo provedeno za použití světelné a rastrovací elektronové mikroskopie. Stejně jako byly voleny různé tloušťky jednotlivých vrstev, byly voleny i různé hrubosti prášků. Při následném měření bylo zjištěno, že při výrobě vzorků z jemných prášků (20 μm) docházelo k problémům díky jeho velmi nízké hustotě, nekontrolovatelnému šíření nebo nadměrnému hromadění (aglomeraci). Lepší situace nastala u hrubých prášků (53 μm), kde nedocházelo k žádnému z výše zmíněných problémů, proto zbývající testy byly prováděny na základě pouze hrubého prášku (53 μm). [16]



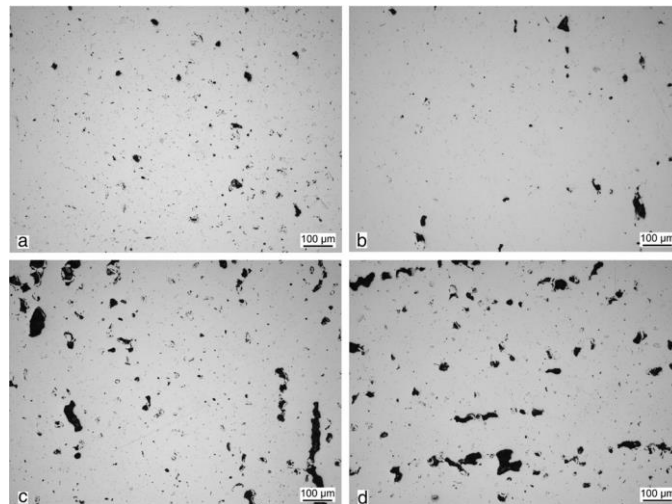
Obrázek 5 Závislost hustoty slinování na tloušťce vrstvy [16]

Experimentální výsledky ukázaly, v závislosti na výrobních parametrech, různé úrovně hustot spékání (88 - 98,5%). Při teplotě 1260 °C se hustota spékání v závislosti na tloušťce tištěné vrstvy pohybovala mezi 88 až 92 %. Bylo zjištěno, že vyšší hustoty se dosahovalo při nižších tloušťkách vrstev. Při zvýšení na teplotu 1280 °C, bylo dosaženo hustoty až 98 % a při teplotě 1300 °C byla dosažena hustota až 99 %.

Je velmi důležité dodat, že u žádné součásti nebylo následně provedeno tepelné zpracování. Výše uvedené výsledky ukazují, že získaná hustota je velmi slibným parametrem pro výroby vyráběné 3D tiskem.

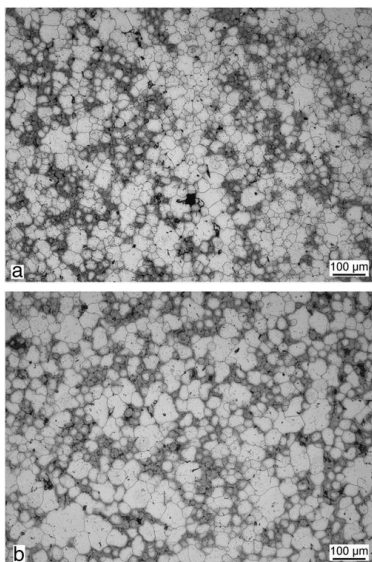
Pánové Godlinski a Pohl se ve své studii zabývali podobným problémem, kde zjistili, že při spékání při 1325 °C po dobu 2 hodin získali hustotu cca 90%. Při teplotě 1350 °C a době spékání 3 hodiny bylo dosaženo až 98 % hustoty. V druhém případě je součást srovnatelná se součástí, která by byla vyrobena například tvářením.

Na Obr.6 jsou zobrazeny leštěné průřezy vzorků Inconelu 718 spékaných při 1260 °C a při volbě různých tloušťek vrstev (100, 125, 150, a 200 µm). Všechny díly spékané při 1260 °C ukázaly značné množství pórovitosti bez ohledu na tloušťku vrstvy. Nicméně, vzorky vyráběny s tenčí tloušťkou vrstvy (100, 125 um), ukázaly nižší objem pórovitosti. Vzorky spékané při 1280 °C nebo 1300 °C neukázala téměř žádný pórovitost, zejména pro tloušťky vrstvy 100 nebo 125 um. [16]

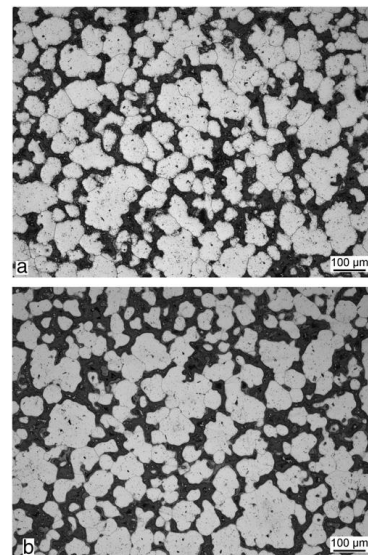


Obrázek 6 Vliv tloušťky vrstvy na mikrostrukturu Inconelu 718 při 1260 °C (a) 100 μm, b) 125 μm, c) 150 μm, d) 200 μm. [16]

Leštěné a leptané povrchy vzorků spékaných při 1260 °C vykazovaly velmi jemnozrné struktury, které obsahovaly stopy podélné pórovitosti (obr. 6). Vzorky vyráběné při tloušťce vrstvy 100 μm vykazovaly mírně vyšší objemový podíl pórovitosti ve srovnání se vzorky vyrobené při tloušťce vrstvy 125 μm. Téměř všechny póry zmizely po navýšení spékační teploty na 1280 °C (obr. 7, 8) a 1300 °C. [16]



Obrázek 7 Mikrostruktura při 1280 °C a) 100 μm, b) 125 μm [16]



Obrázek 8 Mikrostruktura při 1300 °C a) 100 μm, b) 125 μm [16]

Výsledkem této studie bylo zjištění, že pro tisk Inconelu 718 byla nejvýhodnější tloušťka vrstvy 125 μm. Dalším zjištěním byl fakt, že pro výrobu metodou 3D tisku je vhodnější hrubý prášek a to převážně z důvodu nekontrolovatelného šíření prášku jemného. [16]

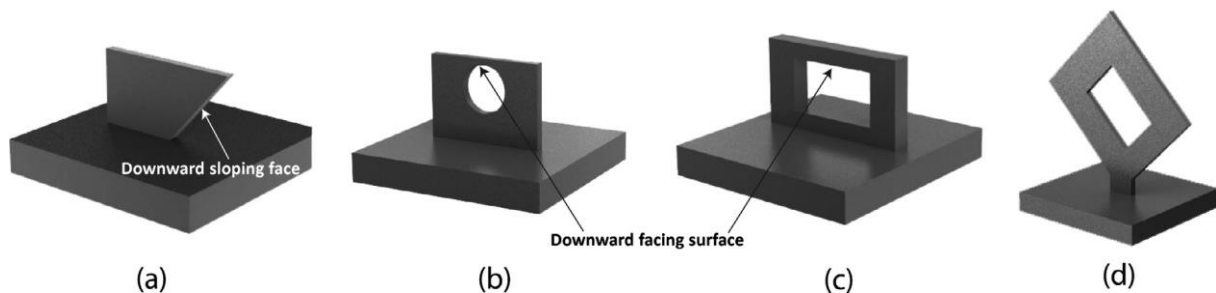
2.4.3. Stavba podpor

Při aditivním způsobu výroby je zapotřebí, aby bylo možno další stavěnou vrstvu k něčemu postavit, přitavit atd. Problém nastává v případě, když je zapotřebí vytisknout takový tvar, který je převislý. K tomu je zapotřebí využít tzv. podpory.

Podpory bohužel zvyšují potřebný čas výroby a také čas následujícího zpracování (očištění, dokončovací úpravy). Pokud je možné snížit množství podpor, dojde ke zvýšení účinnosti výrobního procesu.

Pro zlepšení udržitelnosti a kvality kovových konstrukcí je důležitý geometrický návrh a optimalizace nosných podpor. Jedním z nejvíce účinných způsobů, jak snížit množství podpor, je orientace součásti do optimální polohy. Například pánové Allen a Dutta se ve své studii zabývali problematikou orientace součásti pro výstavbu s minimálním množstvím podpor. Nejvhodnější orientace se následně vybírala ze seznamu kandidátů pomocí algoritmu, který pánové sestavili.

Jak již bylo řečeno, stavba podpor se provádí převážně z důvodu existence převislých konců. Jako převislé konce jsou brány prvky, které nejsou během stavby podepírány. Na tuto problematiku má vliv již zmíněná orientace součásti, protože v případě jiného natočení nebo umístění součásti se tyto parametry rázem změni. [10]



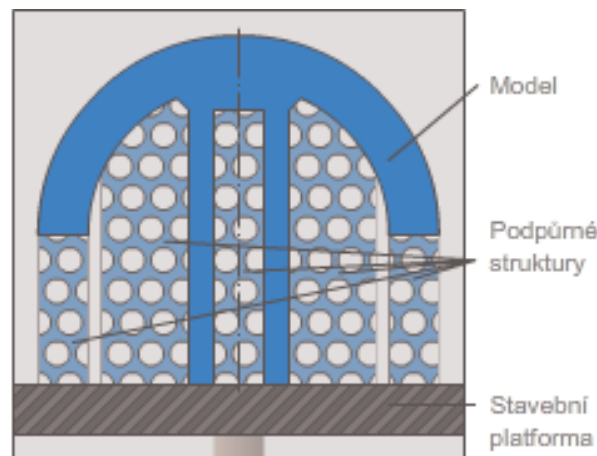
Obrázek 7 Příklady převislých konců [10]

Bohužel v některých případech se ani sebelepší volbou orientace podporám není možné vyhnout. Mezi hlavní nedostatky, které často nastanou během jejich vzniku, je deformace součásti nebo vznik tzv. schodišťového efektu. Rozsah schodišťového efektu převážně ovlivňuje konstantní tloušťka vrstvy. Deformace součásti je další efekt, který není možné zanedbávat. K tomuto jevu může dojít díky tepelnému napětí, které je způsobeno rychlým tuhnutím prášku. [10]

2.4.3.1. Podpůrné struktury

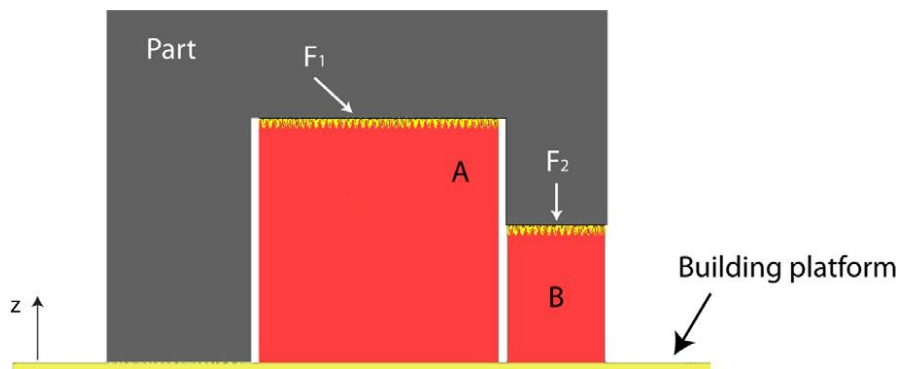
Struktury jsou vygenerovány softwarem jako podpory, jejichž tvar je takový, že je lze jednoduše odlamovat. Tyto podpory udrží výrobek do té doby, dokud se nespojí do jednoho kusu. Podpory jsou automaticky generovány softwarem, ale je možno si je i libovolně vymodelovat. V tomto případě je nutná znalost umístění, která může následně usnadnit práci při jejich odstraňování.

Hlavní výhodou podpůrných struktur je jejich nižší cena, než je cena podpůrného materiálu. Dále je to možnost automatického generování. Bohužel i zde jsou jisté nevýhody a to například riziko poškození součásti při odstraňování struktur. Může nastat i situace, kdy umístění struktur bude tak komplikované, že je nebude možno odstranit. [7], [10]

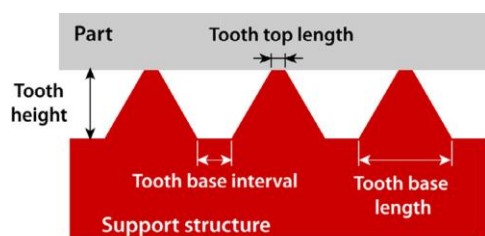


Obrázek 8 Ukázka podpůrných struktur [7]

Na Obr. 11 je zobrazena další ukázka podpůrných struktur (A a B), které mají za úkol podepřít povrchy F1 a F2, které jsou zde převislými konci. Struktura B je zde využita z důvodu podepření povrchu F2, protože při jeho výrobě nejsou počáteční vrstvy připojeny k hlavnímu tělesu. Ve stejnou chvíli může podpůrná struktura B zabránit deformaci, která může během výroby nastat. Podpůrná struktura může být rozdělena do dvou funkčních oblastí a to na zuby a hlavní nosnou konstrukci (Obr. 12.). Přidané zuby značně usnadňují podepření a také zajišťují lepší kvalitu povrchu součásti. Nicméně pokud jsou zuby příliš blízko sebe, může nastat problém s odstraňováním podpor, stejně tak pokud jsou zuby příliš daleko od sebe, mohou způsobovat větší deformace stavěné součásti.

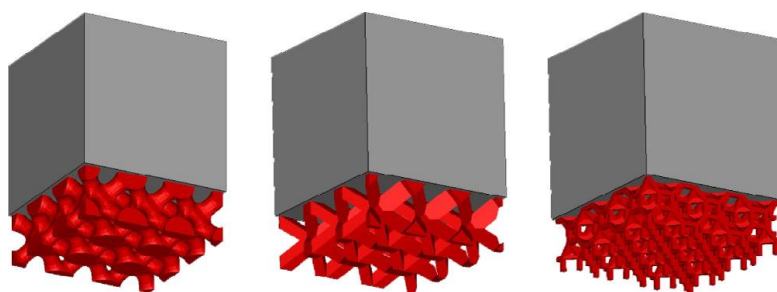


Obrázek 9 Popis podpůrné struktury [10]



Obrázek 10 Popis podpůrné struktury [10]

Je možné implementovat různé typy podpůrných struktur, příkladem mohou být struktury zobrazené na Obr. 13. Tyto struktury jsou charakteristické jednoduchou vyrobiteľností, i když u některých docházelo již během výroby ke vzniku defektů. Ty byly způsobeny tenkostí jednotlivých vzpěr, které struktury spojovaly. Při návrhu podpůrných struktur je potřeba zvážit mnoho faktorů. Cílem je, aby struktury byly jednoduše a rychle vyrobiteľné, snadno odstranitelné a aby vykazovaly dobré tepelné a mechanické vlastnosti, při zajištění spolehlivé stavby součástí. [10]

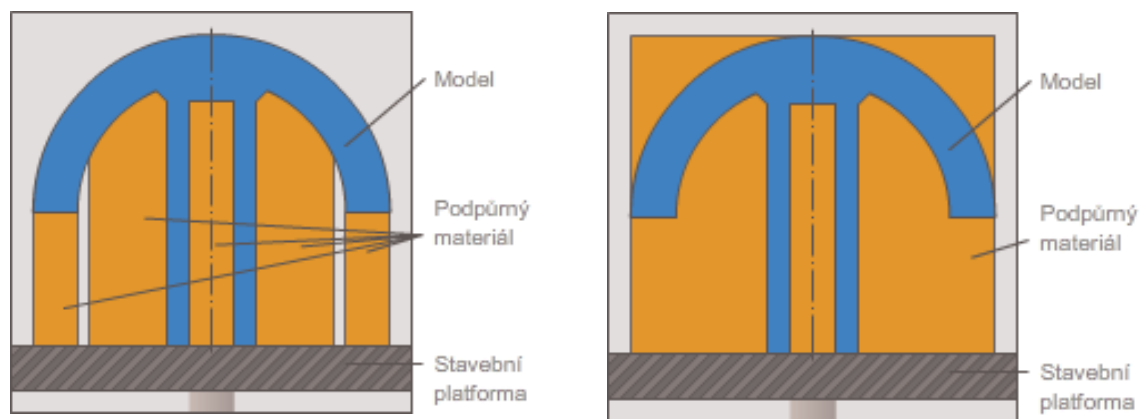


Obrázek 11 Příklady podpůrných struktur [10]

2.4.3.2. Podpůrné materiály

Používají se ze stejného důvodu jako podpůrné struktury. V tomto případě je ale nutné, aby byla 3D tiskárna vybavena speciální jednotkou pro nanášení podpůrného materiálu. Vyjímkou jsou práškové materiály, které se používají například u metody DMLS, SLS atd. Zde k těmto účelům slouží nespečený stavební materiál, který se nachází v okolí stavěné součásti. Takto použitý prášek se po dokončení výroby odstraní za pomoci vzduchu.

Hlavní výhodou podpůrných materiálů je fakt, že při jejich odstraňování nedochází k případnému poškození součásti a také možnost jeho opakovatelného použití. Mezi nevýhody patří jejich finanční náročnost a také potřeba, aby touto technologií byla 3D tiskárna vybavena. Dále je to potřeba použití dalšího vybavení pro odstranění podpůrného materiálu. [7]



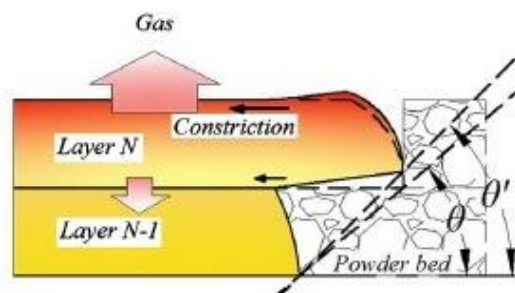
Obrázek 12 Ukázka použití podpůrného materiálu [7]

2.4.3.3. Problematika převislých konců

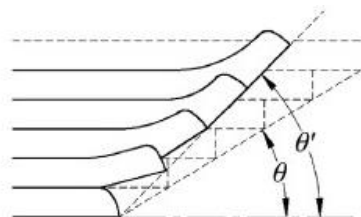
Při stavbě součásti s převislými konci často nastává problém při volbě úhlu převisu, který je ještě možné bez problémů vytisknout. Proto pan Wang a kolektiv provedli studii, kde sledovali, jaký vliv má úhel mezi převisem a základnou na kvalitu vyráběné součásti.

Bylo vytištěno několik jednoduchých součástí, které se lišily pouze zmíněným úhlem. Následně se ukázalo, že u součástí, které měly úhel převisu nad 40°, nenastal žádný výrazný problém. Ty se projevily až u úhlů 35°, kde se začaly objevovat roztřepené hrany. K těmto vadám došlo díky rychlému ochlazování, které způsobovalo tepelné pnutí, jehož důsledkem je trvalá deformace součásti. Protože se zde nepoužily podpory, které zajišťují pevnou polohu, docházelo k nedostatečnému propojení jednotlivých vrstev.

Pan Wang proto hledal parametry, které by mohly mít zásadní vliv na kvalitu tištěného převislého konce. Jedním z hlavních problémů je zbytkové napětí, které se vyskytuje v převislé části. Vznikne tam pak úhel, který je větší než úhle plánovaný (obr. 15). Jakmile tento defekt nastane, další stavěná vrstva bude vadu ještě více umocňovat, protože bude stavěna na již deformovanou plochu. Takto vyráběný převis bude více náchylný k mechanickému porušení, protože vrstva prášku bude v tomto místě oslabena a je zde riziko opětovného natavování už jednou spečené vrstvy (obr. 16). [8]

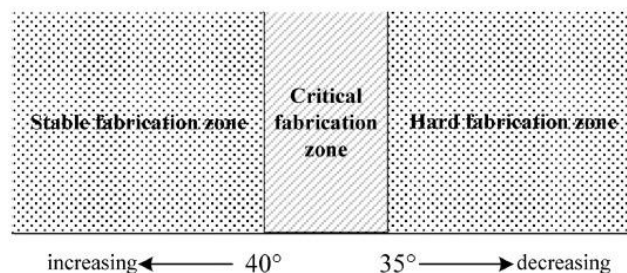


Obrázek 13 Princip deformace [8]



Obrázek 14 Ukázka akumulace deformace [8]

Ze zmíněných důvodů vyplývá, že při navrhování převislých konců je potřeba se vyhýbat úhlům odklonu od stavební základny menším jak 40° . Podle výše popsaných výsledků je rozhodujícím úhlem pro kvalitu struktury úhel sklonu 40° a 35° . Výsledek ze studie je možné rozdělit do 3 zón (Obr 17). Pokud je úhel menší, než je úhel kritický, je velké riziko vzniku deformace. [8]



Obrázek 15 Rozdělení výrobních zón [8]

2.4.4. Rychlost tisku a výkon laseru

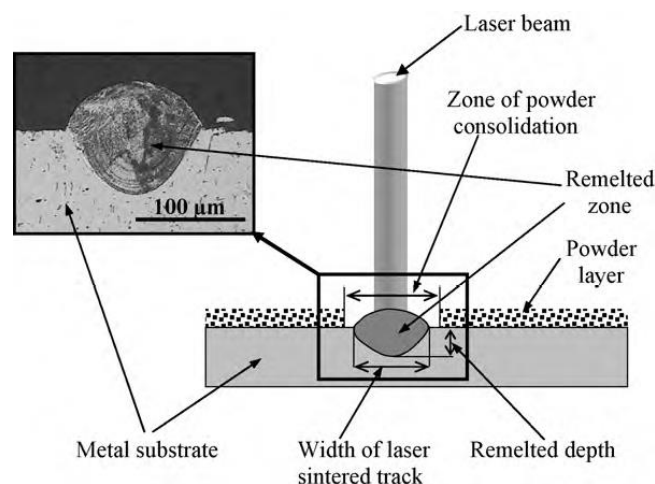
Pokud má být technologie 3D tisku zařazena do průmyslové výroby skutečných komponent, je potřeba, aby bylo dosaženo vysokých mechanických vlastností vyrobených součástí. Konečné vlastnosti vyrobených dílů silně závisí na každé jednotlivé laserem vyrobené dráze a vrstvě.

Rychlostí tisku a výkonem laseru se ve své studii zabýval pan I. Yadroitsev a kolektiv. Optimální poměr mezi výkonem a rychlostí tisku pro tloušťku vrstvy 50 μm byl určován pro nástrojovou ocel 304 L, korozivzdorné oceli 316L, nástrojové oceli H13, Inconel 625. [12]

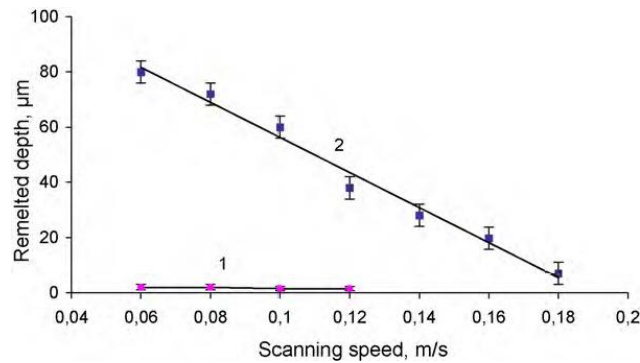
2.4.4.1. Materiály a experimentální postup

Hlavní charakteristiky výrobního zařízení jsou následující: Maximální výkon laseru $P = 50$ W, maximální rychlost tisku 3 m/s, minimální tloušťka vrstvy 5 μm (pro jemné prášky). Výrobní zařízení bylo vybaveno pracovní komorou, která byla naplněna dusíkem, který funguje jako ochranný plyn. Provozní teplota uvnitř komory byla stanovena na 80 °C. Všechny používané prášky byly charakteristické vysokou kulovitostí jednotlivých částic.

U materiálu 304L byly jednotlivé dráhy produkovány při výkonu laseru 25 a 50 W a při stavebních rychlostech, které se pohybovaly v rozmezí 0,6 - 0,24 m/s a 0,3 - 0,12 m/s. Tloušťka nanesené vrstvy byla 50 μm . Šířka jedné dráhy byla v rozmezí od 100 do 130 μm a šířka pásma natavení prášku bylo v rozmezí od 130 do 260 μm (Obr. 18). Pásmo natavení se zmenšuje s klesající rychlostí tisku. [12]



Obrázek 16 Průřez laserové stopy [12]



Obrázek 17 Závislost rychlosti tisku na hloubce přetavení [12]

Fischer a kolektiv definovali přibližný čas homogenizace potřebný pro dosažení tepelného průniku částic takto:

$$\Delta t_h \cong r_2 / \alpha$$

r.. poloměr částic

α .. tepelná vodivost kovového prášku

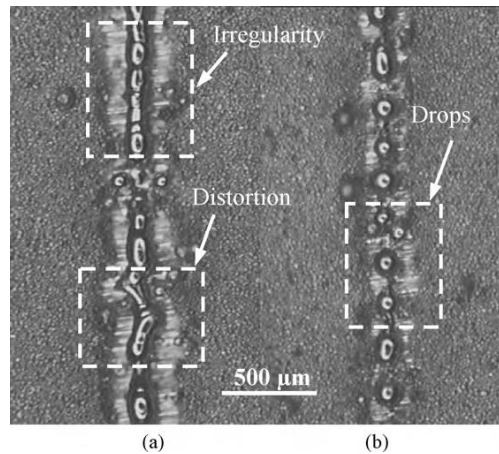
2.4.4.2. Nestabilita tavné lázni při nízké rychlosti tisku

Nestabilita tavné lázni při nízké rychlosti tisku byla studována například u korozi-vzdorné oceli 316L. Dráhy byly tvořeny při výkonu laserového paprsku 12,5 - 50 W a při rychlostech tisku, které se pohybovaly v rozmezí 0,2 - 0,22 m/s s krokem 0,04 m/s. Tloušťka vrstvy byla 50 μm. Pro každé vstupní parametry výkonu a rychlosti byly vytištěny 3 dráhy. Při zvýšení příkonu na jednotku délky (P/v) při relativně vysokém výkonu laseru a malé rychlosti tisku, byl proces doprovázen zvýšením objemu taveniny a zároveň snížením její viskozity. Dynamika tavenina se stává stále důležitější, protože objevuje nesrovnalosti spečených drah. Při menším výkonu laseru, při malé rychlosti tisku, je energie k roztavení prášku nedostatečná a stabilizační účinek zmizí. Při nízké rychlosti (výkon laseru 25 W a stavební rychlost je menší než 0,06 m/s) se materiál neroztaví do hloubky a dráhy se stávají nestabilní a nepravidelné. Pokud je výkon laseru 50W a rychlost tisku je > 0,20 m/s dochází k podstatně lepšímu natavení a tím pádem vzniká pravidelnější a stabilnější tištěná dráha.

2.4.4.3. Optimální parametry tisku pro různé druhy kovových prášků

Pro tloušťku nanosené vrstvy prášku 50 μm a výkon laseru 50 W mohou být tištěny součásti: Materiál 316L mohl být tištěn při $v = 0,08 - 0,20$ m/s a 904L při $v = 0,06 - 0,18$ m/s. Také pro výkon laseru 25 W, byly vytvořeny souvislé dráhy. Z materiálu 904L při nižší rychlosti tisku $v = 0,06 - 0,09$ m/s a 316L při $v = 0,10 - 0,12$ m/s. Skupenské teplo tání ovlivňuje tepelnou

bilanci materiálu. Materiál 904L má vyšší skupenské teplo tání, což je důvod, proč kontinuální dráhy materiálu 904L jsou vytvořeny při nižší rychlosti tisku než u materiálu 316L. Výsledky získané pro materiál 316L při tloušťce vrstvy 50 μm jsou zobrazeny na Obr. 20. Byla zvolena rychlost tisku $v = 0,02 \text{ m/s}$ a výkon laseru 25 W a 12,5 W.



Obrázek 18 Tloušťka vrstvy (a) P = 25 W, (b) P = 12,5 W. [12]

Optimální rychlosti tisku byly nalezeny při výkonu laseru 50 W. Při tomto výkonu, tloušťce vrstvy 50 μm vznikaly u materiálů 904L, 316L, nástrojové oceli H13 i slitiny Inconelu 625 kvalitní a spojitě dráhy.

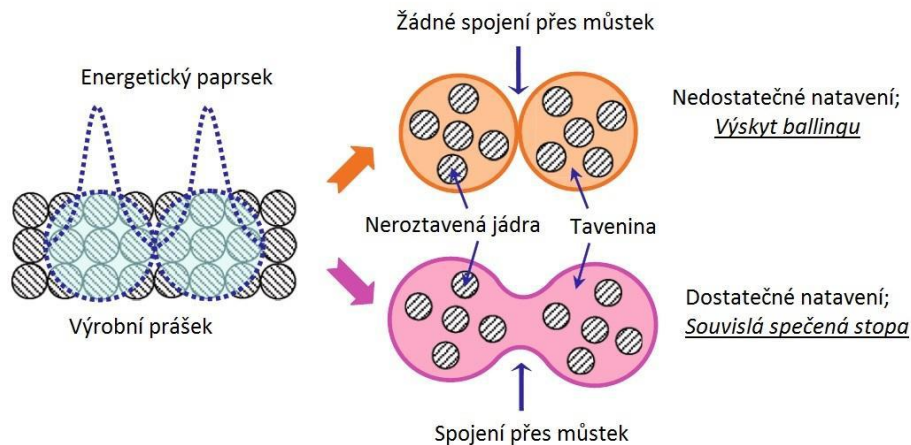
Při testování jednotlivých kovových prášků se vyskytovaly dvě situace. Vznikaly buď stabilní, spojitě dráhy anebo dráhy nestabilní. Nestabilita se projevovala při nízkých rychlostech tisku a to formou porušení drah a jiných nesrovnalostí. Dále bylo také zjištěno, že při přehnaně vysokých rychlostech tisku docházelo ke vzniku tzv. ballingu. [12]

2.4.5. Balling

Jelikož aditivní proces výroby je velice složitý, logicky se zde vyskytují určité překážky a problémy, které brání ke vzniku vysoce kvalitních dílů. Jedním z nežádoucích jevů je tzv. balling. Tento jev má velký vliv na kinetické a termodynamické vlastnosti během procesu spékání. Při aditivním způsobu výroby vzniká součást postupným nanášením jednotlivých drah, které se pak mění v jednotlivé vrstvy. Díky nepříznivému vlivu ballingu může nastat situace, že jednotlivé dráhy nebudou dostatečně propojeny. Jakmile dojde při výrobě k tomuto jevu, dochází k závažnému poklesu vlastností součásti.

Balling se může vyskytovat ve dvou formách. První druh ballingu vzniká při natavení pouze povrchu zrn prášku. Tento stav nastane například při použití laseru o nízkém výkonu. Zrna

jsou spojena do celků, které jsou velké přibližně jako průměr laserového paprsku. Spečené celky nejsou na pevně spečeny nebo jsou spojeny pouze tenkými můstky (Obr. 21)

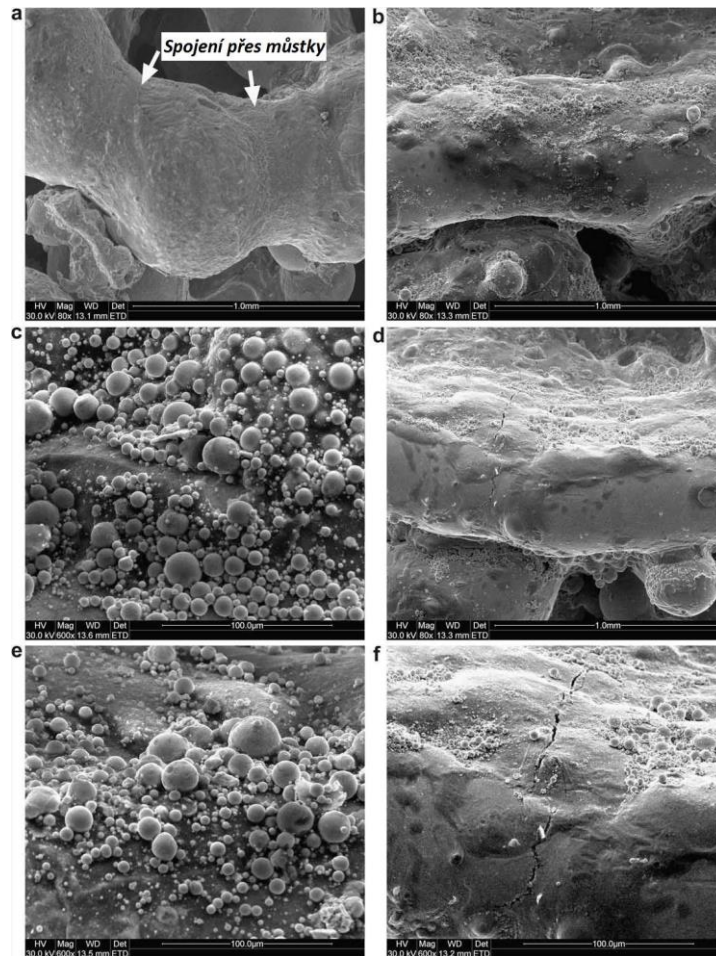


Obrázek 19 Schéma prvního druhu ballingu [13]

V případě, že energie laseru je větší, než je potřeba k tvorbě celků s můstkem, dochází tak ke vzniku spojení pomocí silného můstku. Tímto způsobem vznikne spečený celek bez výskytu ballingu.

Druhá forma ballingu je charakteristická kulovitými útvary, které se ve větším množství vyskytují již na spečené vrstvě. Tento jen nastává díky vysokému výkonu, který je například 400 W a také díky rychlosti tisku, například větší než 0,07 m/s. Pokud roste rychlost tisku, hustota laserové energie klesá a to způsobuje pokles pracovní teploty a logicky klesá i šířka roztavené dráhy. Roztavený prášek se stává nestabilní a kapičky taveniny mají tendenci stříkat do okolního prostoru z důvodu snížení povrchové energie roztaveného materiálu. Tyto jevy vedou k druhému typu ballingu.

Na Obr. 22 jsou zobrazeny různé druhy spečení materiálu v závislosti na rychlosti tisku. Pokud je udržován vysoký výkon laseru a vyšší rychlost tisku (nad 10 m/s), kromě ballingu se v tavenině objevují praskliny (d, f). Na fotografii (a) je zobrazena struktura, kde není žádný výskyt ballingu. To je způsobeno nižší rychlostí tisku (0,05 m/s), díky které mezi spečenými celky vznikly dostatečně velké můstky. Jakmile rychlost tisku vzrostla nad 0,07 m/s tištěný povrch se začal stávat hrubým (b). Pokud by byla struktura více zvětšena, bylo by na povrchu patrné, že se zde objevují malé kulovité útvary, které mají velikost cca 10 μm (c) a mohou mít vliv na spečení jednotlivých sousedních vrstev. V případě ještě vyšší rychlosti tisku (0,1 m/s) na povrchu vznikají podstatně větší kulovité útvary a zároveň se zde vyskytují opět trhliny (d, e, f). [13]



Obrázek 20 Ukázka spečených drah při různých rychlostech tisku [13]

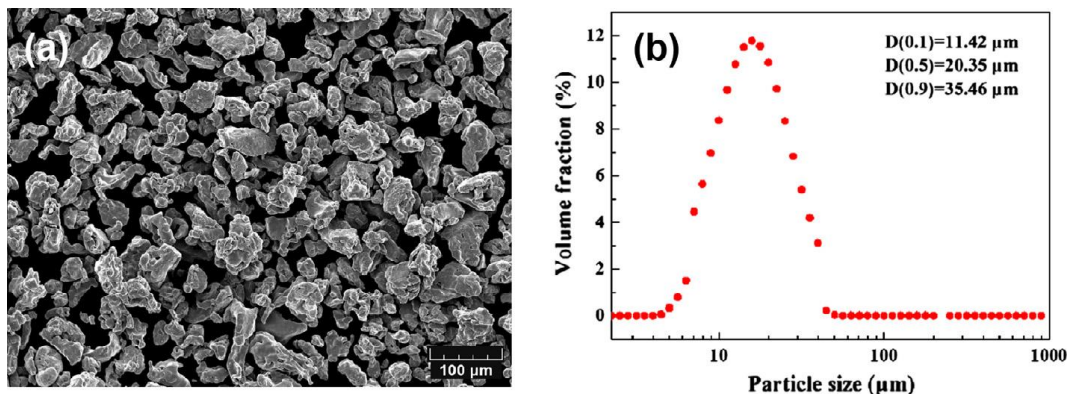
2.4.6. Zbytkové pnutí

Při selektivním laserovém spékání se ve stavěných dílech snadno hromadí velké množství napětí. Tento nepříznivý jev je důsledkem rychlého ohřevu a následného ochlazení, což je škodlivé pro mechanické vlastnosti součástí. Zbytkové pnutí se zjišťuje například odvrtávací metodou, rentgenovou metodou, neutronovou difrakcí atd. Většina z těchto metod jsou složité, finančně i časově náročné.

Ve studii, kterou se zabýval pan Bo Song, byly součásti následně tepelně ošetřeny z důvodu právě odstranění zbytkového pnutí. Výsledky ukázaly, že krystalická struktura železa se po spékání a následném tepelném zpracování nezměnila. Po žíhání ve vakuu došlo ke snížení pnutí a zjemnění zrna. Modul pružnosti u žíhaných vzorků se snížil na 188 ± 10 GPa a konečná pevnost v tahu se výrazně zlepšila z 357 ± 22 MPa až na 401 ± 23 MPa. Mez kluzu se zvýšila z 256 ± 17 MPa až na 352 ± 21 MPa. [14]

2.4.6.1. Postup experimentu

Kovový prášek byl dodán společností Hoganas, částice měly prizmatický tvar (Obr. 21a).



Obrázek 21 (a) Tvar částic, (b) distribuce velikosti železného prášku. [14]

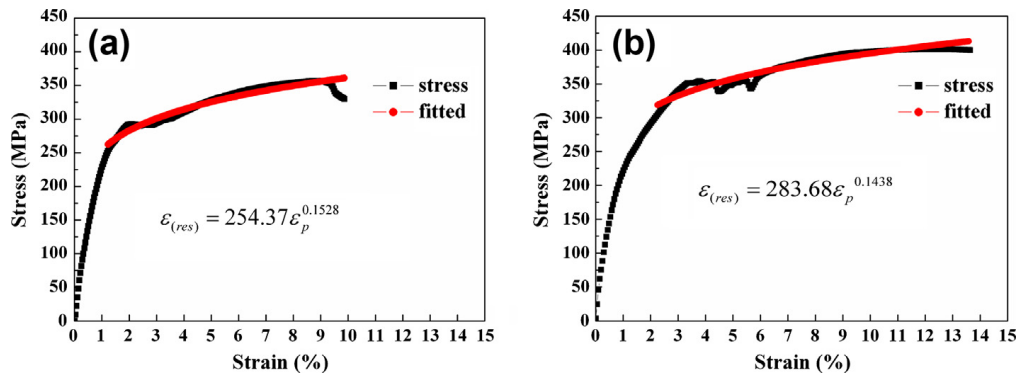
Jako základní platforma byla použita deska z nerezové oceli o rozměrech 25 cm x 25 cm x 5 mm. Laserovým zdrojem byl YLR-100-SM a pracovní komora poskytovala uzavřené prostředí, které bylo naplněno argonem, jehož výstupní tlak byl 10 mbar. Argon funguje jako ochranný plyn, jehož úkolem je udržet obsah kyslíku nižší než 0,2 %, aby nedošlo během výrobního procesu k oxidaci železa.

Pro experiment byly zvoleny tyto parametry: průměr laserového paprsku 34 µm, výkon laseru 100 W, tloušťka vrstvy 50 µm, rychlost tisku 0,33 m/s.

Kvůli vakuovému tepelnému zpracování, byly vzorky zahřívány na 640 °C s rychlostí ohřevu 20°C/min. Na této teplotě byly drženy po dobu 2,5 hodiny a poté docházelo k ochlazení v peci na teplotu okolí. Průřezové mikrostruktury vzorků byly zkoumány pomocí optického mikroskopu. Tahové zkoušky byly provedeny jak pro zhotovené tak i žíhané vzorky s rychlosti zatěžování 35,2 MPa/s. Lomové plochy byly pozorovány pomocí elektronového mikroskopu. Tvrdost podle Vickerse byla měřena na základě zatížení 200 kg po dobu 15 s. Každá průměrná hodnota tvrdosti se získala ze 14 měření. [14]

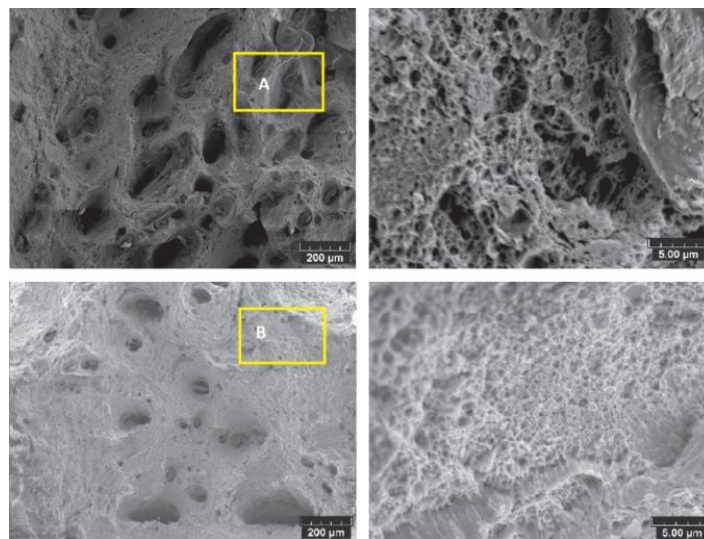
2.4.6.2. Pevnostní chování

Obr. 22 zobrazuje deformační křivky stavěných částic a částic žíhaných. Křivka odráží mechanický chování, včetně pružné deformace. Za normálních okolností se zvýšením napětí zvyšuje plastická deformace, až se dosáhne meze pevnosti v tahu, tedy vzniku lomu. Zároveň dochází ke zpevňování materiálu.



Obrázek 22 (a) Tahová křivka součásti, bez ošetření, (b) tahová křivka součásti, ošetřená žiháním

Po ošetření vakuovým žiháním, bylo zjištěno, že modul pružnosti se snížil z 208 ± 16 GPa na 188 ± 10 GPa. Kromě toho, mez kluzu prudce vzrostla z 256 ± 17 MPa na 352 ± 21 MPa. Mez pevnosti v tahu vzrostla z 357 ± 22 MPa na 401 ± 23 MPa. Vzhledem k tomu, že mez kluzu a mez pevnosti v tahu vzrostly, dále také došlo ke zjemnění zrna, které mohlo zlepšit pevnost a tažnost. Může být také odpovědné za zlepšení mechanických vlastností.



Obrázek 23 Struktury tahových lomových ploch [14]

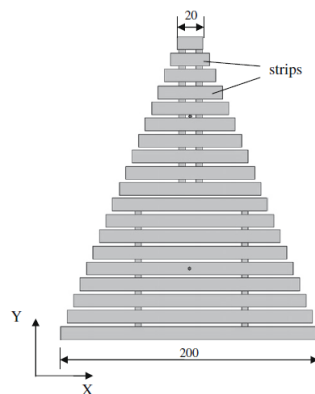
Obr. 23 ukazuje tahové lomové plochy tištěné součásti a tištěné žíhané součásti. Obr. 25 jsou zvětšené zóny A a B zobrazeny vždy na pravé straně obrázku. Je zřejmé, že oba vzorky vykazují tvárný lom, který je složen z malých i velkých důlků. Po vakuovém tepelném zpracování, je v žíhané struktuře mnohem více rovnoměrně rozložených jemných důlků. [14]

2.4.7. Smrštění

Během stavby součásti dochází k jejímu drobnému smrštění. Smrštění je silně ovlivňováno parametry laseru, stavební teplotou, teplotou v pracovní komoře, rychlostí ochlazování atd. Krystalické smrštění, ke kterému dochází v průběhu ochlazování, může být v jednotlivých směrech velmi nejednotné, může tedy docházet k velké expanzi smrštění během časového průběhu spékání.

Ve většině studií se zavádí předpoklad, že smrštění je nezávislé na geometrii a jeho hodnota je konstantní. Ve skutečnosti, smrštění dílů je velice citlivé na změny geometrie a je silně ovlivňováno strategií tisku. Například umístění součásti, její orientace, rychlost tisku, jsou faktory, které jsou obvykle opomíjeny. Všechny výše uvedené faktory je potřeba zahrnout ke zlepšení stávajícího procesu smršťování.

Pan K. Senthilkumaran se ve své studii zabýval procesem smrštění při výrobě součásti metodou SLS. Pro studii byla zvolena rychlost tisku až 4500 mm/s, z čehož vyplývá, že rychlost kompilace bude kratší. Průměr laserového paprsku byl 0,6 mm a hustota energie 26,66 kWh/m². Při výstavbě kontury byly používány nižší hodnoty výkonu laseru a rychlosti tisku ve srovnání s vnitřními drahami. Důvodem bylo dosažení dobré kvality povrchu. V případě, že vytištěnou část není možné ochlazovat v kontrolovaném prostředí po potřebnou dobu, součást se má tendenci kvůli rychlejšímu ochlazování (například venkovní prostředí) kroutit. Při rychlejším ochlazování vzniká značné napětí, díky kterému může docházet k deformaci součásti. Pokud by se součást nechala vychladnout např. po dobu 5 hodin uvnitř pracovního prostoru, tento jev by nenastal. Vzhledem k tomu, že smršťování je potřeba zkoumat pro různé nominální délky, tak by i vzorek měl obsahovat různé délky, viz obr. 24 [15].



Obrázek 24 Ukázka vzorku [15]

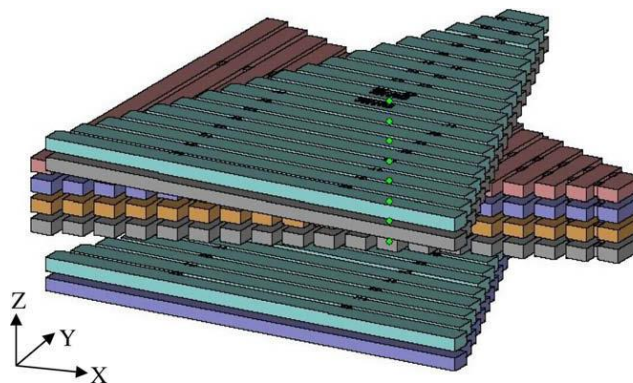
Vzorek má různé délky pásů, od 20 do 200 mm s přírůstkem 10 mm pro každý pruh. Pro experiment bylo potřeba spočítat odchylky od jednotlivých délek. Odchylka na délku (y) se počítala ze vztahu:

$$s = \frac{L_c - L_m}{L_c} \times 100$$

Kde L_c je jmenovitý rozměr součásti, L_m je měřený rozměr součásti po slinování a ochlazení.

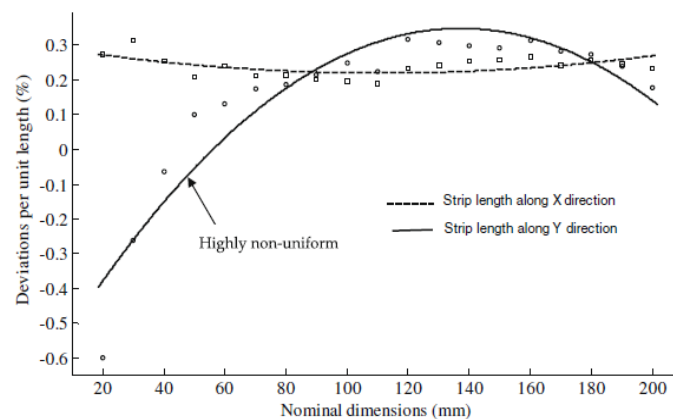
2.4.7.1. Vliv orientace součásti na odchylky na jednotku délky

Studie o změně orientace vzorku v rovině XY je důležitá z důvodu anizotropní povahy smrštění. Byly zvoleny dva vzorky, jeden vyrobený rovnoběžně s osou X a druhý vyrobený rovnoběžně s osou Y, viz Obr 25.



Obrázek 25 Orientace součásti [15]

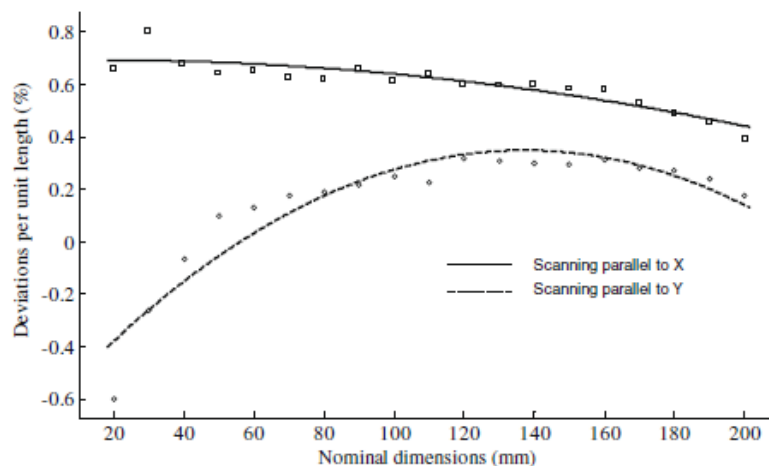
Odchylky na jednotku délky jsou vypočteny a zobrazeny na Obr 26. Smrštění podél osy X se pohybuje v rozmezí 0,2% až 0,3% pro různé délky pásů, smrštění podél osy Y se pohybuje mezi -0,4% až 0,35%. U vzorků tištěných podél směru osy Y odchylka roste strmě mezi hodnotami 20 a 120 mm a od hodnoty 120 mm postupně klesá. Jak je z grafu patrné, větší smrštění se projevuje ve směru osy Y a to například díky teplotnímu gradientu. Teplotní gradient ve stovební komoře, kolísání teplot během procesu stavby a následné chlazení se liší pro různou délku pruhu vzorku. Důvodem je kolísání hustoty energie. Například u delších pásů dochází k delšímu časovému intervalu stavby. Proces, než dojde k další stavbě na stejném místě, je podstatně delší než u krátkých pásů, kde je podstatně menší časová prodleva. [15]



Obrázek 26 Vliv orientace vzorku [15]

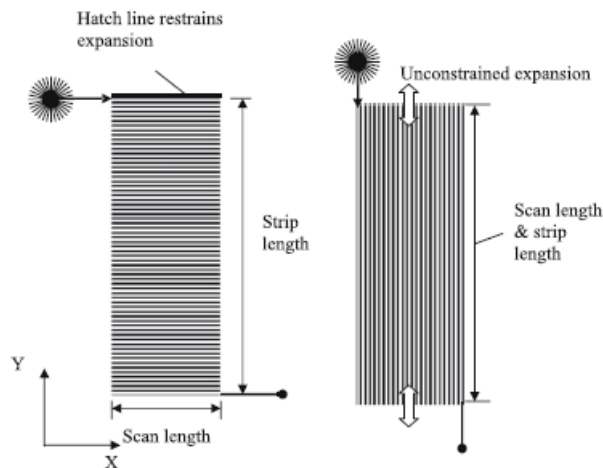
2.4.7.2. Vliv směru tisku na smrštění součástí

Ve zmíněné studii byly dráhy tištěny buď pouze ve směru osy X anebo pouze ve směru osy Y. Na Obr. 27 je zobrazeno procentuální smrštění na jednotku délku jak pro součást tištěnou ve směru osy X, tak i ve směru osy Y. U vzorku tištěného ve směru osy X bylo zjištěno větší smrštění a to v rozmezí 0,4 - 0,6%, kdežto u součásti, tištěné ve směru osy Y bylo zjištěno smrštění v rozmezí -0,4 - 0,35%. Tištěná délka ve směru osy Y je velice krátká a je konstantní pro všechny délky pásů. Na rozdíl od tištěné délky ve směru Y je u tisku ve směru osy X tištěná délka rovna délce pásu.



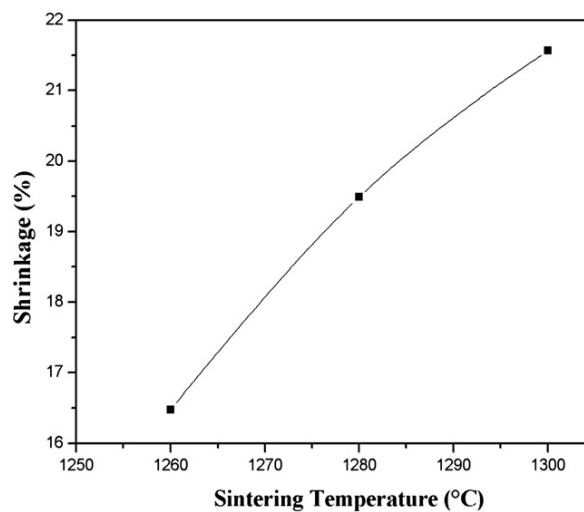
Obrázek 27 Procentuální smrštění [15]

Z grafu dále vyplývá, že při tisku ve směru osy X je smrštění sice rovnoměrnější, ale zato výraznější. Z druhé křivky, která představuje smrštění ve směru osy Y je patrné, že smrštění je sice nerovnoměrné, ale oproti ose X nabývá menších hodnot. [15]



Obrázek 28 Směr tisku [15]

Ve své studii pánové M. Turker, D. Godlinski, F. Petzoldt studovali smrštění součástí vyrobené se slitiny inconelu 718 při různých teplotách tisku. Byly zvoleny tři teploty: 1260 °C, 1280 °C a 1300 °C. Jak je vidět na Obr. 34 při teplotě 1260 °C bylo smrštění 16,5 %, při zvýšení na teplotu 1280 °C bylo smrštění 19,5 % a při teplotě 1300 °C dokonce až 21,5 %. Ze zmíněných výsledků vyplívám, že se zvyšující se teplotou roste lineárně i velikost smrštění součástí. [16]



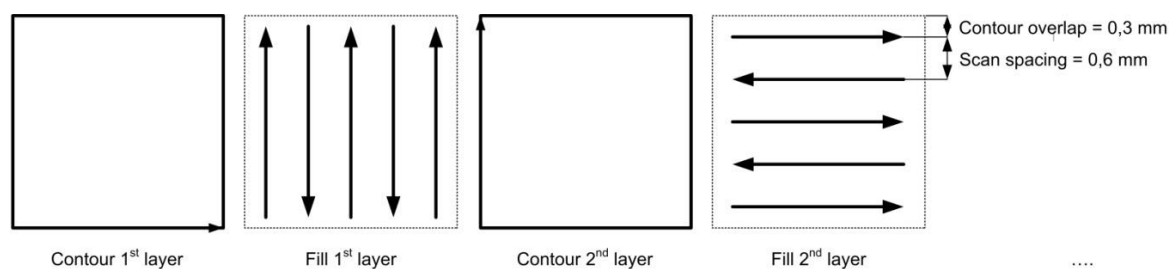
Obrázek 29 Smrštění Inconelu 718 v závislosti na teplotě [16]

2.5. Povrchové úpravy

Kovové součásti je možné vyrábět různými metodami. Jednou z metod je metoda LENS. Jedná se o spékání kovového prášku laserem. Kovový prášek je uložen v zásobníku, kde na něj tlačí stlačený plyn. Odtud je prášek dopravován do tavicí hlavy, kde je pomocí laseru taven. Následně je nanášen do pracovního prostoru, kde součást vzniká.

Nevýhodou této metody je špatná kvalita vzniklého povrchu, který obvykle vyžaduje dokončovací úpravy. Špatná kvalita je způsobena například schodišťovým efektem anebo také prachovými částicemi, které vyčnívají z povrchu součásti. Problematikou povrchových analýz se zabývala řada studií např. Pan Yasa a kol. ve své studii uvádí, že laserové přetavování funguje jako účinná strategie pro snížení drsnosti povrchu dílů vyrobených selektivním laserovým spékáním.

Povrchovými úpravami se zabýval i pan M. Rombouts a kol., který pro svůj experiment použili 7 kW IPG vláknový laser o průměru vlákna 600 μm . Jako stavební materiál byla použita nerezová ocel 316L, jejíž prášek byl ve výrobním zařízení stlačen pomocí argonu. Jako zkušební vzorky byly postaveny ploché destičky o tloušťce 8 mm. Strategie tisku je schématicky zobrazena na Obr. 30 a parametry procesu jsou v Tab. 2 [11]



Obrázek 30 Schématické zobrazení strategie tisku součásti [11]

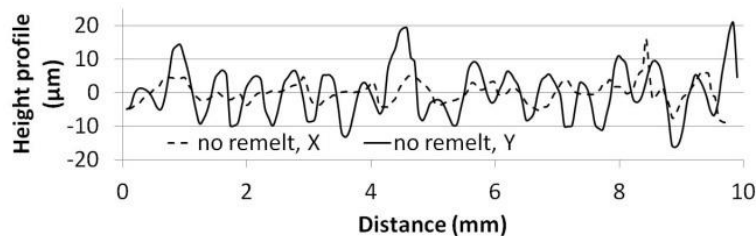
Výkon laseru (W)	Rychlost tisku (mm/min)	Tloušťka vrstvy (mm)	Proudění prášku (g/min)
550	750	0,45	2,3

Tabulka 2 Parametry procesu aplikované během nanášení prášku [11]

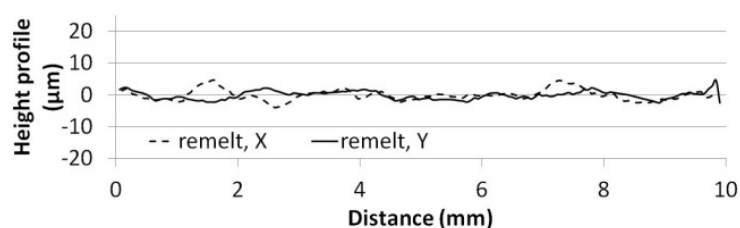
Prvním krokem bylo změření drsnosti horních a bočních ploch vtištěné součásti. Pro následné povrchové úpravy laserovým přetavováním byly použity různé výkony laserů. Boční plochy součásti byly přetaveny laserem o výkonu 500 W a rychlost tisku se pohybovala okolo 1000 mm/min. Získaná drsnost povrchu byla na délce 10 mm sledována profilprojektorem. Pro každý vzorek bylo provedeno měření na pěti místech a plochy byly analyzovány v různých směrech.

Výsledek procesu přetavování je zobrazen na Obr. 31, kde je znázorněn stav před úpravou součásti. Směr X odpovídá směru úpravy poslední vrstvy. Horní plocha vykazuje pravidelné

zvlnění ve směru kolmém ke směru nanášení poslední vrstvy (= směr Y). Bylo zjištěno, že povrch ve směru skenování (= směr X) je podstatně hladší, což je jasně vidět na obr. 32. [11]



Obrázek 31 Stav před úpravou [11]



Obrázek 32 Stav po úpravě [11]

Proces přetavování byl zkoušen i pro výkon laseru 200 W a rychlost tisku 500 mm/min. Bohužel při použití těchto parametrů nebylo možné přetavit povrch dostatečně hluboko, aby bylo možné pozorovat nějaké zásadní změny. Byly rovněž analyzovány boční plochy součásti. Zde byla použita jednoduchá rovnice pro určení aritmetického průměru drsnosti povrchu podél sklonu boční plochy (směr Y) a to s ohledem na schodišťový efekt:

$$Ra = \frac{1}{4} t \cos (90-\alpha)$$

Kde t je tloušťka vrstvy a α je úhel sklonu.

Hodnoty drsnosti byly předpokládány pro úhel sklonu 15° až 75° . Tato jednoduchá rovnice je brána pouze jako hrubé přiblížení, protože se předpokládá, že u metody LENS nebudou převážně vznikat vrstvy s rovnými hranami. Hodnoty drsnosti, které byly získány touto studií, jsou podstatně nižší, než které mohou vznikat.

Celkově bylo zjištěno, že díky přetavování došlo k výraznému zlepšení kvality povrchu, z čehož plyne, že v případě potřeby je tento proces jednou z možných cest, jak získat kvalitnější a přesnější povrch součásti. [11]

3 Návrh vlastního řešení

Pro praktickou část diplomové práce byla navržena konkrétní součást, která obsahuje řadu problematických prvků, na kterých budou měřeny kvalitativní parametry povrchu. Jedná se např. o měření drsnosti povrchu a přesnosti jednotlivých prvků. Dále byla součást hodnocena z hlediska tvrdosti, struktury povrchu, popř. zbytkového pnutí.

Navržená součást byla poptána u dvou různých výrobců. Plánem bylo obě vytištěné součásti vzájemně porovnat a zhodnotit dle výše popsaných kritérií. Jeden z výrobců nebyl schopen součást kompletně vyrobit, protože se tisk v průběhu výroby zastavil. Nebylo tím pádem možné provést plánované porovnání. Fotografie nedokončení součásti viz Příloha č. 4.

3.1 Materiál součásti

Jako stavební materiál byla vybrána nástrojová ocel 1.2709, která je charakteristická svou dobrou použitelností při vyšších teplotách okolí. Tento materiál byl zvolen, z důvodu návaznosti na další experimenty, které se na součásti budou v budoucnu provádět.

Technické parametry stavebního materiálu jsou zobrazeny v Tab. 3.

Tvrdost [HRC]	35-40
Mez kluzu [N/mm²]	950
Pevnost v [N/mm²]	1100
Prodloužení [%]	4
Modul pružnosti [10³N/mm²]	200
Tepelná vodivost [W/mK]	21
Koeficient tepelné roztažnosti [10⁻⁶K⁻¹]	-

Tabulka 3 Vlastnosti oceli [17]

Chemické složení nástrojové oceli je zobrazeno v Tab. 4

C [%]	< 0,03
Cr [%]	< 0,3
Mo [%]	4,5 - 5,2
Ni [%]	17 - 19
Co [%]	7 - 9
Ti [%]	0,8 - 1,2
Si [%]	< 0,1
Mn [%]	< 0,1

Tabulka 4 Chemické složení [18]

3.2 Popis součásti

Navržená součást je tenkostěnná krychle, jejíž rozměry jsou 70 x 70 x 70 mm o tloušťce stěny 2 mm. Uvnitř krychle je tenkostěnná koule, která má tloušťku stěny také 2 mm. Tato koule je k plášti krychle připojena pomocí tenkostěnných paprsků, které se od sebe liší svými vnitřními průměry a také úhlem skonu, který je u většiny paprsků rozdílný. Na součásti jsou záměrně prvky jako otvory, drážky, kuželové díry atd. promítnuty do ploch v osách X, Y i Z, z důvodu následného posouzení, jaký vliv bude mít zvolený směr tisku na přesnost prvků v jednotlivých osách.

3.3 Popis jednotlivých prvků

Na povrchu součásti se vyskytují dva druhy žeber. Prvním typem žeber jsou žebra zvlněná, jejichž výška je 5 mm a jejich tloušťka se pohybuje od 0,15 až po 0,8 mm. Tento prvek byl na součást navržen z důvodu posouzení deformace, ke které může v závislosti na měnící se tloušťce žeber dojít. Předpokladem je, že žebro o tloušťce 0,15 mm bude podstatně více zkrouceno, než žebro o tloušťce 0,8 mm. Dále je cílem proměřit přesnost jednotlivých žeber a posoudit tak, od jaké tloušťky nastávají značné rozměrové nepřesnosti.

Druhým typem žeber jsou žebra zkosená. Hodnoty úhlů žeber se pohybují v rozmezí 37° – 60°. Tento prvek, je na součásti z důvodu potvrzení nebo vyvrácení teorie, která říká, že při stavbě do 40° je možné stavět součásti bez použití podpor, kdežto když je úhel menší, než těchto 40° nastává problém ve formě možného zborcení a je tedy nutné použití podpěr. Otázkou ovšem zůstávám, jak bude součást při výrobě orientována, protože v případě vhodné orientace je možné se podporám úplně vyhnout.

Na součásti je i velké množství kruhových děr, jejichž průměry se pohybují od hodnoty 1 – 10 mm. Tato různorodost průměrů byla navržena pro sledování, jestli například u průměru 1 mm nebo dojde k jeho spečení nebo ho bude stále možné bez problémů vytisknout. Tyto prvky byla snaha opět promítnout do co nejvíce os, aby bylo možné posoudit převážně jejich přesnost a nutnost stavby podpor. Předem nebylo jasné, jak bude součást zorientována, předpokládalo se, že alespoň v jedné ose dojde ke stavbě děr vodorovných. U takto orientovaných děr nastává velký problém právě při stavbě podpor. Otázkou je, od jakého průměru dochází k deformaci a je již potřeba podpory využít. Ze zkušeností výrobců, se

hodnoty vodorovných děr pohybují mezi průměrem 6 - 8 mm. Cílem je opět potvrdit nebo vyvrátit tuto informaci, která je silně spjata s orientací součásti.

Z podobného důvodu byly navrženy i kuželové díry, u kterých je navíc cílem proměření kuželovitosti v jednotlivých osách.

Poslední prvky, které se na povrchu krychle vyskytují, jsou různé druhy drážek.

Drážka trojúhelníková je kritická z hlediska přesnosti stavěného úhlu. Podobně je tomu i u drážky lichoběžníkového tvaru, kde je drážka záměrně orientována tak, aby docházelo ke vzniku převisu. Záměrem je sledovat, jestli dojde ke zborcení stěny, jestli bude nutnost stavět podpory a jaká bude přesnost tisku.

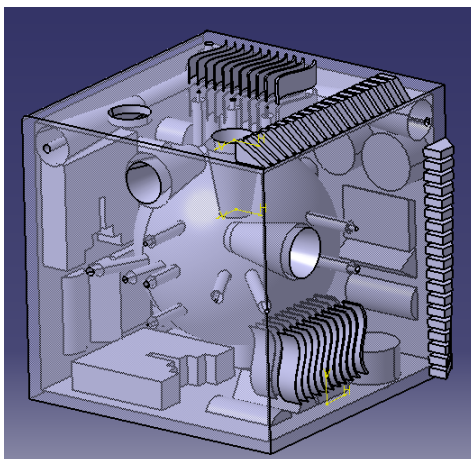
V neposlední řadě se na povrchu vyskytuje drážka s rádiuse 2,5 mm. Tento prvek byl navržen nejen pro různorodost drážek, ale hlavně pro proměření přesnosti.

Největší drážkou, která se na součásti vyskytuje, je drážka schodovitá. U této drážky je snahou posoudit kolmost jednotlivých stěn a také jestli je technologie 3D tisku schopna vytisknout pravé úhly nebo jestli dojde ke vzniku drobného rádiusu.

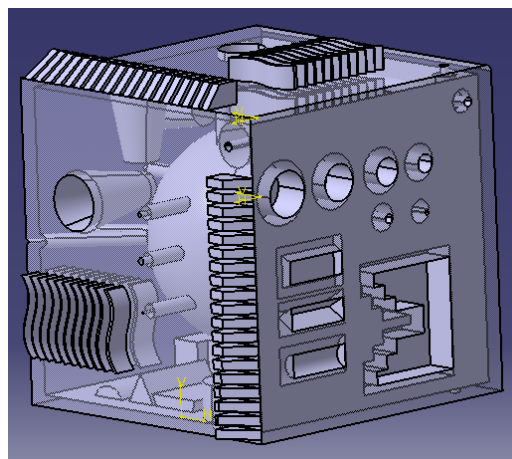
Z Obr. 33, Obr. 34 je patrné, že krychle obsahuje plno prvků i uvnitř. Dominantou je tenkostěnná koule, jejíž průměr je 44 mm. U této koule je snaha sledovat tzv. schodišťový efekt, který se u tištěných součástí často vyskytuje. Protože je koule poměrně velká, mohl by být tento efekt výrazný. Pokud by tomu tak bylo, bylo by reálné proměřit i tloušťku vrstvy.

Uvnitř krychle se dále vyskytují tři průchozí díry, u kterých je dominantou měnicí se tloušťka pláště. Tato měnicí se tloušťka je navržena z důvodu sledování deformace, kterou plášť může na díru mít.

Posledními prvky, které jsou uvnitř součásti, jsou tenkostěnné paprsky. Paprsky jsou opět promítnuty do všech os a navíc jsou některé z nich skloněny pod různými úhly. Všechny paprsky jsou charakteristické konstantním vnějším průměrem a měnicím se vnitřním průměrem. Snahou je sledovat, jaký průměr a jaký úhel je pro tisk kritický a kdy naopak problémy nenastanou vůbec.



33 a)

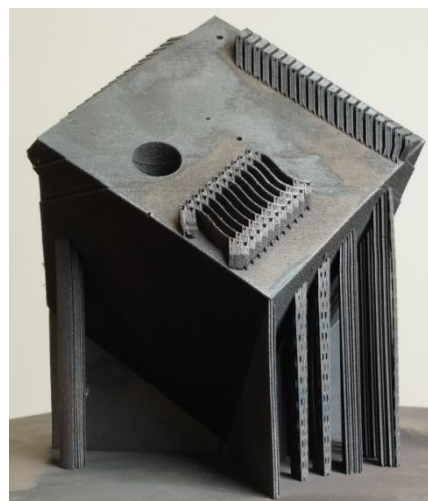


33 b)

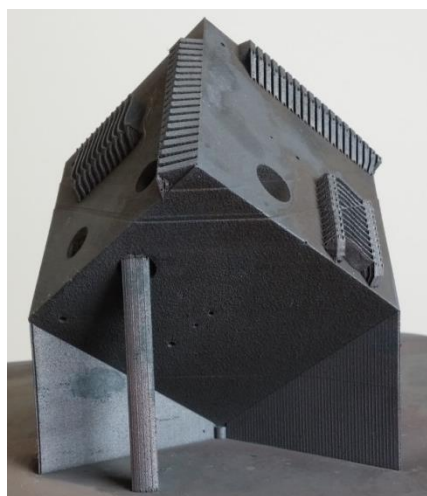
Obrázek 33 Model součásti a), b)



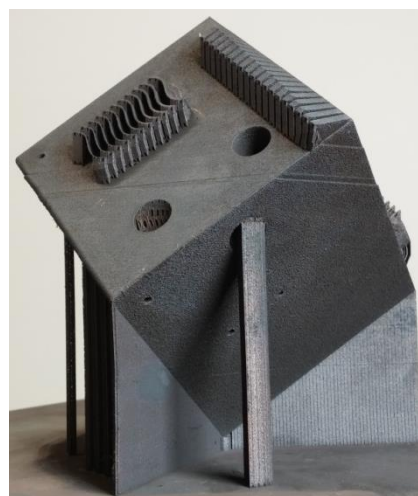
34 a)



34 b)



34 c)



34 d)

Obrázek 34 Vyrobená součást

3.4 Popis plánovaného měření

Z Obr. 33 a 34 je patrné, že na součásti je možné provést velké množství měření. Proto byl vypracován plán, který popisuje jednotlivé kroky měření a co konkrétně bude sledováno. Protože plán je velice obsáhlý, otázkou zůstává, jestli bude možné všechny plánované experimenty zrealizovat.

S výrobcem součásti bylo dohodnuto, že součást bude dodána i se základní deskou, bude obsahovat všechny podpory a bude tepelně nezpracována. V tomto stádiu je plánováno první kontaktní měření na zařízení CZ Prismo Navigator viz Obr. 35.



Obrázek 35 Měřící zařízení pro kontaktní měření součásti [19]

Po tomto kroku je plánované další kontaktní měření a to již na tepelně zpracované součásti. Při výrobě se v součásti akumuluje pnutí, z toho důvodu bylo provedeno žíhání ke snížení pnutí. V průběhu tepelného zpracování je důležité zachovat na součásti podpory, protože pokud by došlo k jejich předčasnému odstranění, mohlo by dojít ke zborcení a částečné deformaci součásti. Třetím plánovaným kontaktní měření je měření po odstranění podpor. Následně by mělo být realizováno měření drsnosti, tvrdosti a různých deformací jednotlivých geometrických prvků.

Měření jsou nezbytná pro porovnání, k jak velké deformaci součásti došlo, jak se změnily parametry jednotlivých prvků, oproti návrhu součásti atd.

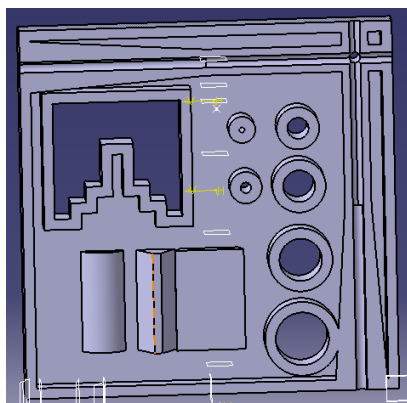
Po provedení všech kontaktních měření je v plánu měření zbytkového pnutí a to pomocí odvrtávací metody.

Principem této metody je navrtání součásti, díky kterému dojde k uvolnění zbytkového napětí. Uvolněné napětí způsobí deformaci v okolí otvoru. Tuto deformaci je potřeba změřit a to nejčastěji za pomoci tenzometrů. Takto zjištěné hodnoty se následně použijí pro výpočet původního zbytkového napětí, které byly v materiálu součásti. [20]

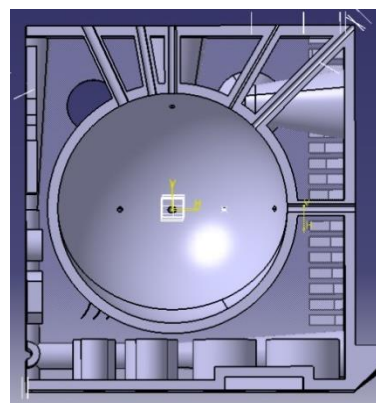


Obrázek 36 Princip odvrtávací metody [20]

Protože se plno prvků nachází i uvnitř součásti, je zapotřebí provést několik řezů. Například v řezu č. 1, viz Obr. 37, je záměrem sledovat přesnost průniku průchozích děr, dále zaměřit se na kolmost stěn u schodovitého otvoru, proměřit, jestli je tloušťka stěn opravdu 2 mm a také proměřit, jaký vliv bude mít měnící se tloušťka pláště u průchozí díry na její přesnost.



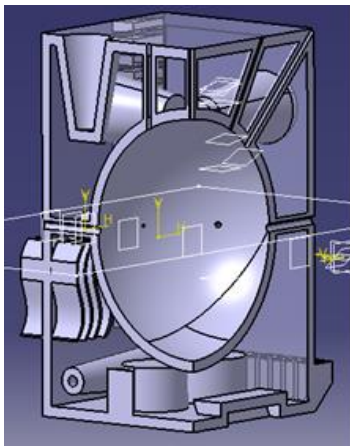
Obrázek 37 Řez č. 1



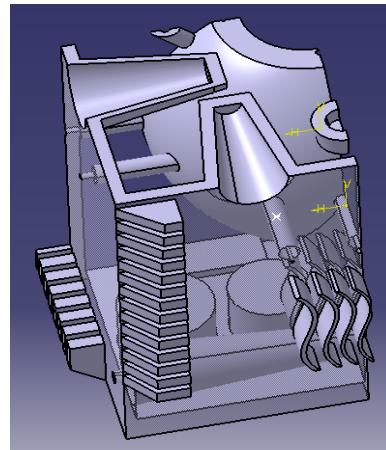
Obrázek 38 Řez č. 2

V řezu č. 2, obr 38, je plánované měření přesností jednotlivých paprsků. Tyto paprsky se liší svým vnitřním průměrem, který se pohybuje od hodnoty 0,5 do 2 mm. Dále je zde rozdílný úhel skonu paprsků, od 10° do 45°. Bude sledováno, jestli například u průměru 0,5 mm nedojde k uvíznutí kovového prášku, případně jestli tento otvor bude stále možné vytisknout a nedojde k jeho spečení. Dále, pokud tomu podpory dovolí, bude měřena přesnost tenkostěnné koule, konkrétně její odchylky od navržené geometrie.

V plánovaném řezu č. 3 je opět plánem změřit přesnost, drsnost paprsků a převážně jejich kolmost, dále změřit kuželovitost kuželových děr, válcovitost průchozí díky s měnící se tloušťkou pláště.



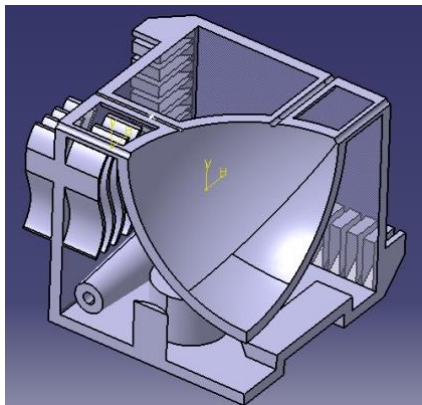
Obrázek 39 Řez č. 3



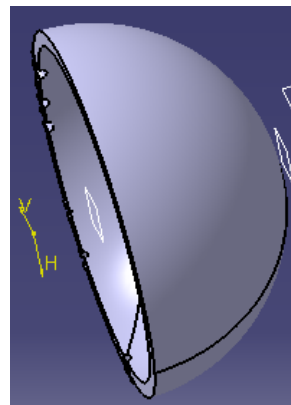
Obrázek 40 Řez č. 4

Řez č. 4 je navržen pro proměření kuželovitosti kuželových děr ve zbylých dvou osách. Díky tomuto řezu bude možné porovnat přesnost kuželových děr ve všech 3 osách.

Posledními plánovanými řezy jsou řez č. 5 a č. 6, viz Obr. 41 a Obr. 42. Tyto řezy jsou plánovány pro posouzení schodišťového efektu, který se u zakřivených ploch často vyskytuje. Pro proměření toho jevu byly záměrně naplánovány dva řezy a to z důvodu, že u řezu č. 5 není jisté, jestli díky podporám, které se zde jistě vyskytnou, bude možné měření provést. V případě, že by tato situace nastala, provede se náhradní řez č. 6. U řezu č. 5 je navíc možné opět proměřit přesnosti paprsků, které leží, oproti řezům výše, v rozdílných osách. Pokud bude schodišťový efekt v jednom z řezů výrazný, bude snaha proměřit i samotnou tloušťku vrstvy.



Obrázek 41 Řez č. 5



Obrázek 42 Řez č. 6

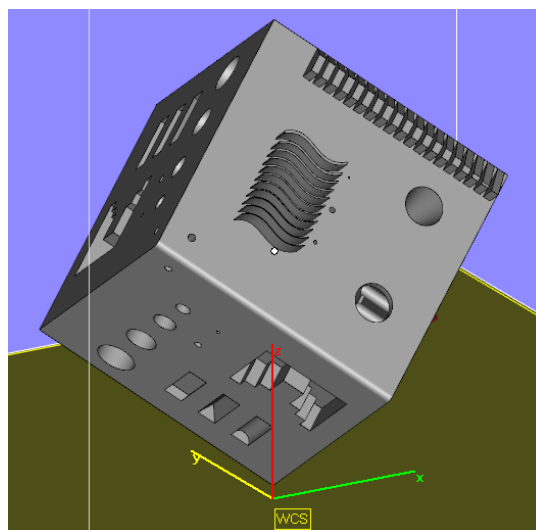
3.5 Vlastní kontaktní měření

3.4.1. První kontaktní měření

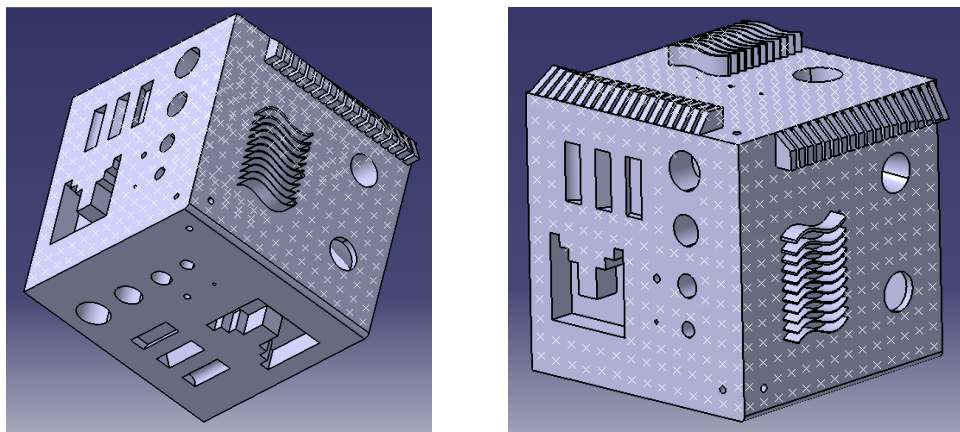
Jak je popsáno v předcházející kapitole, prvním krokem měření je kontaktní měření součásti, která je tepelně nezpracovaná a obsahuje všechny potřebné podpory. Toto měření bylo realizováno na měřicím zařízení CZ Prismo Navigator od firmy ZEISS. Jedná se o vysokorychlostní měřicí stroj, který pracuje s přesností 0,05 mm.

Pro provedení toho měření bylo zapotřebí vytvořit na modelu součásti síť bodů, ve kterých byly následně měřeny odchylky od ideálního rozměru.

Jelikož součást byla zorientována na jeden z rohů, viz Obr. 43, bylo možné proměřit pouze tři vrchní plochy, protože spodní část kostky je podepřena pomocí podpor.



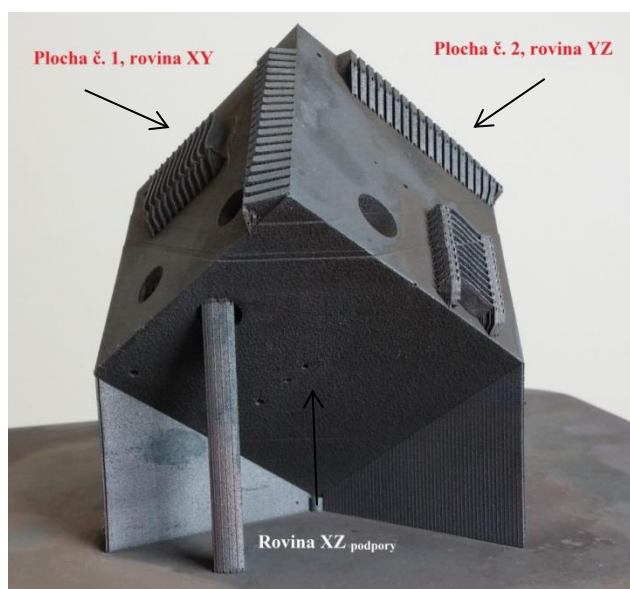
Obrázek 43 Orientace součásti



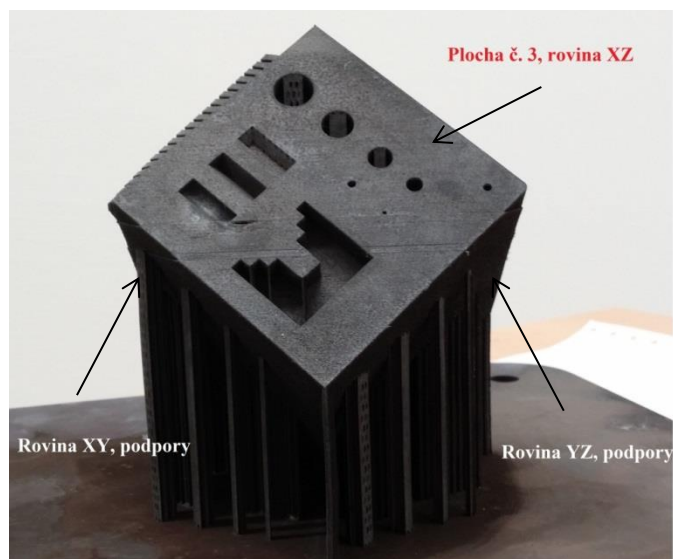
a)

b)

Obrázek 44 Návrh bodové sítě a), b)

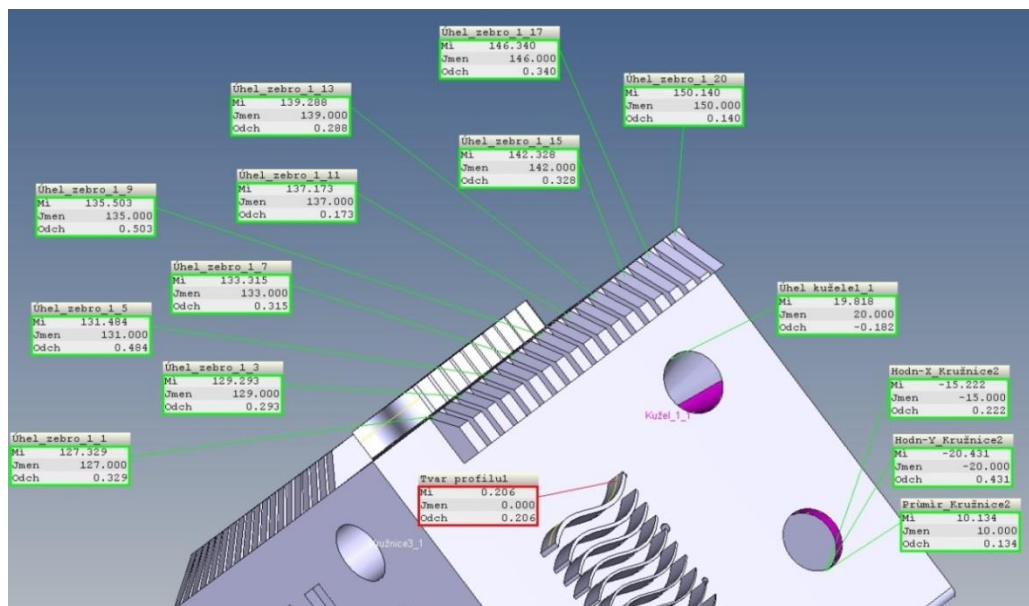


Obrázek 45 Popis ploch



Obrázek 46 Popis ploch

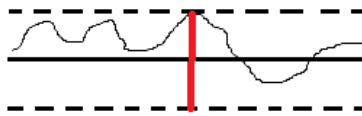
Při návrhu sítě musela být zohledněna velikost dotykové sondy. Body musely být vzdáleny minimálně 2 mm od okraje krychle a jejich vzájemná vzdálenost musela být minimálně 5 mm. Tímto měřením je možné sledovat přibližnou rovinnost a tvar jednotlivých ploch. Kromě odchylek v bodech na plochách součásti bylo specifikováno měření jednotlivých prvků a to konkrétně zkosených žebor, u kterých je cílem změřit přesnosti jednotlivých úhlů, dále proměření přesností jednotlivých drážek, proměření kruhových otvorů a proměření přesnosti úhlů u kuželových děr. Na Obr. 47 jsou již získané výsledky z prvního kontaktního měření plochy č. 1. Na této ploše bylo cílem proměřit přesnost úhlů zkosených žebor. Z důvodu náročnosti měření bylo měřeno vždy každé druhé žebro, podobně tomu je i na druhé stěně, kde se žebra také nacházejí.



Obrázek 47 Získané výsledky – plocha č. 1

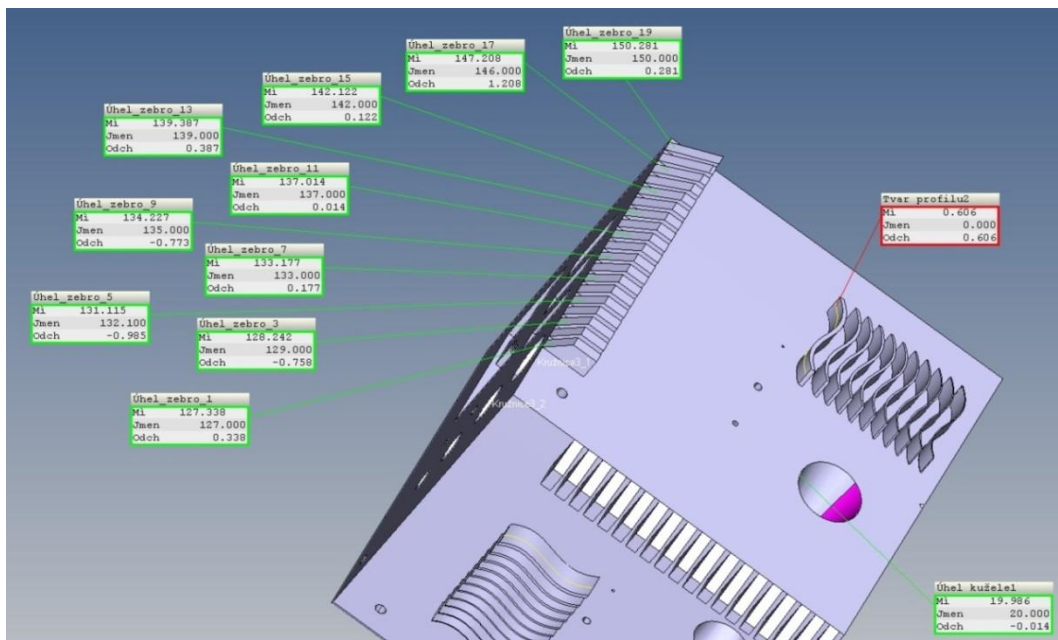
Pro proměření úhlů bylo zapotřebí každé žebro proložit přímkou a následně úhel změřit vzhledem k ploše, na které jsou žebra navržena. Stejně jako žebra, byl na této ploše měřen ještě kruhový otvor sloužící k vysypání zbylého prášku, který v součásti při výrobě zůstal a dále úhel kuželové díry.

Posledním měřeným prvkem bylo zvlněné žebro, u kterého nebyla měřena jeho tloušťka, ale tvar profilu. Pro změření přesnosti profilu bylo důležité zvolit správný typ tolerance. V tomto případě byla zvolena tolerance dvoustranná – jeden výsledek. Výstupem této tolerance je dvojnásobek největší odchylky (dovnitř i ven).



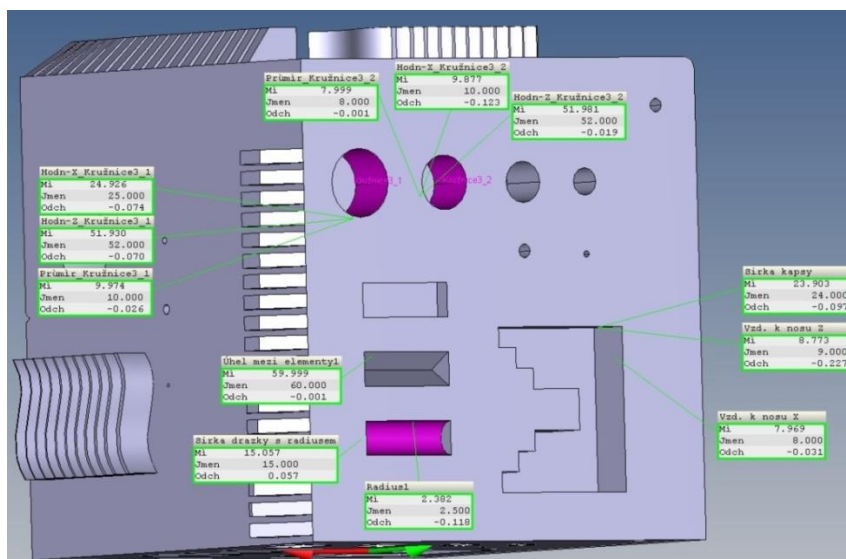
Obrázek 48 Schéma zvolené tolerance

Další získané výsledky jsou viditelné na Obr. 49. Na této straně součásti došlo opět k proměření úhlu kuželové díry a úhlů zkosených žebér.



Obrázek 49 Získané výsledky - plocha č. 2

Poslední měřená strana je zobrazena na Obr. 50.

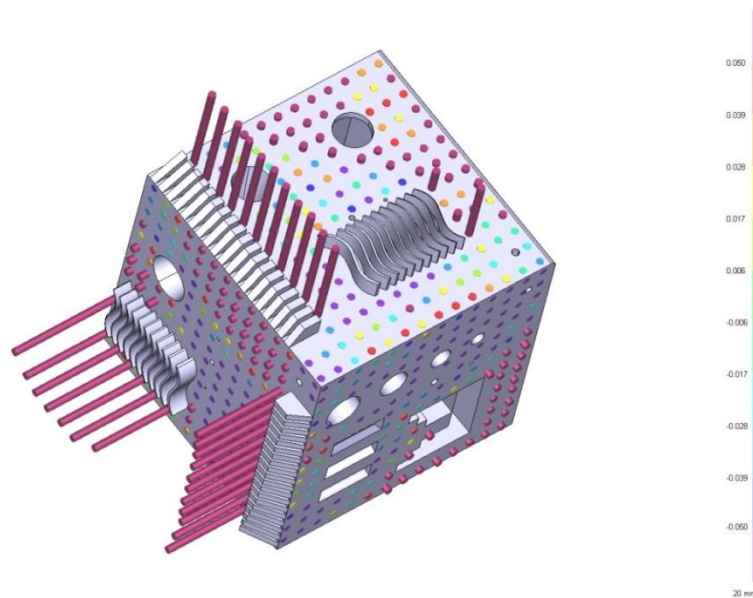


Obrázek 50 Získané výsledky - plocha č. 3

Zde byly měřeny přesnosti kruhových děr, úhel trojúhelníkové drážky, rádius kruhové drážky a přesnosti rozměrů u drážky schodovité.

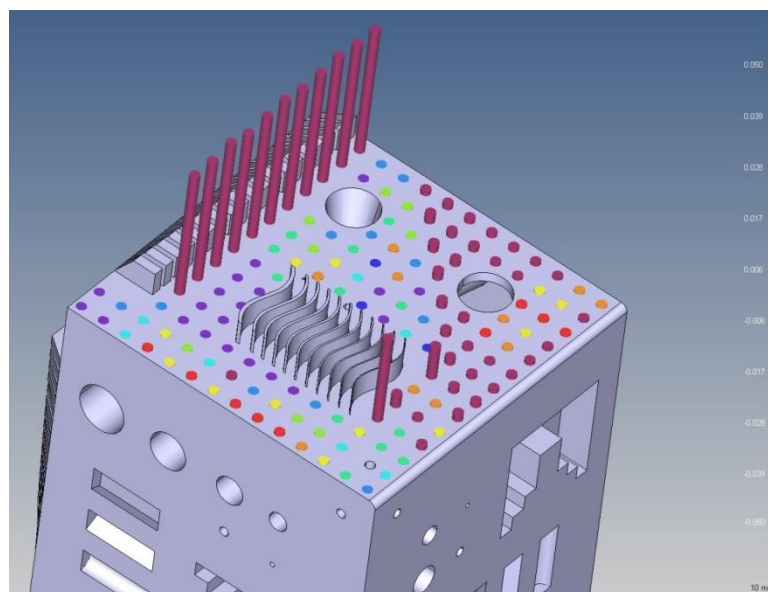
Všechny naměřené výsledky z prvního kontaktního měření jsou shromážděné shromážděny v tabulkách, viz Příloha č. 1.

Poslední získané výsledky z prvního měření jsou zjištěné odchylky v jednotlivých bodech bodové sítě. Hodnoty v jednotlivých bodech je možné přibližně odečíst ze stupnice, která se nachází v pravé části Obr. 51.



Obrázek 51 Odchylky od jmenovitých rozměrů ve zvolených bodech

Detailnější pohled na jednotlivé plochy je možné vidět z Obr. 52, Obr. 53, Obr. 54.



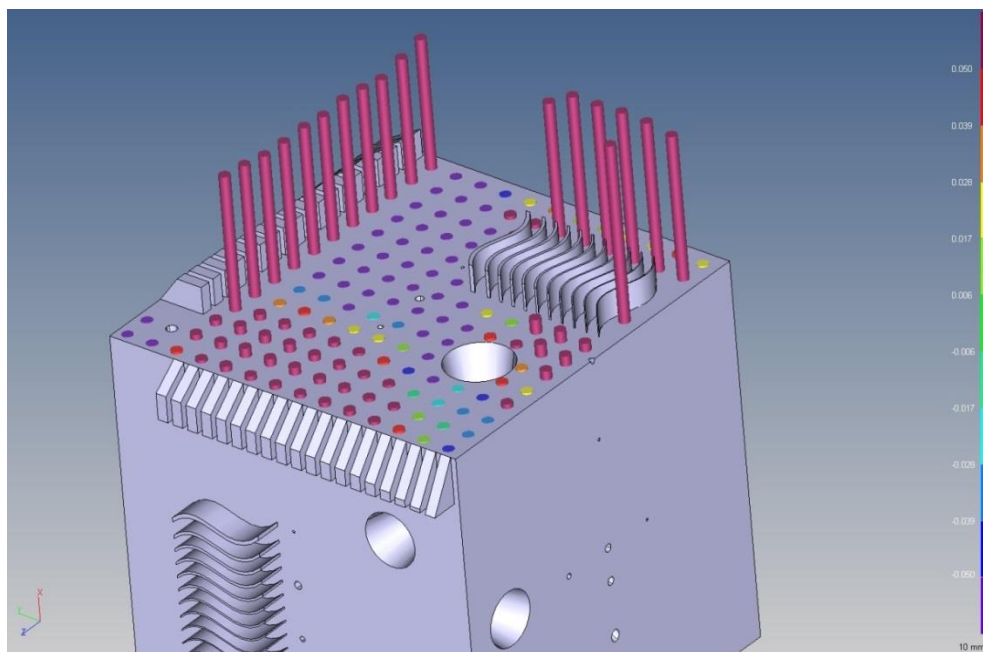
Obrázek 52 Odchylky – plocha č. 1

Z Obr. 52 je patrné, že na ploše č. 1 jsou v jednotlivých bodech poměrně značné rozdíly. Podle stupnice vpravo si je při detailnějším zkoumání možné povšimnout, že se hodnoty z levého rohu kostky k pravému rohu pohybují vzestupně z hodnot záporných až po hodnoty kladné. To znamená, že tato plocha zleva doprava postupně stoupá.

Tento jev si je možné vysvětlit například zorientováním součásti (Obr. 43). V místě, kde jsou hodnoty záporné, dochází při výrobě k delším časovým intervalům stavby, je tedy možné, že součást není dostatečně prohřáta. Při detailnějším studování orientace součásti si je možné povšimnout, že pravý roh na Obr. 52 při stavbě tvoří jakýsi převis. I když je součást dostatečně podepřena, evidentně podpory nejsou schopny součást dokonale udržet a proto v místech tohoto převisu dochází ke vzniku výraznějších chyb.

Výrazné hodnoty odchylek u zkosených žebër jsou způsobeny existencí podpor, které byly při návrhu bodů zasaženy, nejedná se tedy o chybu součásti. Stejně tomu tak je i u vlnitých žebër, opěr došlo ke styku s podporami.

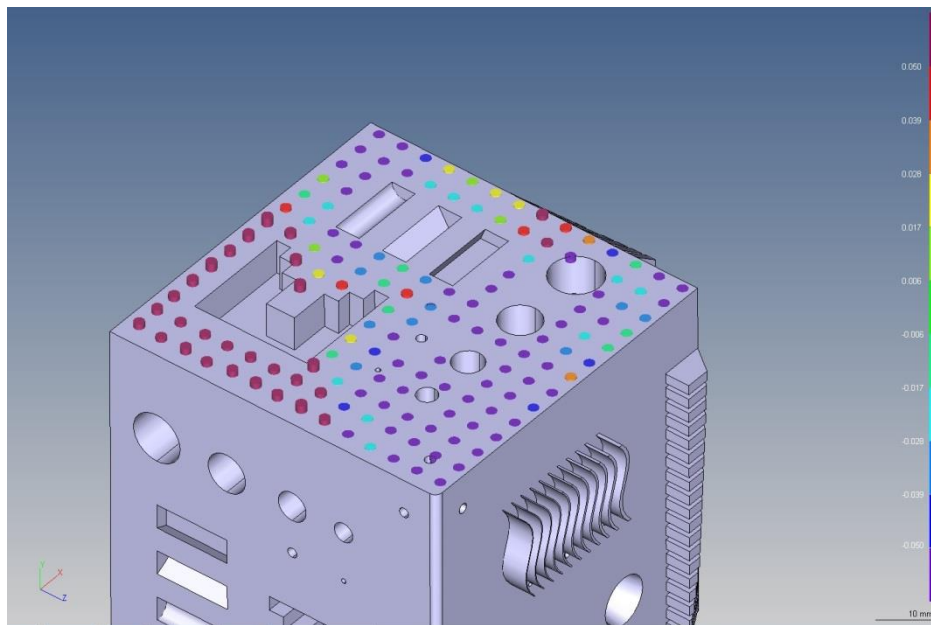
Další výraznou chybu zobrazují body, které se nachází u otvoru pro vysypání kovového prášku z dutiny součásti. Tyto body se střetly s defektem, který vznikl při výrobě. Díky tomu, že stroj zastavil na dvou místech, došlo k tvorbě vrásky. Při prvním zastavení navíc došlo k popraskání pár podpěr uvnitř dílu. Protože při výrobě nastal tento problém, daly by se vzniklé hodnoty chyb vysvětlit i tím, že součást během poruchy zchladla. Stavba tím pádem začala od začátku, proto jsou náhle hodnoty záporného charakteru, důvodem může být nedostatečné prohřátí součásti.



Obrázek 53 Odchylky – plocha č. 2

Podobně jako u plochy č. 1 jsou výrazné chyby na Obr. 53 způsobeny zachycením podpor, které byly u obou typů žeber zapotřebí. Ve středu této plochy vykazují hodnoty bodů záporné hodnoty. Ty jsou možná způsobeny díky existenci tenkostěnné koule uvnitř krychle a s ní spojené nedostatečné množství podpor uvnitř krychle, tím pádem může docházet k určitému propadu plochy. Tento jev by bylo možno potvrdit až po rozříznutí a detailnějším prozkoumání vnitřku součásti.

Stejně jako na předchozích dvou stěnách i na stěně č. 3 je patrné, že odchylky v jednotlivých bodech se od levého k pravému rohu pohybují od hodnot kladných až po hodnoty záporné. Plocha i zde má vzestupný / sestupný charakter. Hodnoty nabývající kladných hodnot jsou opět v místě podpor. Jak již bylo vysvětleno u plochy č. 1, tento roh může být brán z hlediska zvolené orientace jako převis, který není podporami dostatečně udržet, a proto v těchto místech dochází snáze k deformaci plochy. Záporné hodnoty by bylo možné vysvětlit podobným způsobem jako u plochy č. 2. Opět je potřeba říci, že tato myšlenka může být potvrzena až po provedení řezu součástí.



Obrázek 54 Odchylky – plocha č. 3

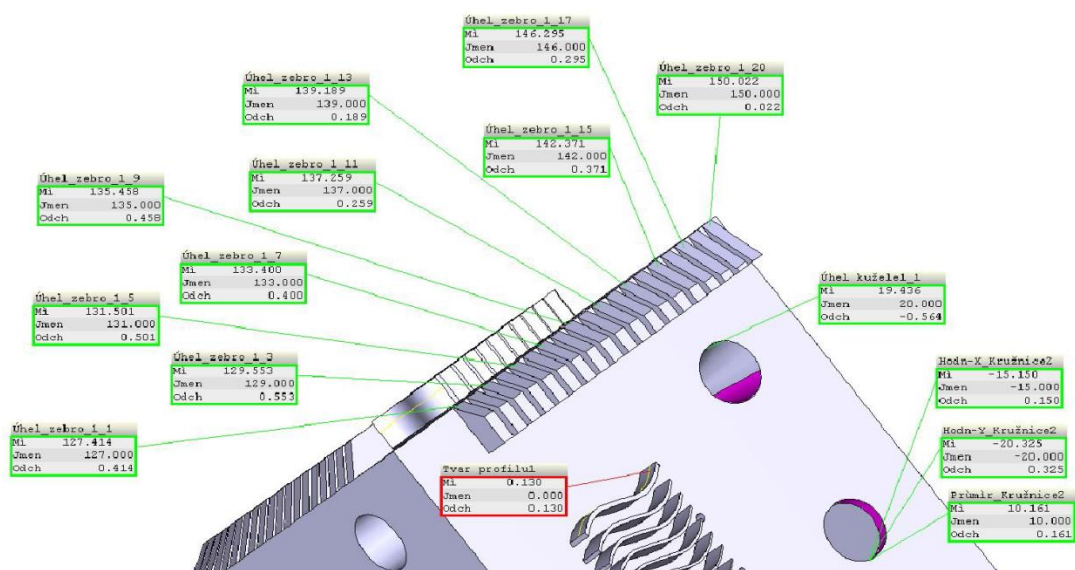
3.4.2. Druhé kontaktní měření

Druhé kontaktní měření součásti proběhlo po jejím tepelném zpracování. Proces tepelného zpracování proběhl přesně podle doporučení výrobce součásti. Součást byla ohřata na 540 °C s průměrnou rychlostí ohřevu 100 °C/h. Tato teplota byla udržována po dobu 6 – 8 hodin. Rychlost následného ochlazení byla opět 100 °C/h.

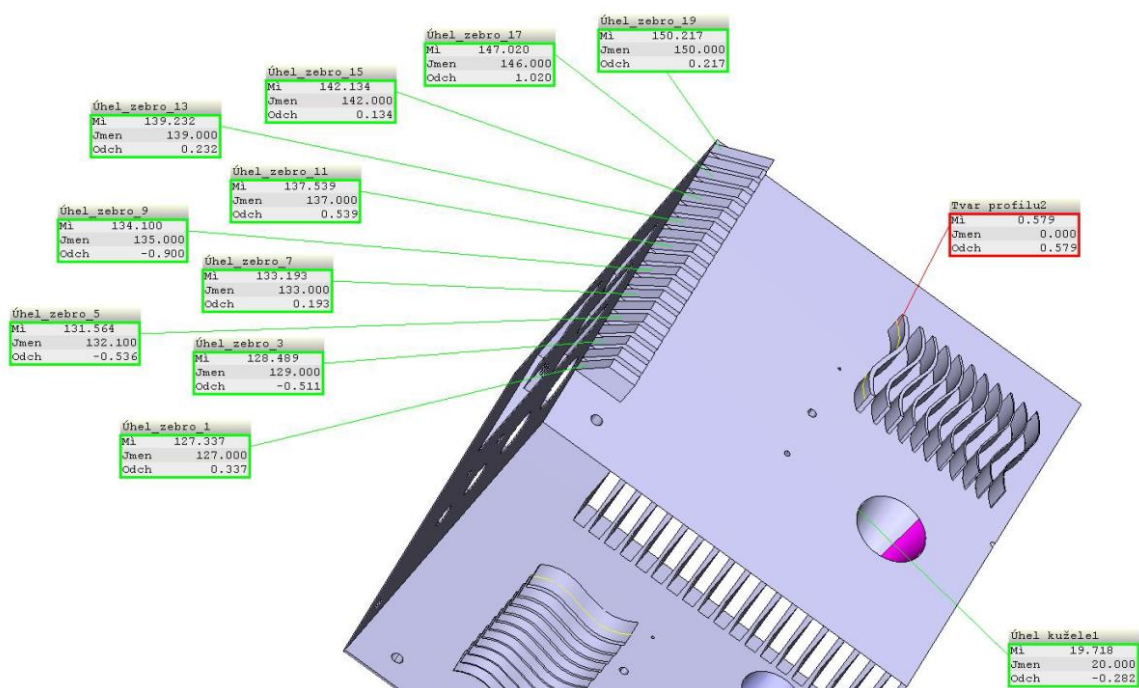
Takto zpracovaná součást byla opět kontaktně proměřena na zařízení CZ Prismo Navigator.

Stejně jako u předchozích měření byly měřeny přesnosti jednotlivých žebor, kruhových a kuželových otvorů a drážek.

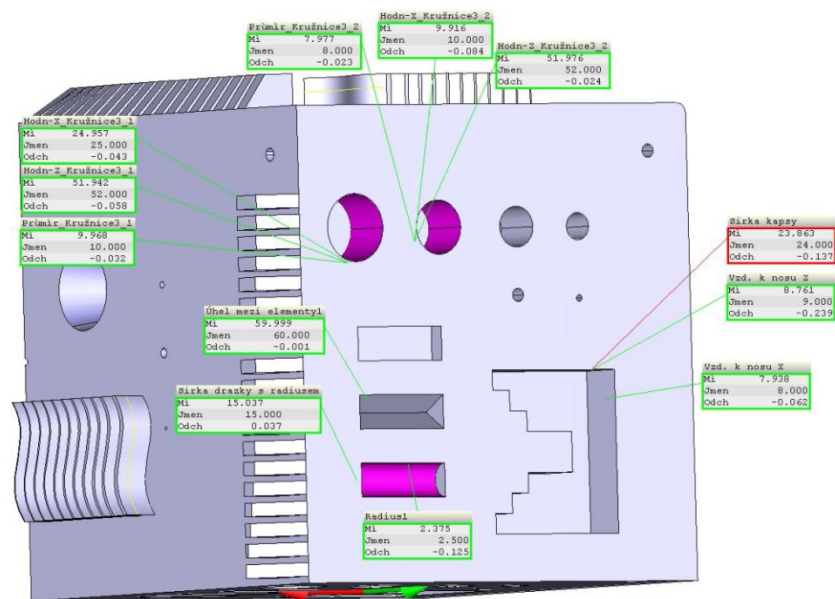
U plochy č. 1 došlo k proměření zkosených žebor, úhlu skonu kuželové díry a přesnosti kruhové díry. Při porovnání s hodnotami získanými při prvním měření, došlo díky tepelným zpracováním ke značným změnám. Je tedy možné usoudit, že tepelné zpracování mělo vliv na přesnost jednotlivých rozměrů. Například u zkosených žebor došlo ke zdatelnému snížení některých odchylek, ale bohužel nastal i případ opačný, kdy se některé odchylky naopak markantně zvýšily.



Obrázek 55 Získané výsledky – plocha č. 1

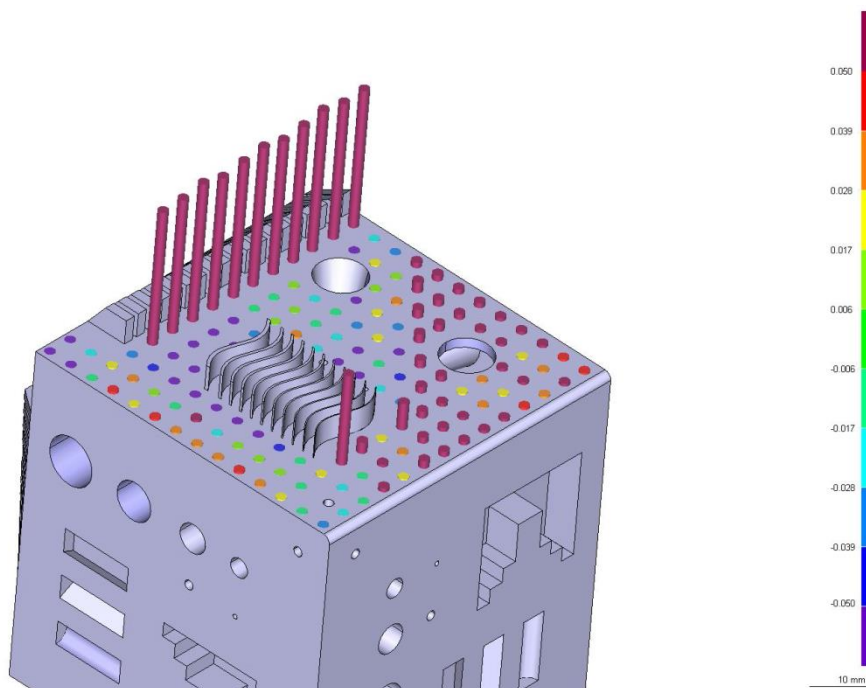


Obrázek 56 Získané výsledky – plocha č. 2

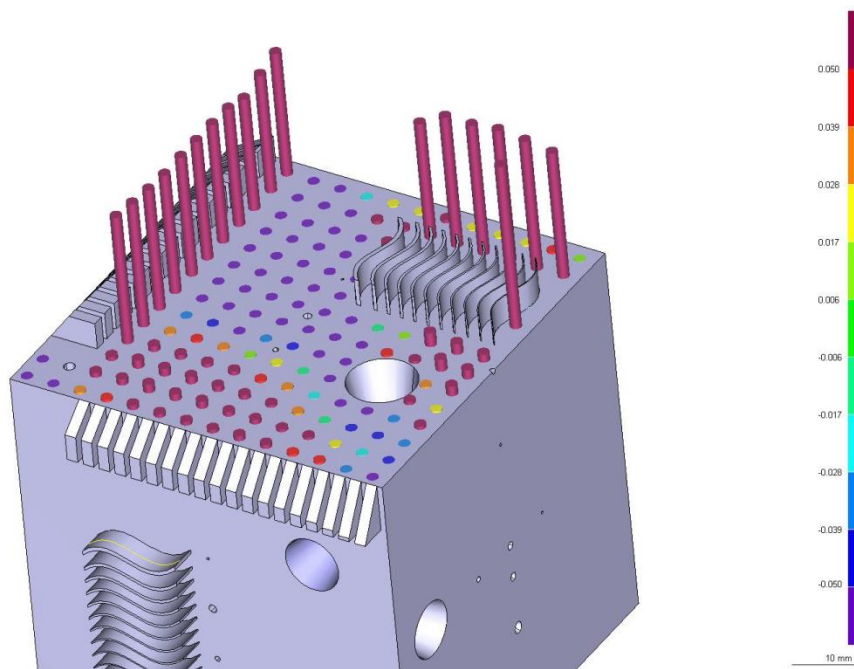


Obrázek 57 Získané výsledky – plocha č. 3

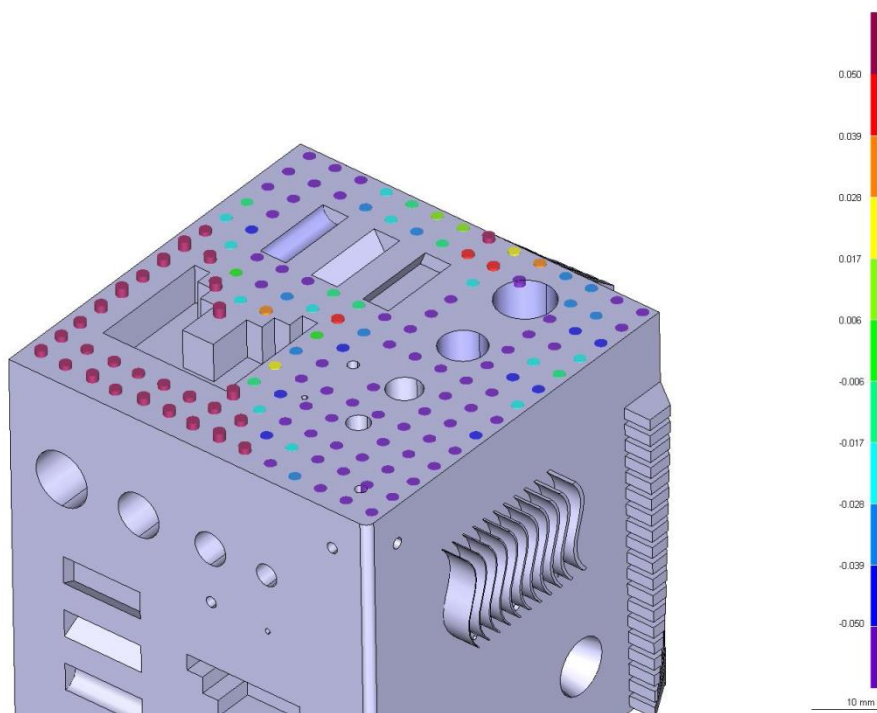
Podle grafického zobrazení odchylek v jednotlivých bodech by se mohlo zdát, že při porovnání 1. a 2. kontaktního měření se hodnoty bodů změnily v řádech setin milimetrů. Bohužel číselné hodnoty jednotlivých geometrických prvků vypovídají jinak. Proto je vhodnější provést porovnání těchto prvků, u kterých jsou definované přesné rozdíly. Naměřené hodnoty jednotlivých prvků je možné nalézt v tabulkách, viz Příloha č. 2.



Obrázek 58 Odchylky - plocha č. 1



Obrázek 59 Odchylky - plocha č. 2

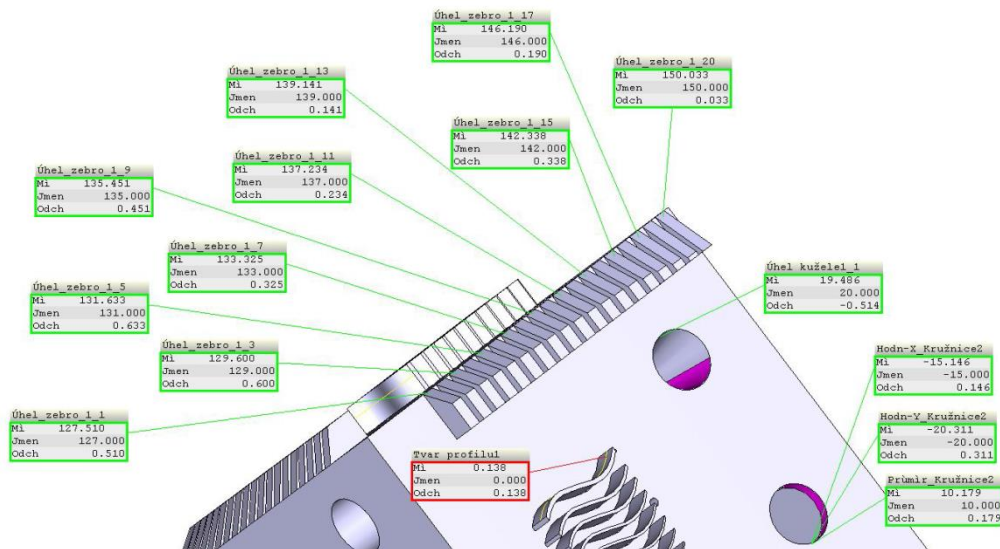


Obrázek 60 Odchylky - plocha č. 3

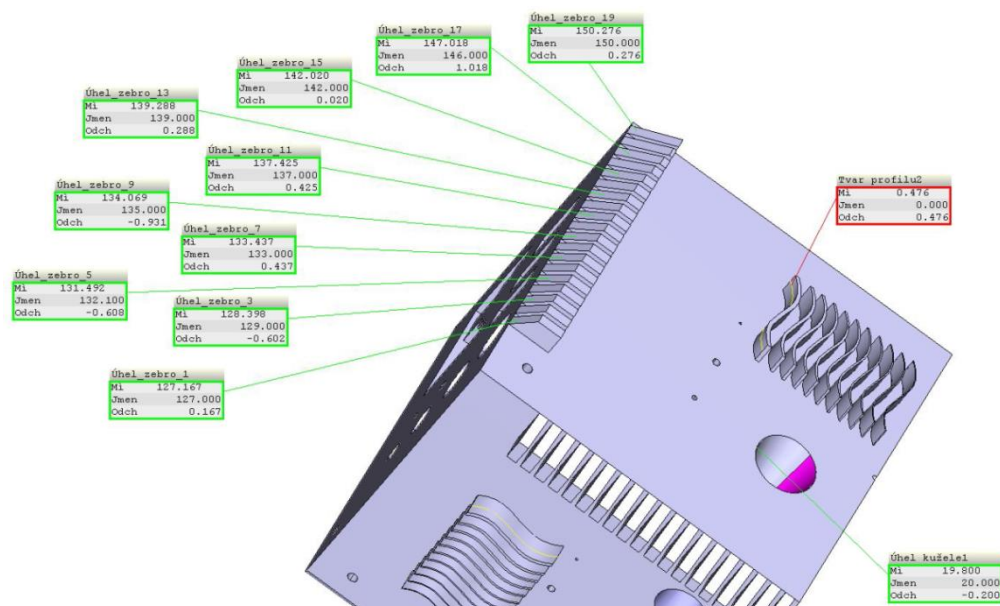
3.4.3. Třetí kontaktní měření

Jako třetí krok měření bylo naplánováno kontaktní měření po odstranění podpor. Tyto podpory bylo možné odstranit manuálně bez použití strojního zařízení. Bohužel podpory, které se vyskytovaly mezi zvlněnými žebry, nebylo možné odstranit z důvodu poškození

samotných žeber. Podobně tomu bylo u i žeber zkosených, kde byly podpory silně připečeny k povrchu kostky, a hrozilo riziko, poškození žeber.

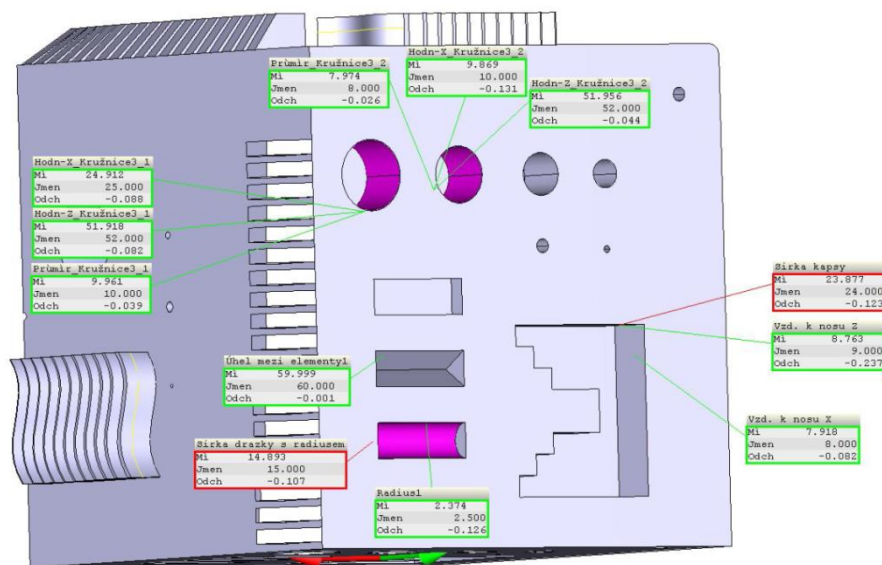


Obrázek 61 Získané výsledky – plocha č. 1



Obrázek 62 Získané výsledky – plocha č. 2

Stejně jako u obou typů žeber, i u lichoběžníkové drážky nebylo možné všechny podpory stoprocentně odstranit. To byl jeden z hlavních důvodů, proč nebylo možné tuto drážku proměřit.



Obrázek 63 Získané výsledky – plocha č. 3

3.6 Měření drsnosti

Pro další hodnocení součásti následovalo měření drsnosti povrchu pomocí mobilního drsnoměru MarSurf M 300, jehož měřicí rozsah se pohybuje do hodnoty 350 μm .



Obrázek 64 MarSurf M 300

Postupně došlo k proměření všech ploch, u kterých byly posuzovány parametry drsnosti:

R_a – střední aritmetická hodnota odchylek profilu

R_z – střední hodnota z absolutních hodnot výšek pěti nejvyšších výstupků profilu a hloubek pěti nejnižších prohlubní profilu

R_t - svislá vzdálenost od nejvyšší špičky k nejhlubší rýze profilu drsnosti na měřeném úseku

R_{Sm} - aritmetický průměr šířek prvků profilu v rozsahu základní délky

R_q - kvadratický průměr hodnot v rozsahu základní délky

R_{max} - vzdálenost mezi dvěma čarami rovnoběžnými se střední čarou zjištěného profilu, z nichž jedna prochází nejnižším bodem prohlubně, druhá prochází nejvyšším bodem vrcholu v délce měřeného úseku. [23], [24]

Během dotykového měření došlo k postupnému proměření všech ploch krychle. Drsnost byla záměrně měřena vždy pod cca úhlem 45 ° ke směru tisku, nikdy ne po směru tisku. Díky tomu mohou být výsledky vzájemně porovnatelné.

	Plocha č. 1 – rovina XY	Plocha č. 2 – osa YZ	Plocha č. 3 – osa XZ
	[μm]	[μm]	[μm]
R_a	3,066	3,334	5,478
R_q	3,946	4,665	6,475
R_z	13,52	16,74	21,23
R_{max}	15,10	25,58	25,61
R_t	20,33	32,97	26,94
R_{Sm}	145	124	145

Tabulka 5 Výsledky ploch č. 1,2,3

Tab. 5 definuje plochy, které byly v předchozí kapitole měřeny pomocí kontaktního měření. Ze změřených hodnot je na první pohled vidět, že největší hodnoty drsnosti byly zaznamenány v rovině XZ. Jedinou výjimkou je hodnota R_t v rovině YZ, kde je podstatně vyšší nárůst, ale v celkovém srovnání je z hlediska drsnosti nejkřivější rovina XZ.



Obrázek 65 Ukázka z měření drsnosti

	rovina XY podpory [μm]	rovina YZ podpory [μm]	rovina XZ podpory [μm]
Ra	6,227	8,955	9,245
Rq	8,525	11,19	11,54
Rz	26,73	40,53	40,80
Rmax	39,67	53,45	55,9
Rt	41,61	60,24	58,97
RSm	294	140	174

Tabulka 6 Výsledky ploch, které byly podepřeny pomocí podpor

Tab. 6 zobrazuje výsledky měření drsnosti na spodních plochách součásti, které při stavbě obsahovaly velké množství podpor. Bylo tedy od začátku jasné, že hodnoty drsností budou vyšší než u ploch vrchních. Při porovnání si je možné povšimnout, že hodnoty jsou v některých případech až trojnásobné. I u těchto hodnot se potvrdilo, že při orientaci, která byla zvolena, docházelo k problémům a zhoršení přesností v rovině XZ. Platí tomu i v případě měření drsnosti.

3.7 Měření tvrdosti

Dalším provedeným měřením bylo měření tvrdosti metodou podle Rockwella. Před samotným měřením bylo zapotřebí plochy krychle na místech, kde bylo měření prováděno, přebrousit. Vytřištěný povrch nebyl úplně dokonalý a na takto vyrobeném povrchu by výsledky nemohly být akceptovány. Vzhledem k tomu, že je součást tenkostěnná, měřené plošky byly navoleny na kraje krychle, protože hrozilo nebezpečí, že při zkoušce dojde k porušení součásti.



Obrázek 66 Měření tvrdosti - plocha č. 1

	1. Měření [HRc]	2. Měření [HRc]	Průměr jednotlivých měření
1	47,5	43	45,25
2	28	41	34,5
3	40,5	33	36,75
4	32	40	36
	PRŮMĚR		38,125 HRc

Tabulka 7 Hodnoty z měření tvrdosti - plocha č. 1

Na Obr. 66 je možné vidět jednotlivá místa, kde k měření na ploše č. 1 docházelo, v Tab. 7 jsou pak zaznamenány naměřené hodnoty. Hodnoty se poměrně dost liší, což může být způsobeno například zachycením důlku, nepřesností povrchu plochy atd. Ze všech hodnot byl pak vypočítán průměr, který přibližně definuje tvrdost plochy.

Pro větší přehlednost jsou v Tab. 8 pouze vypočtené průměrné hodnoty na jednotlivých plochách. Na každé ploše bylo vždy měřeno na čtyřech různě zvolených místech a na každém místě bylo měření prováděno minimálně dvakrát.

	Průměrná hodnota tvrdosti [HRc]
Plocha č. 1 - XY	38,125
Plocha č. 2 - YZ	46
Plocha č. 3 - XZ	37,357
Plocha č. 4 - XY podpory	46,5
Plocha č. 5 - YZ podpory	45,875
Plocha č. 6 - XZ podpory	36,125

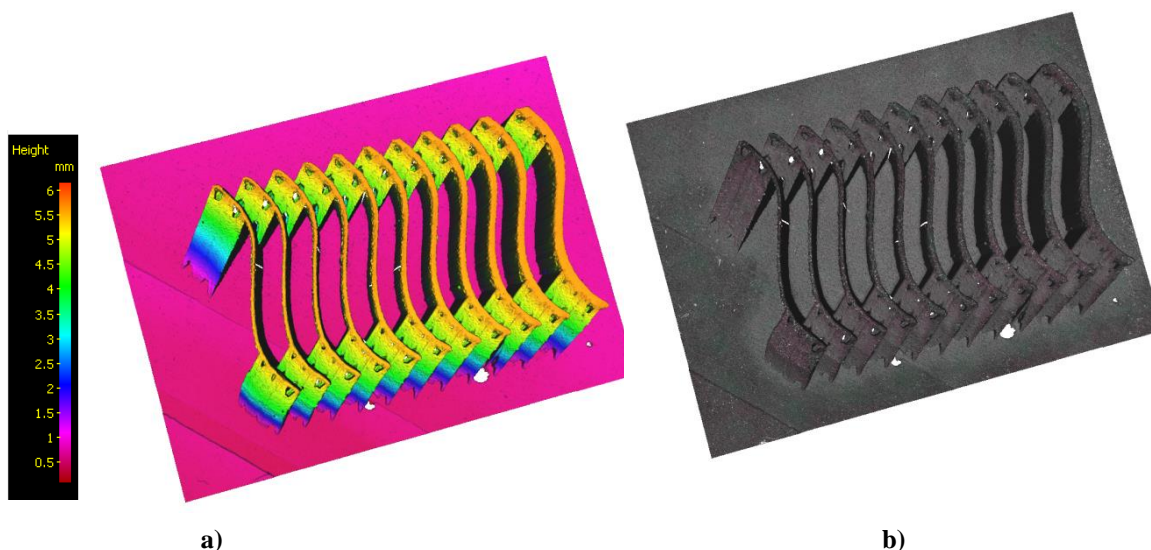
Tabulka 8 Hodnoty tvrdostí na jednotlivých plochách

Z Tab. 8 je vidět, že hodnoty tvrdostí, na jednotlivých plochách se značně liší. Během měření docházelo k častým chybám, které se projevily velkými rozdíly hodnot. V těchto případech muselo být měření opakováno. Vzniklé chyby mohly být způsobeny zachycením důlku, pórovitostí struktury nebo nedokonalým podložením spodních ploch.

Bohužel zkouška podle Rockwella je v tomto případě pouze orientační, lepší variantou by byla zkouška podle Vickerce nebo Brinella. Pro tyto zkoušky je potřeba dokonale připravený povrch, což z časových důvodů nebylo možné zvládnout.

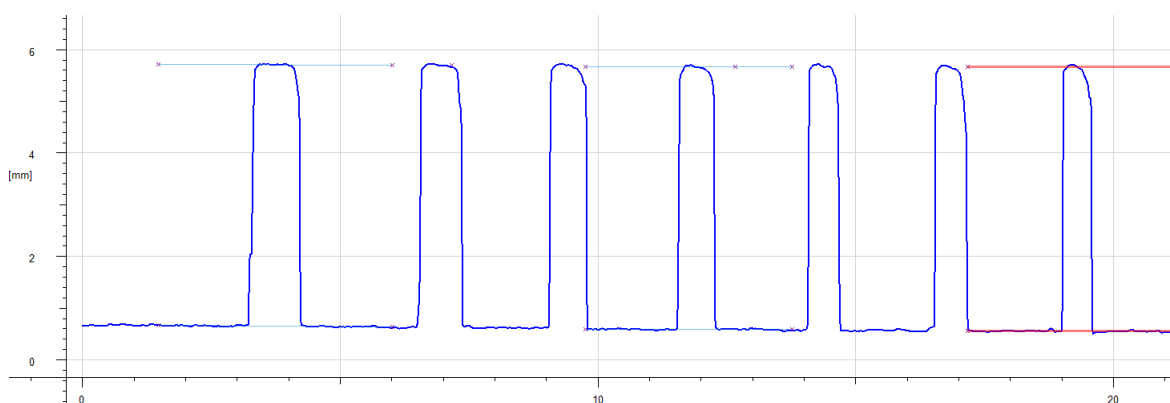
3.8 Měření žeber

Na měřicím zařízení Alicona proběhlo naskenování plochy č. 3, která obsahuje vlnitá i zkosená žebra. Tato žebra byla proměřena z hlediska dosažené geometrické přesnosti. Na Obr. 67 a) je možné vidět grafické zobrazení odchylek jednotlivých ploch.



Obrázek 67 Scany vlnitého žebra

U tohoto typu žeber byla měřena jejich výška a následně i jejich tloušťka. Podle modelu je jmenovitá výška žeber 5 mm. Hodnoty výšek byly měřeny na žebrech, jejichž navržená tloušťka byla 0,8, 0,5 a 0,35 mm.



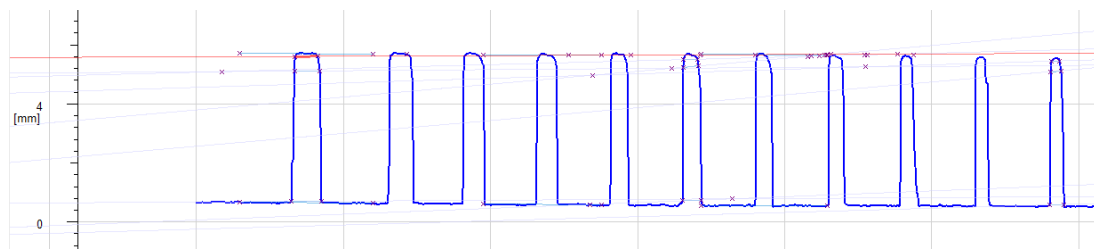
Obrázek 68 Měření výšek žeber

Šířka žebra [mm]	Výška [mm]	Odchylka [mm]
0,8	5,0701	0,0701
0,5	5,0770	0,0770
0,35	5,1193	0,1193

Tabulka 9 Odchylky od navržené výšky

Při posuzování odchylek si je u Tab. 9 možné všimnout, že se snižující se tloušťkou žebra se odchylka zvyšovala. Je možné tvrdit, že tisk takovýchto profilů je komplikovanější a je provázen i větší chybou.

U vlnitých žebíř byla měřena i jejich tloušťka, která se u každého žebra měnila. K měření byla nahodile vybrána žebra o tloušťce 0,15, 0,40 a 0,8 mm.



Obrázek 69 Měření tloušťky

Pro komplexnější zhodnocení přesnosti byla žebra měřena ve třech různých místech. Bohužel pomocí měřicího zařízení Alicona nelze proměřit naprosto přesně hodnoty ve středu a u kořene žebra proto tyto rozměry není možné brát jako objektivní hodnoty k posouzení. Jako adekvátní hodnoty je možné brát hodnoty změřené jako Horní rozměr, protože v těchto místech objektiv rozměr bezpečně změří.

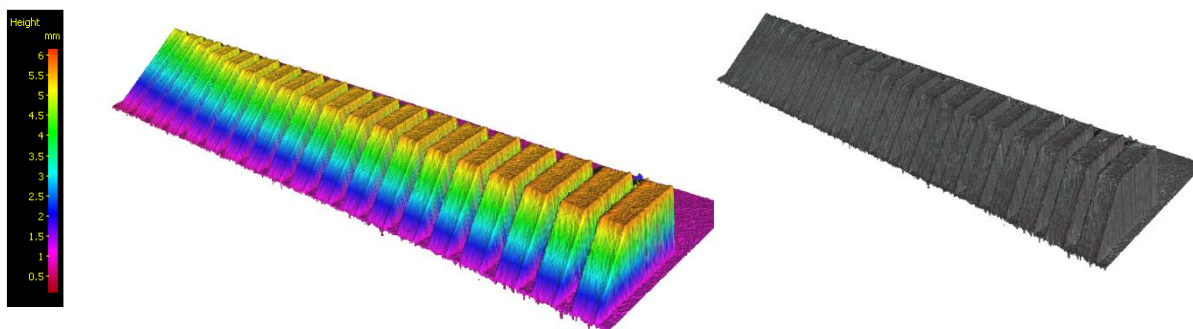
I samotné výsledky ukazují, že hodnoty ve středu a u kořene se zásadně liší od jmenovitého rozměru žebra. Největší nepřesnosti byly zjištěny u žebra s rozměrem 0,15 mm, kde byla změřena odchylka větší než 0,1 mm. Lze tedy říct, že takto malé rozměry jsou pro tisk kritické. Na nepřesnost mohla mít vliv opět orientace a také velké množství podpor.

Jmenovitý rozměr [mm]	Rozměr horní [mm]	Rozměr ve středu [mm]	Rozměr u kořene [mm]
0,15	0,277	0,3395	0,495
0,4	0,4681	0,5026	0,6502
0,8	0,7681	0,8635	1,0243

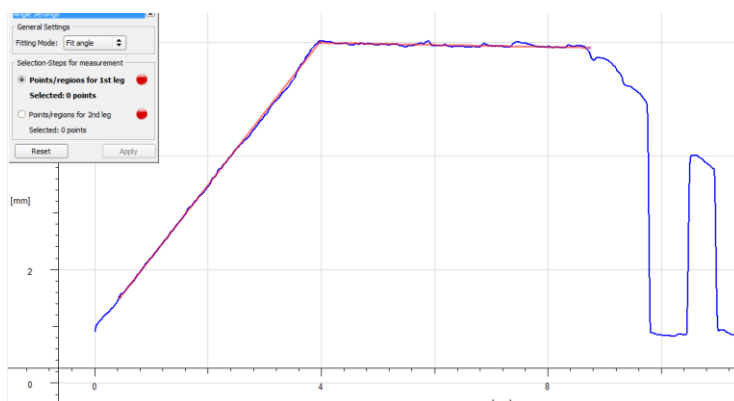
Tabulka 10 Měření tloušťky žebra

Druhým měřeným prvkem byla žebra zkosená.

U toho typu žebíř byla měřena přesnost úhlu. K měření byla vybrána opět žebra s úhly 53°, 51°.



Obrázek 70 Scany zkosených žeber



Obrázek 71 Měření jednotlivých úhlů

Úhly	Skutečný úhel [°]	Odchylka [°]
53°	52,9946	-0,0054
51°	51,1803	0,1803

Tabulka 11 Měření úhlů u zkosených žeber

Podobně jako u měření kontaktní metodou i zde není možné přesně určit, proč žebra, která jsou sousedící, vykazují takové rozdíly hodnot. Podobně jako u kontaktního měření může být problémem orientace, protože měřená žebra ležela v ose XZ.

4 Zhodnocení

Pro celkové zhodnocení je potřeba provést porovnání hodnot získaných z jednotlivých kontaktních měření. Prvním hodnocením prvkem jsou zkosená žebra, která se vyskytují jak na ploše č. 1, tak i na ploše č. 2.

Jmenovitý rozměr	Odchylka 1. Měření [°]	Odchylka 2. Měření [°]	Odchylka 3. Měření [°]
60°	0,140°	0,022°	0,033°
56°	0,340°	0,295°	0,190°
52°	0,328°	0,371°	0,338°
49°	0,288°	0,189°	0,141°
47°	0,173°	0,259°	0,234°
45°	0,503°	0,458°	0,451°
43°	0,315°	0,400°	0,325°
42,1°	0,484°	0,501°	0,633°
39°	0,293°	0,553°	0,600°
37°	0,329°	0,414°	0,510°

Tabulka 12 Odchylky – zkosená žebra, plocha č. 1

Jmenovitý rozměr	Odchylka 1. Měření [°]	Odchylka 2. Měření [°]	Odchylka 3. Měření [°]
60°	0,281°	0,217°	0,276°
56°	1,208°	1,020°	0,018°
52°	0,122°	0,134°	0,020°
49°	0,387°	0,232°	0,188°
47°	0,014°	0,539°	0,425°
45°	-0,773°	-0,900°	-0,931°
43°	0,117°	0,193°	0,437°
42,1°	-0,985°	-0,536°	-0,608°
39°	-0,758°	-0,511°	-0,602°
37°	0,338°	0,337°	0,167°

Tabulka 13 Odchylky – zkosená žebra, plocha č. 2

Hodnoty získané z prvního měření na ploše č. 1 jsou dosti proměnlivé. Odchylky se zde pohybují v rozmezí 0,1° – 0,5° a celkový průběh změn je kolísavý. Barevné zbarvení hodnot zobrazuje průběh hodnot. Červená barva definují neustálý růst odchylek, zelená jejich pokles a barva černá definuje proměnlivé chování.

Hodnoty získané z plochy č. 2 jsou oproti předchozí ploše více rozdílné. Z tabulek si je možné všimnout, že od úhlu 47° do úhlu 60° je průběh hodnot u obou stěn kolísavý. Žebra, s hodnotami těchto úhlů, se v obou případech vyskytují v krajních částech krychle. Je tedy

možné, že v těchto místech je větší citlivost na zachycení chyby. Z hodnot je patrné, že nelze striktně říci, že vlivem tepelného zpracování došlo ke snížení / zvýšení chyby, stejně jako po odstranění podpor. Zajímavým zjištěním může být fakt, že u plochy č. 2 jsou na sousední ploše kruhové díry, které jsou v těsné blízkosti žeber s úhlem 60°. Tímto by bylo možné vysvětlit větší odchylky, než jsou u stejného úhlu u plochy č. 1.

Další prvek, který je na ploše č. 1 i na ploše č. 2, je kuželová díra.

Jmenovitý rozměr	Odchylka 1. Měření [°]	Odchylka 2. Měření [°]	Odchylka 3. Měření [°]
20°	-0,182	-0,564	-0,514

Tabulka 14 Odchylky – kuželová díra, plocha č. 1

Jmenovitý rozměr	Odchylka 1. Měření [°]	Odchylka 2. Měření [°]	Odchylka 3. Měření [°]
20°	-0,014	-0,282	-0,200

Tabulka 15 Odchylky – kuželová díra, plocha č. 2

Ze získaných hodnot je opět vidět, že průběh je u obou děr kolísavý. Vlivem tepelného zpracování došlo ke zvýšení chyby a následné odstranění podpor chyby lehce snížilo. Dále byla posuzována kuželová díra ležící na ploše č. 1 rotující okolo osy Z a kuželová díra ležící na ploše č. 2 rotující okolo X. Z výsledků je patrné, že největší problémy nastávaly u děr, jejichž osa leží v rovině Z.

Posledním společným prvkem pro stěnu č. 1 a stěnu č. 2 jsou vlnitá žebra. U těchto prvků byla hodnocena odchylka od tvaru profilu. Při porovnávání výsledků nenastal případ jako u předchozích prvků, kde většinou byl průběh přibližně stejný. U plochy č. 1 je průběh rostoucí, kdežto u plochy č. 2 je naopak kolísavý. I zde je na první pohled vidět, že odchylky jsou podstatně výraznější u plochy č. 2. Na této ploše leží pozorovaná plocha profilu rovnoběžně s osou Z, u plochy č. 1 leží rovnoběžně s osou Y. Jako v předchozím případě platí, že problémy nastávaly opět v rovině Z.

Jmenovitý rozměr	Odchylka 1. měření [mm]	Odchylka 2. měření [mm]	Odchylka 3. měření [mm]
0,000	0,206	0,130	0,138

Tabulka 16 Odchylky - vlnité žebro, plocha č. 1

Jmenovitý rozměr	Odchylka 1. měření [mm]	Odchylka 2. měření [mm]	Odchylka 3. měření [mm]
0,000	0,606	0,579	0,476

Tabulka 17 Odchylky ze všech měření - vlnité žebro, plocha č. 2

Na ploše č. 1 se dále vyskytuje kruhová díra \varnothing 10 mm, která slouží k vysypání zbylého stavebního prášku. Protože na ploše č. 3 se také vyskytuje díra \varnothing 10, dojde k jejich vzájemnému posouzení pouze z hlediska přesnosti průměru.

	Jmenovitý rozměr [mm]	Odchylka 1. měření [mm]	Odchylka 2. měření [mm]	Odchylka 3. měření [mm]
Průměr	10	0,134	0,161	0,179
Hodnota v ose X	15	0,222	0,150	0,146
Hodnota v ose Y	20	0,431	0,325	0,311

Tabulka 18 Odchylky - kruhová díra \varnothing 10 mm, plocha č. 1

	Jmenovitý rozměr [mm]	Odchylka 1. měření [mm]	Odchylka 2. měření [mm]	Odchylka 3. měření [mm]
Průměr	10	-0,026	-0,032	-0,039
Hodnota v ose X	25	-0,074	-0,043	-0,088
Hodnota v ose Z	52	-0,070	-0,058	-0,082

Tabulka 19 Odchylky – kruhová díra \varnothing 10 mm, plocha č. 3

Při porovnávání přesností průměrů vykazují získané hodnoty na obou plochách rostoucí charakter. Zásadní rozdíl nastává ve znaménku, kdy hodnoty plochy č. 1 jsou kladné a naopak hodnoty plochy č. 3 jsou záporné. To může být způsobeno opět rozdílným umístěním otvorů, díra na ploše č. 1 leží v ose Z, kdežto díra na ploše č. 3 ležící v ose Y. Hodnoty odchylek na ploše č. 1 nabývají vyšších hodnot, jsou tedy považovány za krizovější. Proto je možné opět tvrdit, že příčinou je komplikovaná stavba v ose Z.

Protože na ploše č. 3 se vyskytuje i díra \varnothing 8 mm, jejíž hodnoty odchylek jsou také rostoucí a nabývají záporných hodnot, je možné tvrdit, že důvod těchto chyb je naprosto stejný jako u \varnothing 10 mm.

	Jmenovitý rozměr [mm]	Odchylka 1. měření [mm]	Odchylka 2. měření [mm]	Odchylka 3. měření [mm]
Průměr	8	-0,001	-0,023	-0,026
Hodnota v ose X	10	-0,123	-0,084	-0,131
Hodnota v ose Z	52	-0,019	-0,024	-0,044

Tabulka 20 Odchylky – kruhová díra \varnothing 8 mm, plocha č. 3

Na hodnocené ploše č. 3 se vyskytují také drážky a to trojúhelníková, s rádiusem a schodovitá. U trojúhelníkové drážky je odchylka minimální a pro všechna tři měření se její hodnota nezměnila, což je v zásadě ideální stav. U drážky s rádiusem je průběh hodnot rostoucí a u schodovité drážky je průběh kolísavý.

U všech těchto prvků jsou hodnoty odchylek záporné a důvodem bude opět orientace součásti, kdy tyto prvky leží v rovině XZ.

Jmenovitý rozměr	Odchylka 1. měření [°]	Odchylka 2. měření [°]	Odchylka 3. měření [°]
60°	-0,001	-0,001	-0,001

Tabulka 21 Odchylky – trojúhelníková drážka

Jmenovitý rozměr	Odchylka 1. měření [mm]	Odchylka 2. měření [mm]	Odchylka 3. měření [mm]
2,5	-0,118	-0,125	-0,126

Tabulka 22 Odchylky – drážka s rádiusem

	Jmenovitý rozměr [mm]	Odchylka 1. měření [mm]	Odchylka 2. měření [mm]	Odchylka 3. měření [mm]
Šířka kapsy	24	-0,097	-0,137	-0,123
Vzdálenost v ose X	8	-0,031	-0,062	-0,082
Vzdálenost v ose Z	9	-0,227	-0,239	-0,237

Tabulka 23 Odchylky – schodovitá drážka

U měřených prvků nastávaly nejčastěji chyby v ose Z a rovině XZ. Důsledkem těchto chyb může být volba orientace, směr a strategie tisku. Bohužel informace o strategii tisku bývají často výrobcovým know – how, tím pádem není možné všechny chyby a nejasnosti stoprocentně objasnit.

5 Závěr

První kapitola této diplomové práce se věnuje samotnému principu 3D tisku a popisu výrobního postupu tištěné součásti. V následující kapitole jsou zmíněny klady a zápory 3D tisku. Hlavní dominantou této části je popis omezujících parametrů, které se u této technologie vyskytují. Mezi tyto parametry patří například vhodná orientace součásti v pracovním prostoru, tloušťka jednotlivých vrstev, rychlost a přesnost tisku, výkon laseru, zbytkové pnutí atd. V této kapitole je zmíněna řada studií a výzkumů, které se těmito omezeními zabývaly.

Na teoretický rozbor navazuje praktická část diplomové práce, pro kterou byla navržena součást. Tato součást obsahuje řadu prvků, na kterých bylo cílem změřit některá z omezení. Obsahem této kapitoly je popis součásti, jednotlivých prvků a popis plánovaných měření, která by se měla v rámci diplomové práce proměřit.

Předposlední kapitolou je samotné zhodnocení experimentu, ve které jsou rozebrány jednotlivé prvky, které se na plochách vyskytují. Pro zhodnocení bylo zapotřebí provést kontaktní měření, pro která byla na plochách č. 1, 2 a 3 vytvořena síť bodů. V těchto bodech bylo možné sledovat odchylky od ideálního modelu. Dále zde byly měřeny různé druhy drážek, kruhových a kuželových děr a dva typy žeber. Všechny tyto prvky byly měřeny celkem 3x. První měření proběhlo po příchodu součásti, která byla tepelně nezpracovaná a obsahovala všechny potřebné podpory. Druhé měření proběhlo po tepelném zpracování, konkrétně žíhání k odstranění pnutí a poslední měření proběhlo po odstranění podpor.

Ze získaných výsledků není možné přesně říci, jaký druh úprav (tepelné zpracování, odstranění podpor) měl na součást největší vliv, protože hodnoty se u různých prvků značně lišily. U některých prvků odchylky od modelu postupně rostly, jinde klesaly a v některých případech byl jejich průběh kolísavý.

Na součásti byla následně měřena její drsnost a posléze i tvrdost. Při měření drsnosti byl použit mobilní drsnoměr. Došlo k proměření ploch, které byly testovány již při kontaktním měření, ale také ploch, které dříve obsahovaly podpory. U těchto ploch se očekávaly vyšší hodnoty drsností, což se potvrdilo. Stejně tak se potvrdil i předpoklad vycházející z předchozího kontaktního měření, a to, že problémy nastaly opět u roviny XZ. Hodnoty drsností jak u plochy č. 3, tak u plochy rovnoběžné s plochou č. 3, která dřív obsahovala podpory, vykazovaly nejvyšší hodnoty.

Po proměření drsnosti následovalo již zmíněné měření tvrdosti, konkrétně metodou podle Rockwella. Na všech plochách byly přebroušeny čtyři plošky, na kterých následně probíhalo měření. K přebroušení muselo dojít z důvodu nevyhovujícího povrchu součásti. Hodnoty tvrdostí se podstatně lišily, což mohlo být zapříčiněno nehomogenní strukturou, nevhodným podložením součásti, zachycením důlku atd. Metoda podle Rockwella je v tomto případě bohužel pouze orientační, pro další měření by bylo vhodnější použít například metodu podle Vickerse. V tomto případě je zapotřebí dokonale vyleštěný povrch, který bohužel nemohl být z časových důvodů připraven.

Posledním měřením bylo měření přesností zkosených a vlnitých žeber ze scanu, který byl pořízen na zařízení Alicona. Ze získaných hodnot vyplynulo, že velké nepřesnosti vznikaly u stavby vlnitého žebra o tloušťce 0,15 mm. Navržený tvar i tloušťka činili velké problémy, jež se projevíly markantní odchylkou.

Jasným výsledkem je, že na přesnost rozměrů měla zásadní vliv volba orientace součásti. Ze získaných hodnot je patrné, že největší problémy a nepřesnosti vznikaly při stavbě v rovině XZ. Zde docházelo ke vzniku převážně záporných hodnot a hodnot s největšími odchylkami. Toto tvrzení se následně potvrdilo i při měření drsnosti povrchu, kde největších hodnot drsností bylo dosahováno právě na plochách, které se vyskytovaly v těchto rovinách.

6 Seznam použité literatury

- [1] 14220. *3D tisk* [online]. 2013 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-uvod/>
- [2] Evektor. *Rapid prototyping* [online]. 2014 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: <http://www.evektor.cz/rapid-prototyping.aspx>
- [3] Innomia. *Rapid prototyping* [online]. 2012 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: <http://www.innomia.cz/rapid-prototyping>
- [4] *Rapid prototyping and manufacturing technology* [online]. 2014 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6075759>
- [5] LU, Kathy a William T. REYNOLDS. 3DP process for fine mesh structure printing. *Powder Technology*. 2008, vol. 187, issue 1, s. 11-18. DOI: 10.1016/j.powtec.2007.12.017.
- [6] A Study of Part Orientation in Rapid Prototyping. *A Study of Part Orientation in Rapid Prototyping*. 2014.
- [7] STRATIL, Richard. *Příprava 3D modelu pro 3D tisk*. 2014.
- [8] YAN, Chunze. Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. 2014.
- [9] WANG, Di. Study on the designing rules and processability of porous structure based on selective laser melting (SLM). 2013.
- [10] CALIGNANO, F. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. 2014.
- [11] ROMBOUTS, M. Surface finish after laser metal deposition. 2013.
- [12] YADROITSEV, I. Single track formation in selective laser melting of metal powders. 2010.
- [13] Gu, D., Shen, Y. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and kontrol methods. 2008.
- [14] SONG, Bo. Vacuum heat treatment of iron parts produced by selective laser melting: Microstructure, residual stress and tensile behavior. 2014.
- [15] SENTHILKUMARAN. Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering. 2009.

- [16] TURKER, M. *Effect of production parameters on the properties of IN 718 superalloy by three-dimensional printing*. 2008.
- [17] Misan. *Souhrnný katalog* [online]. 2014 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: http://www.misan.cz/download/concept-laser/Katalog_Concept_Laser.pdf
- [18] *Vacumar* [online]. 2014 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/assets/files/Vacumar-.pdf>
- [19] ZEISS [online]. 16.5.2015 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: http://www.zeiss.cz/industrial-metrology/cs_cz/produkty/systemy/bridge-type-cmms/prismo-navigator.html
- [20] *Odvrtávací metoda pro měření zbytkových napětí ve výzkumu a v průmyslu*. 2013. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2433310/>
- [21]. *Innomia* [online]. [cit. 2015-05-10]. DMLS (Direct Metal Laser Sintering) - 3D tisk kovu. 2012 Dostupné z: <http://www.innomia.cz/sluzby/kovove-prototypy>
- [22] *Misan* [online]. [cit. 2015-05-10]. Concept Laser M2 cusing. 2015. Dostupné z: <http://www.misan.cz/concept-laser/katalog-detail/m2-cusing-concept-laser-m2-cusing/?viewpart=2=2>
- [23] *Měření drsnosti povrchu*. Projekt DIGIT – digitalizace výuky na ISŠTE Sokolov. 2013.
- [24] *Měření drsnosti povrchů se zaměřením na měřicí techniku Mytutoyo SJ 210*. České Budějovice, 2013. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita.

PŘÍLOHA č. 1

Hodnoty z 1. kontaktního měření

Plocha č. 1

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [°]	Odchylka [°]
60°	60,140°	0,140°
56°	56,340°	0,340°
52°	52,328°	0,328°
49°	49,288°	0,288°
47°	47,173°	0,173°
45°	45,503°	0,503°
43°	43,315°	0,315°
41°	41,484°	0,484°
39°	39,293°	0,293°
37°	37,329°	0,329°

Tabulka 24 Odchylky od jmenovitých rozměrů na zkosených žebrech

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [°]	Odchylka [°]
20°	19,818	-0,182

Tabulka 25 Odchylka od jmenovitého rozměru kuželové díry

	Jmenovitý rozměr [mm]	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
Průměr	10	10,134	0,134
Hodnota v ose X	15	15,222	0,222
Hodnota v ose Y	20	20,431	0,431

Tabulka 26 Odchylky od jmenovitých rozměrů kruhové díry

Hodnoty ve směru osy X a Z jsou vzdálenosti středu díry k souřadnému systému součásti.

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
0,000	0,206	0,206

Tabulka 27 Odchylka od tvaru profilu vlnitého žebra

Plocha č. 2

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [°]	Odchylka [°]
60°	60,281°	0,281°
56°	57,208°	1,208°
52°	52,122°	0,122°
49°	49,387°	0,387°
47°	47,014°	0,014°
45°	44,227°	-0,773°
43°	43,117°	0,117°
42,1°	41,115 °	-0,985°
39°	38,242°	-0,758°
37°	37,338°	0,338°

Tabulka 28 Odchylky od jmenovitých rozměrů na zkosených žebrech

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [°]	Odchylka [°]
20°	19,986	-0,014

Tabulka 29 Odchylky od jmenovitých rozměrů na zkosených žebrech

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
0,000	0,606	0,606

Tabulka 30 Odchylka od tvaru profilu vlnitého žebra

7.1.3. Plocha č. 3

	Jmenovitý rozměr [mm]	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
Průměr	10	9,974	-0,026
Hodnota v ose X	25	24,926	-0,074
Hodnota v ose Z	52	51,930	-0,070

Tabulka 31 Odchylka od jmenovitého rozměru kruhové díry průměr 10 mm

	Jmenovitý rozměr [mm]	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
Průměr	8	7,999	-0,001
Hodnota v ose X	10	9,877	-0,123
Hodnota v ose Z	52	51,981	-0,019

Tabulka 32 Odchylka od jmenovitého rozměru kruhové díry průměr 8 mm

Hodnoty ve směru osy X a Z jsou vzdálenosti středu díry k souřadnému systému součásti. Stejně tak je tomu i u schodišťové drážky.

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [°]	Odchylka [°]
60°	59,999	-0,001

Tabulka 33 Odchylka od jmenovitého rozměru trojúhelníkové drážky

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
2,5	2,382	-0,118

Tabulka 34 Odchylka od jmenovitého rozměru drážky s rádiusem

	Jmenovitý rozměr [mm]	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
Šířka kapsy	24	23,903	-0,097
Vzdálenost v ose X	8	7,969	-0,031
Vzdálenost v ose Z	9	8,773	-0,227

Tabulka 35 Odchylka od jmenovitého schodišťové drážky

PŘÍLOHA č. 2

Hodnoty z 2. kontaktního měření

Plocha č. 1

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [°]	Odchylka [°]
60°	60,022°	0,022°
56°	56,295°	0,295°
52°	52,371°	0,371°
49°	49,189°	0,189°
47°	47,259°	0,259°
45°	45,458°	0,458°
43°	43,400°	0,400°
41°	41,501°	0,501°
39°	39,553°	0,553°
37°	37,414°	0,414°

Tabulka 36 Odchylky od jmenovitých rozměrů na zkosených žebrech

	Jmenovitý rozměr [mm]	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
Průměr	10	10,161	0,161
Hodnota v ose X	15	15,150	0,150
Hodnota v ose Y	20	20,325	0,325

Tabulka 37 Odchylky od jmenovitých rozměrů kruhové díry

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [°]	Odchylka [°]
20°	19,536	-0,564

Tabulka 38 Odchylka od jmenovitého rozměru kuželové díry

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
0,000	0,130	0,130

Tabulka 39 Odchylka od tvaru profilu vlnitého žebra

Plocha č. 2

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [°]	Odchylka [°]
60°	60,217°	0,217°
56°	57,020°	1,020°
52°	52,134°	0,134°
49°	49,232°	0,232°
47°	47,539°	0,539°
45°	44,100°	-0,900°
43°	43,193°	0,193°
42,1°	41,564°	-0,536°
39°	38,489°	-0,511°
37°	37,337°	0,337°

Tabulka 40 Odchylky od jmenovitých rozměrů na zkosených žebrech

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [°]	Odchylka [°]
20°	19,718	-0,282

Tabulka 41 Odchylka od jmenovitého rozměru kuželové díry

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
0,000	0,579	0,579

Tabulka 42 Odchylka od tvaru profilu vlnitého žebra

Plocha č. 3

	Jmenovitý rozměr [mm]	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
Průměr	10	9,968	-0,032
Hodnota v ose X	25	24,957	-0,043
Hodnota v ose Z	52	51,942	-0,058

Tabulka 43 Odchylka od jmenovitého rozměru kruhové díry průměr 10 mm

	Jmenovitý rozměr [mm]	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
Průměr	8	7,977	-0,023
Hodnota v ose X	10	9,916	-0,084
Hodnota v ose Z	52	51,976	-0,024

Tabulka 44 Odchylka od jmenovitého rozměru kruhové díry průměr 8 mm

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [°]	Odchylka [°]
60°	59,999	-0,001

Tabulka 45 Odchylka od jmenovitého rozměru trojúhelníkové drážky

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
2,5	2,375	-0,125

Tabulka 46 Odchylka od jmenovitého rozměru drážky s rádiusem

	Jmenovitý rozměr [mm]	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
Šířka kapsy	24	23,863	-0,137
Vzdálenost v ose X	8	7,938	-0,062
Vzdálenost v ose Z	9	8,761	-0,239

Tabulka 47 Odchylka od jmenovitého schodišťové drážky

PŘÍLOHA č. 3

Hodnoty z 3. kontaktního měření

Plocha č. 1

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [°]	Odchylka [°]
60°	60,033°	0,033°
56°	56,190°	0,190°
52°	52,338°	0,338°
49°	49,141°	0,141°
47°	47,234°	0,234°
45°	45,451°	0,451°
43°	43,325°	0,325°
41°	41,633°	0,633°
39°	39,600°	0,600°
37°	37,510°	0,510°

Tabulka 48 Odchylky od jmenovitých rozměrů na zkosených žebrech

	Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr	Odchylka
Průměr	10	10,179	0,179
Hodnota v ose X	15	15,146	0,146
Hodnota v ose Y	20	20,311	0,311

Tabulka 49 Odchylky od jmenovitých rozměrů kruhové díry

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [°]	Odchylka [°]
20°	19,486	-0,514

Tabulka 50 Odchylka od jmenovitého rozměru kuželové díry

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr	Odchylka
0,000	0,138	0,138

Tabulka 51 Odchylka od tvaru profilu vlnitého žebra

Plocha č. 2

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [°]	Odchylka [°]
60°	60,276°	0,276°
56°	56,018°	0,018°
52°	52,020°	0,020°
49°	49,188°	0,188°
47°	47,425°	0,425°
45°	44,069°	-0,931°
43°	43,437°	0,437°
42,1°	41,492°	-0,608°
39°	38,389 °	-0,602°
37°	37,167°	0,167°

Tabulka 52 Odchylky od jmenovitých rozměrů na zkosených žebrech

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [°]	Odchylka [°]
20°	19,200	-0,200

Tabulka 53 Odchylka od jmenovitého rozměru kuželové díry

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
0,000	0,476	0,476

Tabulka 54 Odchylka od tvaru profilu vlnitého žebra

Plocha č. 3

	Jmenovitý rozměr [mm]	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
Průměr	10	9,961	-0,039
Hodnota v ose X	25	24,912	-0,088
Hodnota v ose Z	52	51,918	-0,082

Tabulka 55 Odchylka od jmenovitého rozměru kruhové díry průměr 10 mm

	Jmenovitý rozměr [mm]	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
Průměr	8	7,974	-0,026
Hodnota v ose X	10	9,869	-0,131
Hodnota v ose Z	52	51,956	-0,044

Tabulka 56 Odchylka od jmenovitého rozměru kruhové díry průměr 8 mm

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
60°	59,999	-0,001

Tabulka 57 Odchylka od jmenovitého rozměru trojúhelníkové drážky

Jmenovitý rozměr	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
2,5	2,374	-0,126

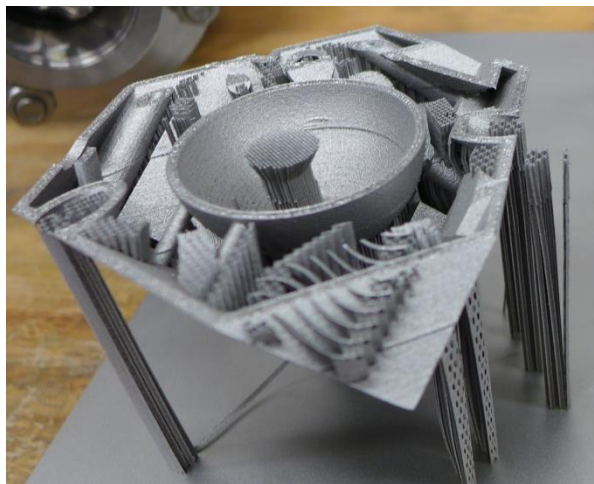
Tabulka 58 Odchylka od jmenovitého rozměru drážky s rádiusem

	Jmenovitý rozměr [mm]	Skutečný rozměr [mm]	Odchylka [mm]
Šířka kapsy	24	23,863	-0,123
Vzdálenost v ose X	8	7,918	-0,082
Vzdálenost v ose Z	9	8,763	-0,237

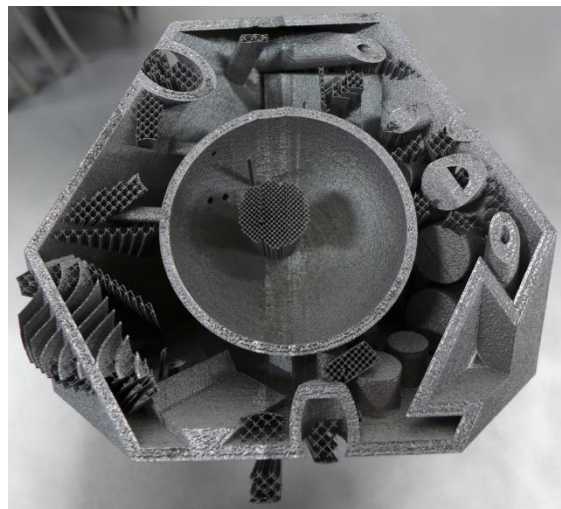
Tabulka 59 Odchylka od jmenovitého schodišťové drážky

PŘÍLOHA č. 4

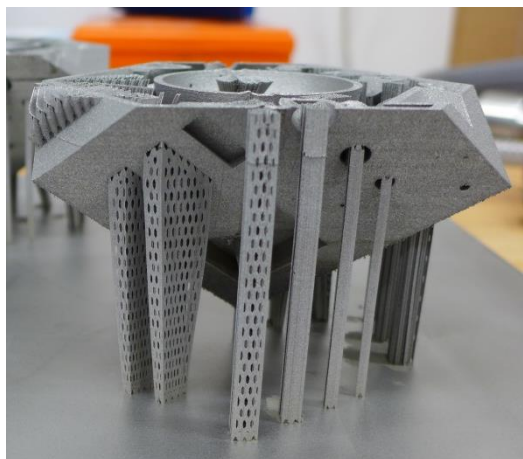
Fotografie nevyrobené součásti



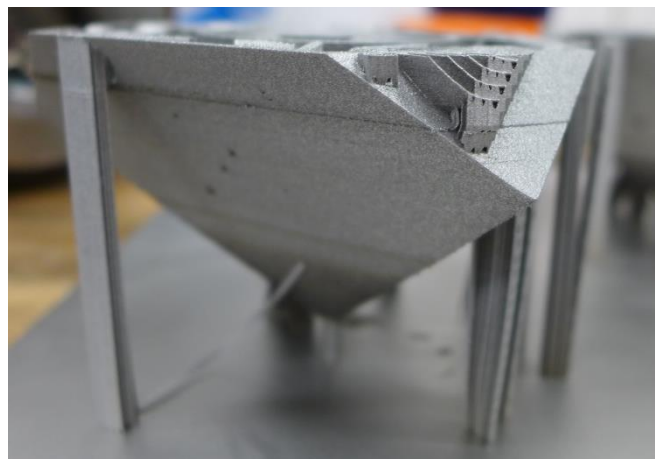
72 a)



72 b)



72 c)



72 d)

Obrázek 72 Ukázka nevyrobené součásti