



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

12134 Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Hlavní charakteristiky a zkušební metody pro výrobky vyráběné
aditivními technologiemi

Main characteristics and corresponding test methods for products made by
additive manufacturing

Diplomová práce

Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Bc. Ondřej Dyntar

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dyntar** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **408924**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Hlavní charakteristiky a zkušební metody pro výrobky vyráběné aditivními technologiemi

Název diplomové práce anglicky:

Main characteristics and corresponding test methods for products made by additive manufacturing

Pokyny pro vypracování:

1. Aditivní technologie výroby a moderní vývojové trendy
2. Dělení základních technologií aditivní výroby a popis základních funkčních principů
3. Požadavky na součásti zhotovené aditivními technologiemi a vhodné zkušební postupy
4. Realizace zkušebního tisku a následná rozměrová kontrola

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2018**

Platnost zadání diplomové práce: _____



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

27.4.2018

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji,

že jsem tuto závěrečnou práci vypracoval zcela samostatně a veškerou použitou literaturu s dalšími podkladovými materiály, které jsem použil, uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne 20. července 2018

.....

Bc. Ondřej Dyntar

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Liborovi Beránkovi, Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl při tvorbě této práce.

ANOTACE

Název

Hlavní charakteristiky a zkušební metody pro výrobky vyráběné aditivními technologiemi

Klíčová slova

Aditivní technologie, 3D tisk, zkušební metody, FDM, průmyslová výpočetní tomografie

Abstrakt

Tato diplomová práce se věnuje problematice aditivních technologií. Zabývá se jejich současným stavem, včetně popisu jednotlivých metod a také uvádí nové moderní vývojové trendy. Dále popisuje hlavní charakteristiky a zkušební metody pro výrobky vyráběné aditivními technologiemi. Závěrečná část je zaměřena na realizaci zkušebního tisku modelu proudového motoru a jeho rozměrovou kontrolu pomocí průmyslové výpočetní tomografie.

Title

Main characteristics and corresponding test methods for products made by additive manufacturing

Key words

Additive manufacturing, 3D printing, test methods, FDM, industrial computed tomography

Abstract

This diploma thesis deals with the issue of additive manufacturing technologies. It focuses on their current state, describes individual methods and introduces new modern development trends. Moreover, it also describes the main characteristics and corresponding testing methods for products made by additive manufacturing technologies. The final part of this thesis deals with the implementation of the test print of the jet engine model and its dimensional measurement and control using industrial computed tomography.

OBSAH

Čestné prohlášení.....	3
Poděkování	4
Anotace	5
Úvod	8
1 Aditivní technologie	9
1.1 Historický vývoj	10
1.2 Současný stav a moderní vývojové trendy	10
1.3 Postup výroby	14
2 Dělení aditivních technologií	17
2.1 Metody využívající materiál v pevném skupenství.....	17
2.1.1 FDM – Fused Deposition Modeling	17
2.1.2 MJM – Multi Jet Modeling.....	18
2.1.3 SLS – Selective Laser Sintering.....	19
2.1.4 DMLS – Direct Metal Laser Sintering	20
2.1.5 3DP – 3D Inkjet Printing.....	21
2.1.6 LOM – Laminated Object Manufacturing.....	22
2.2 Metody využívající materiál v kapalném skupenství.....	23
2.2.1 SLA – Stereolithography.....	23
2.2.2 SGC – Solid Ground Curing	24
2.2.3 PJ – Poly Jet.....	25
2.3 Metody využívající materiál v plynném skupenství.....	26
2.3.1 MGS – Metal from the Gaseous State	26
3 Požadavky na součásti zhotovené aditivními technologiemi a vhodné zkušební postupy.....	27
3.1 Charakteristiky součástí.....	27
3.2 Výběrová kritéria	30
3.3 Zkušební postupy pro výrobky vyráběné aditivními technologiemi	31
3.3.1 Zkoušky tvrdosti	31
3.3.2 Mechanické zkoušky statické	34
3.3.3 Mechanické zkoušky dynamické	38
3.3.4 Měření drsnosti povrchu	41
4 Realizace zkušebního tisku	45
4.1 3D Tiskárna.....	45
4.1.1 Technické parametry	46

4.1.2	Software.....	46
4.1.3	Materiál.....	50
4.1.4	Postprocessing.....	52
4.2	Model	53
4.2.1	Součásti modelu	53
4.3	Typické vady metody FDM.....	55
4.4	Výrobní náklady	59
5	Rozměrová kontrola modelu.....	61
5.1.1	Technické parametry	61
5.2	Rozměrová kontrola dmyhadla.....	62
5.3	Rozměrová kontrola vysokotlakého kompresoru stupně 5	67
5.4	Rozměrová kontrola sestavy.....	72
6	Závěr	82
	Seznam použité literatury	84
	Seznam zdrojů obrázků, tabulek a grafů.....	86
	Seznam obrázků	89
	Seznam tabulek	92
	Seznam grafů	93

ÚVOD

Aditivní technologie, neboli 3D tisk, jsou v posledních pár letech na velkém vzestupu, znatelně tomu přispělo období 2002–2012, kdy došlo k vypršení přes 209 patentů týkajících se procesu výroby. V letech 2013–2014 pak vypršelo dalších 16 klíčových patentů týkajících se materiálové extruze, slinování prášku a fotopolymerizace. Krom konvenčních metod výroby se začínají ve firmách čím dál více zavádět právě aditivní technologie a dochází tak k jejich zdokonalování a přizpůsobování danému výrobnímu procesu. Kvalita tisku vyrobených součástí neustále roste a zároveň jsou na trh uváděny nové principy výroby, pomocí kterých může být objekt zhotoven.

Podle průzkumu provedeného společností EY v roce 2016 používá 39 % českých výrobních firem aditivní technologie, 7 % plánuje jejich použití do 2 let a 10 % plánuje zavedení této technologie do 5 let. Firmy zavádějící aditivní technologie většinou počítají se snížením výrobních nákladů, efektivnější a rychlejší výrobou oproti konvenčním technologiím. S 3D tiskem jsou však spojena rizika vzniklá vysokou počáteční investicí, nedostatkem „know-how“ nebo různými technologickými překážkami.

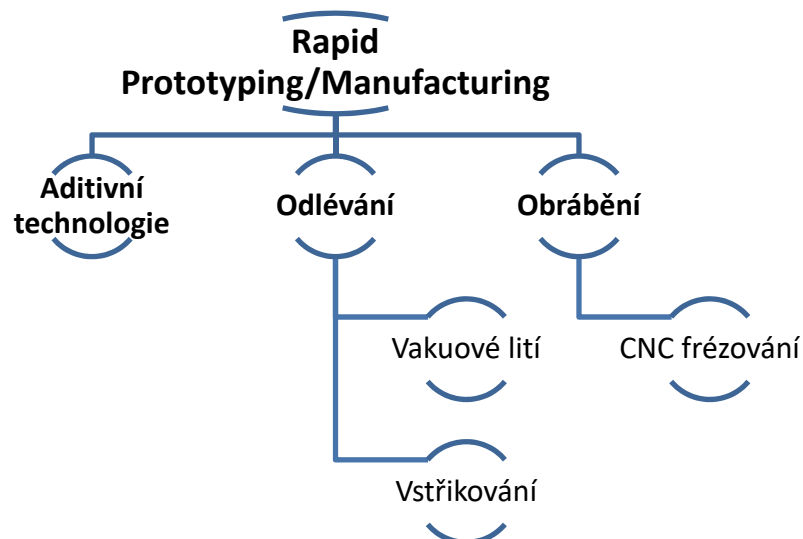
Jednotlivé aditivní technologie mají velké specifické uplatnění napříč různými odvětvími, například v leteckém, automobilovém, vojenském, zdravotním a stavebním průmyslu. Hlavní předností je možnost vytvořit přesné a složité tvary, které by šly jen stěží zhotovit za pomoci konvenčních metod. S nárůstem využití 3D tisku je důležité zvážit odlišné vlastnosti vyrobených součástí v závislosti na použité aditivní technologii.

Cílem této diplomové práce je zhodnotit současný stav a moderní vývojové trendy v oblasti aditivních technologií. To souvisí s rozdělením základních technologií aditivní výroby a popisem jednotlivých funkčních principů. Dále se budu zabývat požadavky kladenými na součásti, které jsou zhotoveny touto technologií a uvedu nejčastější zkušební postupy pro ověření těchto požadavků. Závěrečná část této práce bude spočívat v realizaci zkušebního tisku modelu pomocí nejrozšířenější metody FDM (Fused Deposition Modeling). Na vytištěném modelu budu demonstrovat nedostatky vzniklé vadami tisku a popíšu jejich možnosti odstranění. Dále provedu rozměrovou kontrolou pomocí průmyslové výpočetní tomografie, která je v současnosti nejrychleji se rozvíjející oblastí nedestruktivního testování.

1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Aditivní technologie, označovány jako AM z anglického Additive Manufacturing, jsou moderním trendem výroby součástek. Slouží k produkci jak prototypů, tak i funkčních komponentů vyrobených co nejrychleji a nejlevněji. První známky aditivní technologie byly na trhu již před 30 lety, tehdy se jednalo o stereolitografickou tiskárnu. Od té doby přinesl vývoj mnoho dalších metod výroby 3D objektů, které můžeme zhotovit nejen z plastů, ale i kovů a keramiky. I po 30 letech vývoje všechny tyto metody pracují na stejném principu, kterým je výroba 3D objektu vrstvu po vrstvě. Liší se pak především tloušťkou vrstvy, tisknutým materiálem a způsobem jeho spojení. Aditivní technologie ve výrobním procesu můžeme zařadit do dvou úrovní:

- Rapid Prototyping (RP) – cílem je zhotovení prototypu součásti v co nejkratším čase s následným testováním funkčních, mechanických a jiných vlastností. Většinou se tedy nejedná o konečný výrobek určený zákazníkovi. Důvodem výroby těchto prototypů je nalezení chyb ve výrobní dokumentaci a koncepci, ověření vyrobitelnosti a smontovatelnosti, posouzení vzhledu a ověření vhodnosti pro sériovou výrobu. Rozdělení Rapid Prototypingu je znázorněno na obrázku 1. ^[1]
- Rapid Manufacturing (RM) – záměrem je výroba finálního produktu určeného pro trh, opět je záměrem učinit tak s nejmenší spotřebou času a nákladů. Oproti Rapid Prototypingu neslouží výrobek pouze jako prototyp, ale jako plnohodnotná, provozuschopná součást. Jelikož některé z metod Rapid Manufacturing nedosahují požadovaných rozměrových přesností a kvalit povrchu (např. aditivní technologie), bývá zde stále využíváno i konvenčních technologií pro finální dokončení výrobku. Rozdělení Rapid Manufacturingu je stejné jako je tomu u RP (viz obrázek 1). ^[1]



Obrázek 1 – Podskupiny technologie Rapid Prototyping a Manufacturing ^[a]

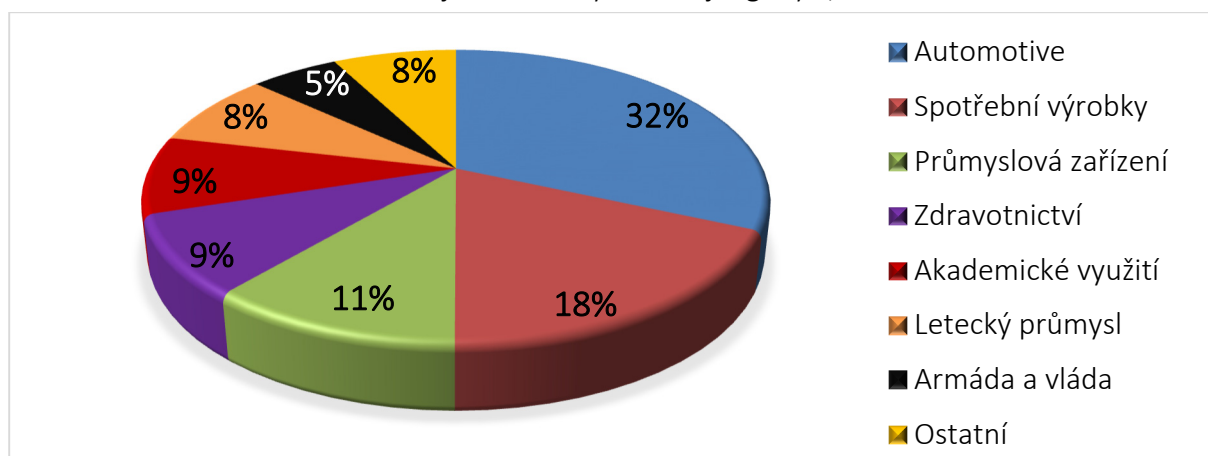
1.1 Historický vývoj

V roce 1984 si Charles W. Hull nechal patentovat technologii stereolitografie. Později roku 1986 založil společnost 3D Systems a vyvinul první 3D tiskárnu nazvanou stereolitografický aparát SLA – 1. O dva roky později společnost 3D Systems přináší veřejnosti první verzi 3D tiskárny s názvem SLA 250. Poprvé v roce 1992 byl 3D tisk využit při výrobě a testování prototypů součástek v automobilovém a leteckém průmyslu. Aditivní technologie se také začaly využívat v oblasti medicíny a v roce 1999 byly vytvořeny části orgánu potažené pacientovými vlastními buňkami. Za další tři roky byla vytištěna první miniaturní funkční ledvina, která byla úspěšně použita při transplantaci pro nemocné zvíře. Rok 2005 byl v oblasti aditivních technologií spojený s mezinárodním komunitním projektem RepRap (Replicating Rapid Prototyper) a se jménem Dr. Adrian Bowye, jež tento projekt založil. Jednalo se o 3D tiskárny vyvíjené na principu otevřeného hardwaru. RepRap byl složený převážně z mnoha plastových dílů, které šly vytisknout na jiném RepRapu. V roce 2008 vyšla první verze samoreplikační tiskárny se jménem Darwin. Ta byla schopna tisknout většinu vlastních komponentů a lidé, kteří již vlastnili tento přístroj, tak mohli vytisknout další. Tiskárna však byla objemná a bylo těžší ji sestavit. Následující rok přinesl druhou verzi RepRap tiskárny Mendel, ta byla menší, rychlejší a dala se rychleji a snadněji sestavit. Třetí verze tiskárny pod názvem Huxley přišla v roce 2010 a byla ještě menší než předchozí tiskárny. Ten samý rok společnost Stratasys spustila novou službu RedEye on Demand pro tisk nadrozměrných součástek. Společnost také představila první prototyp automobilu Urbee, jehož karoserie a externí díly byly vytištěny právě pomocí služby RedEye. V roce 2011 vědci z Cornell University oznámili začátek vývoje 3D tiskáren na výrobu jídla. Zároveň společnost Shapeways ve spolupráci s Continuum Fashion prezentovali první vytištěné bikiny. Také Univerzita Brunel ve spolupráci s Univerzitou Exeter začala vyrábět první 3D tiskárnu na čokoládu. Inženýři z Univerzity v Southamptonu sestrojili pomocí 3D tisku první bezpilotní letadlo. Výroba trvala 7 dní a díky této technologii bylo možné snížit náklady na výrobu celého letadla. Společnost i.materialise představila nabídku 3D tisku ze 14 – ti karátového zlata a stříbra. Vídeňská Technická Univerzita prezentovala nejmenší 3D tiskárnu, která vážila 1,5 kg a její cena se pohybovala kolem 1 200 EUR. V roce 2012 si nizozemští lékaři nechali vytvořit firmou LayerWise novou spodní čelist pro 83letou pacientku, kterou jí následně úspěšně implantovali. [2]

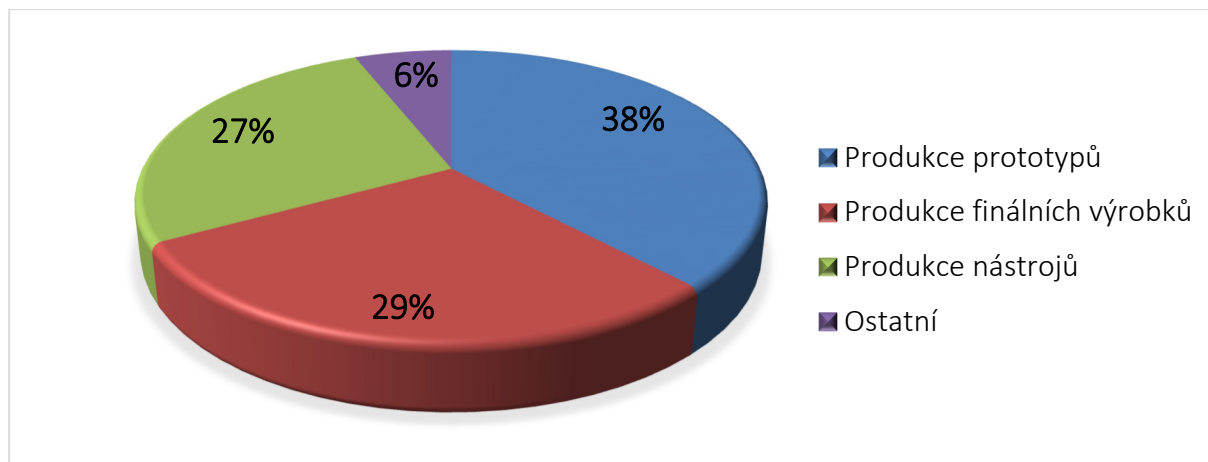
1.2 Současný stav a moderní vývojové trendy

Aditivní technologie v současnosti podléhají obrovskému rozvoji v celé řadě odvětví. Nejvíce se uplatňuje 3D tisk prototypů, nástrojů a čím dál více také finálních výrobků. Největší prodej je zaznamenán u menších přenosných tiskáren s cenou do 12 000 Kč. Těchto tiskáren je na trhu celá řada, výrobci často lákají své zákazníky na možnost tisku různých materiálů, malou tloušťku vrstvy

a tedy i lepší rozlišení výrobku. Čím dál více se začínají vyskytovat i čínské napodobeniny, které však nemají takovou životnost ani kvalitu tisku. Nárůst těchto zařízení na trhu je spojen s uplatněním nejen v domácnosti, ale také ve výrobních společnostech. Do 4 let by měl trh s „low-cost“ 3D tiskárnami dosáhnout objemu 82 miliard korun. S růstem prodeje 3D tiskáren je spojen i růst prodeje tiskového materiálu. Pro představu o použití aditivních technologií v různých průmyslových odvětvích a oborech lidské činnosti jsou uvedeny následující grafy 1, 2. ^[3]



Graf 1 – Použití aditivních technologií ^[b]

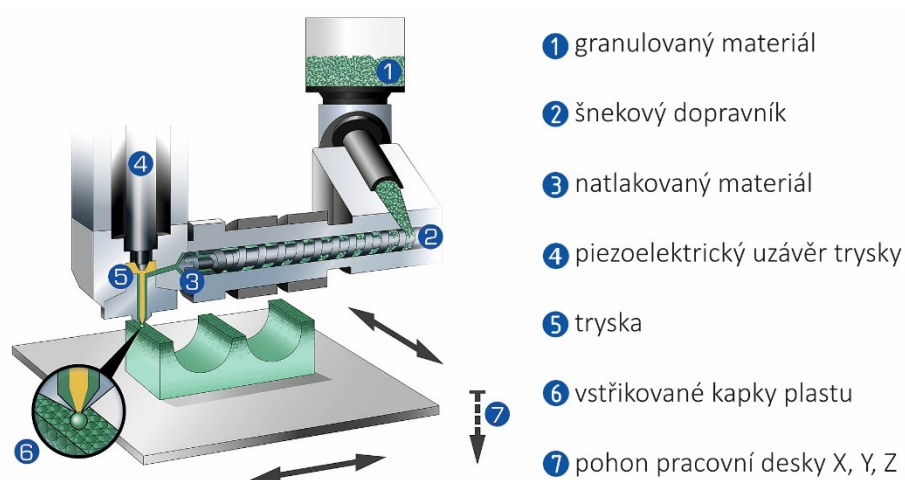


Graf 2 – Využití 3D tisku ve firmách ^[c]

Budoucí směry vývoje aditivních technologií zasáhnou nejen strojírenství, ale i oblasti stavebního a zdravotního průmyslu. Bude snaha zacílit i do oblastí výroby mikrokomponent s rozměry kolem $10\ \mu\text{m}$. Tato technologie se již nějakou dobu vyvíjí v Mnichově, Vídni nebo na univerzitách v USA a Japonsku. Výroba těchto miniaturních, převážně plastových, komponentů je založena na principu laserové stereolitografie.

Strojírenství

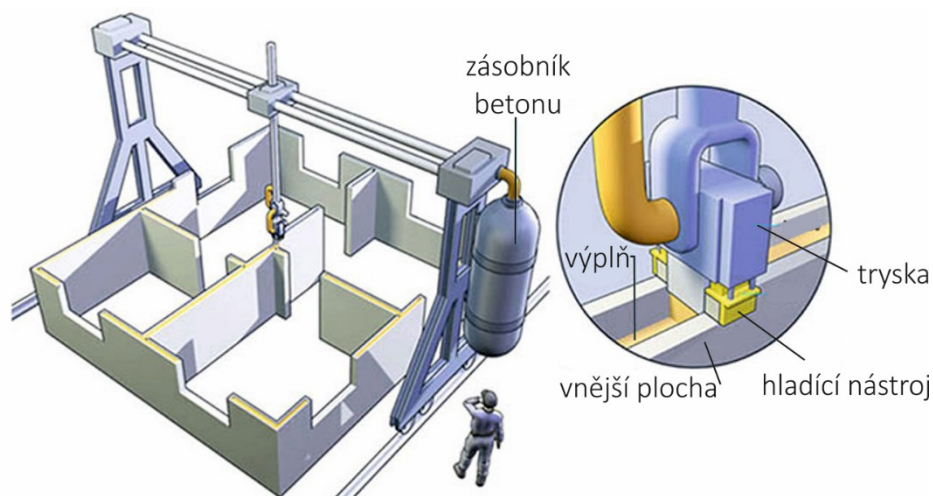
Nová technologie Freeformer od německé firmy Arburg sebou přinesla nový pohled na výrobní metodu vstřikování plastů. Tato nově patentovaná výrobní technologie je schopna zhotovit 3D objekt z virtuálního modelu bez nutnosti použití forem. Tuto výhodu si zajišťuje díky speciálním taktovaným tryskám, které dosahují frekvence otevření, zavření až 100 s^{-1} a vytváří tak pouze kapičky plastu. Můžeme vytvářet složité geometrie za použití různých druhů plastů v průběhu samotného tisku. Oproti běžnému 3D tisku plastů zde není materiál pouze nataven, ale dosáhne plně kapalné fáze a výsledný výrobek je pak homogennější s menším množstvím vad vnitřní struktury. Do budoucna je snaha o tisk z kovu a jiných materiálů tímto způsobem. ^[1]



Obrázek 2 – Schéma metody Freeformer ^[d]

Stavební průmysl

Ve stavebním průmyslu bude využívána aditivní technologie k tisku celých budov. Technologie Contour Crafting, spadající pod stejnojmennou korporaci byla vyvinuta Dr. Behrokhem Khoshnevisem na Universitě v jižní Kalifornii. Technologie bude využívat CNC portálové stroje, které budou schopny vytvořit velké a vysoké objekty. Firma se zaměřuje na stavbu budov, infrastruktury (především vysoké věže a sloupy), dále chce použít svou technologii k vesmírným aplikacím (výroba bezpečných mimozemských stanovišť, laboratoří a infrastruktury před příchodem samotných obyvatel). Metoda kombinuje proces vytlačování pro tvorbu vnějších ploch a vstřikování k vyplnění dutin. ^[1]

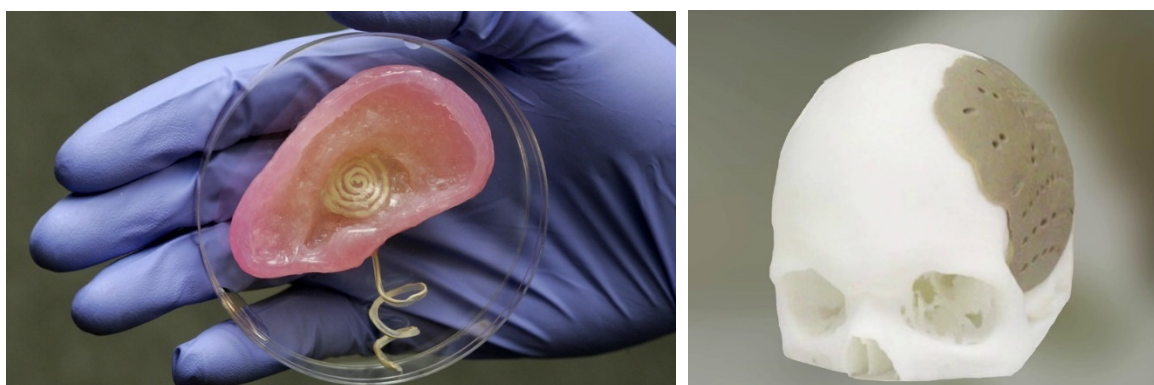
Obrázek 3 – Schéma metody Contour Crafting ^[e]Obrázek 4 – Vytisknutá zeď technologií Contour Crafting vlevo, vytisknutá budova vpravo ^[f]

Zdravotní průmysl

Velký průlom bude učiněn také ve zdravotním průmyslu. Aditivní technologie již do toho odvětví pronikly, nejčastěji se využívají pro výrobu zdravotnických pomůcek, modelů orgánů, protéz a implantátů na míru z biokompatibilních materiálů. Reverzní inženýrství a 3D tisk se rozšiřuje i do oboru stomatologie k výrobě zubních náhrad. Vědci experimentují s biotiskem, v nedávné době výzkumný tým v Madridu vyvinul tisk lidské kůže. Vědci jsou dnes schopni tisknout také tkáň s cévami, „low-cost“ protetické části, léky, tělesné sensory na míru, kosti, srdeční chlopeč, ušní chrupavku, lebeční implantáty a funkční buňky. Nizozemská firma LUXeXcel vyvinula nový způsob tisku čoček pro brýle. Do budoucna je snaha o zavedení tisku funkčních orgánů jako jsou ledviny nebo srdce. ^[4]



Obrázek 5 – Zubní náhrada vyrobená pomocí aditivní technologie vlevo, chlopeň vytištěná z kombinace kyseliny alginové, buněk hladkého svalstva a pojivové tkáně vpravo ^[6]

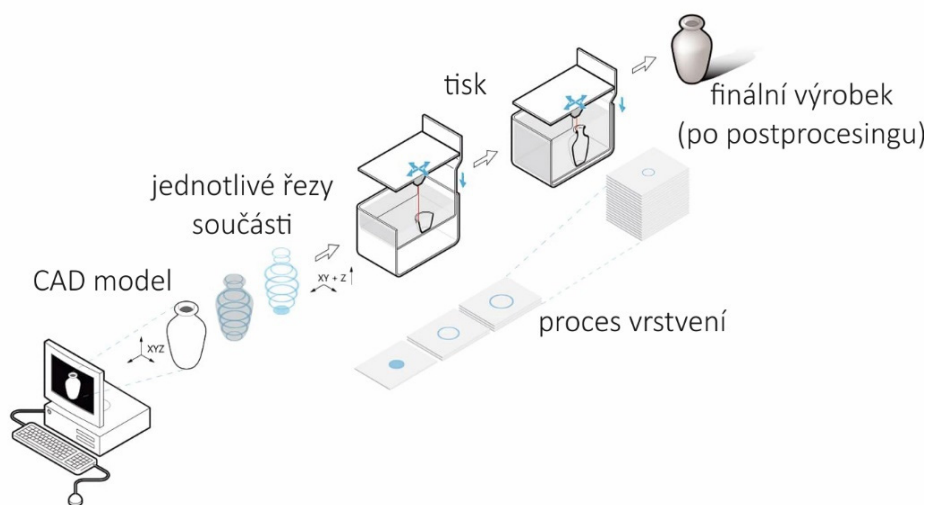


Obrázek 6 – Vytištěné kolagenní ucho s vestavěnou komponentou pro nadlidské slyšení vlevo, na míru tištěný lebeční implantát vpravo ^[6]

1.3 Postup výroby

Všechny aditivní technologie jsou založeny na principu nanášení jednotlivých vrstev materiálu stejné tloušťky až do jeho finálního tvaru. Vrstvy jsou kladeny vždy v rovině X - Y a jejich postupné nanášení v ose Z nám vytváří 3D objekt. Obvyklá tloušťka kladené vrstvy se pohybuje od $0,3\text{ mm}$ (levnější 3D tiskárny) až do $0,03\text{ mm}$ (profesionální 3D tiskárny). Speciální zařízení pro výrobu mikroskopických komponent dosahují minimální tloušťky vrstvy až $0,0016\text{ mm}$.

Proces výroby je tvořen jednotlivými specifickými kroky, pomocí nichž je z CAD modelu zhotoven finální výrobek. V první řadě je potřeba vytvořit samotný CAD model součásti, který je nutno převést do formátu STL. Model je dále rozdělen na jednotlivé řezy (vrstvy), pomocí kterých se tiskárna orientuje. Po samotném tisku je nutné provést na výrobku dokončovací úpravy. ^[4, 5]

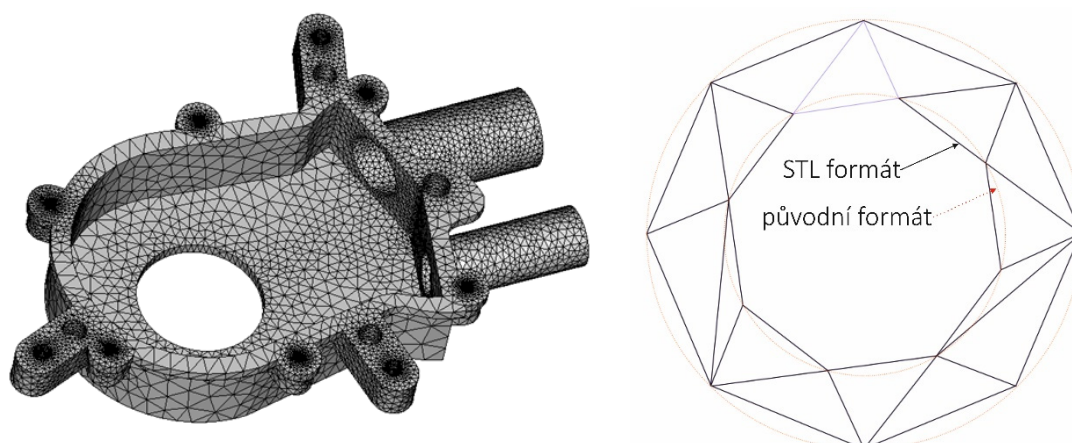
Obrázek 7 – Schéma procesu výroby aditivních technologií ^[4]

CAD model

Prvním a zásadním krokem je tvorba virtuálního 3D modelu. Virtuální model musí být navrhnout tak, aby byl vyrobitelný danou metodou aditivní technologie. Zásadní je tloušťka stěn a velikost otvorů. Virtuální model můžeme vytvořit pomocí CAD softwaru, 3D skeneru nebo souřadnicového měřicího stroje. Závisí to především na tom, jestli vytváříme nový objekt nebo podle fyzické předlohy (reverzní inženýrství). Na samotném CAD modelu lze ještě před samotným tiskem provést pevnostní výpočty a FEM analýzu. ^[1, 5]

Formát modelu

3D tiskárny vyžadují speciální formát virtuálního modelu, pokud v tomto formátu model nevytváříme, je nutné ho do něj převést. Standardně používaným formátem pro aditivní technologie je STL (Standard Triangulation Language), původně vynalezen pro technologii stereolitografie. Povrch CAD modelu převedeného do tohoto formátu je reprezentován souborem trojúhelníkových elementů různých velikostí v závislosti na požadovaném rozlišení. Menší trojúhelníky zajistí vyšší rozlišení (hladší povrch modelu), ale zvýší dobu výpočtu. Při volbě nižšího rozlišení se může stát, že nedojde k vygenerování některých menších částí virtuálního modelu a ty pak nejsou vytisknuty. STL data jsou dána normálovými vektory a souřadnicemi tří vrcholů každého elementu. STL soubor lze uložit jako binární nebo textový (ASCII) kód, binární je kratší a tak i daleko menší, naopak ASCII je snadněji zpětně upravitelný.



Obrázek 8 – CAD model převedený do formátu STL vlevo [i], způsob převodu do STL vpravo [ii]

Převod do formátu STL je nejprostším a nejkratším úsekem v postupu výroby aditivními technologiemi. Avšak u velmi složitých modelů s požadavkem velkého rozlišení a zároveň nedostatečným výkonem počítačového hardwaru se tato činnost může prodloužit až na hodiny. Nevýhodou je, že formát STL je schopen nést pouze informace týkající se geometrie modelu a při převodu mohou nastat některé chyby typu – mezery mezi trojúhelníky, opačné normálové plochy, průnik nebo zdvojení hran mezi trojúhelníky. [1, 5]

Zhotovení řezů

Před samotným tiskem součásti je nutné model převedený do formátu STL rozdělit na jednotlivé řezy (vrstvy), ze kterých bude tiskárna součást skládat. Tento proces většinou provádí software samotné tiskárny nebo případně software určený pro počítač. Počet řezů je závislý nejen na výšce tisknuté součásti, ale také na tloušťce jedné vrstvy, a tedy i na použité aditivní technologii. [1]

Tisk

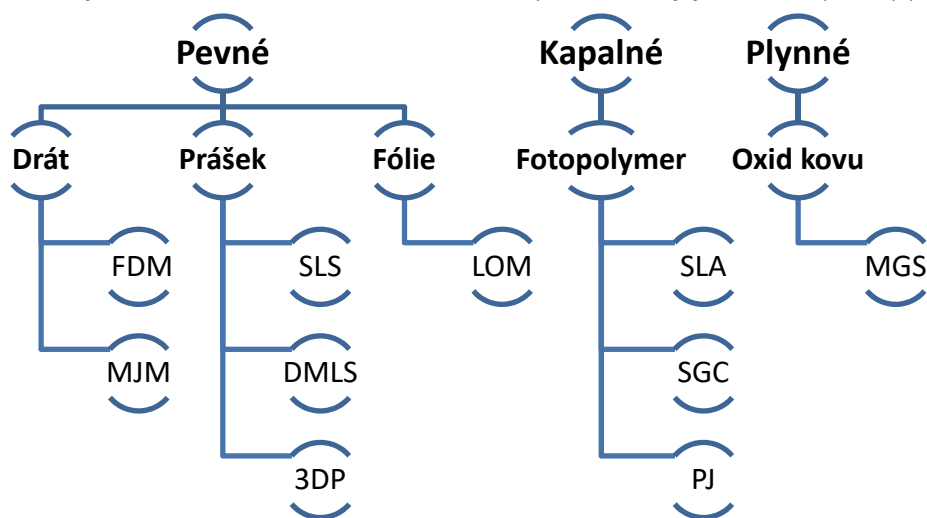
Proces tisknutí probíhá ve stroji (3D tiskárně) a většinou bývá plně automatizován. Stavba objektu probíhá skládáním jednotlivých vrstev a liší se fyzikálním principem dle použité aditivní technologie. Celý proces tisku trvá v řádu hodin a je nejvíce závislý na velikosti a počtu součástek. Tiskový prostor stroje nám udává omezení velikosti a počtu součástek. [5]

Postprocessing

Posledním krokem po vyjmutí zhotovené součásti z 3D tiskárny je postprocessing. V závislosti na použité aditivní technologii, je nutné provést na výrobku některé dokončovací operace. Mezi ně se řadí očištění, odstranění přebytečného materiálu a podpor. Tepelné a UV zpracování, dodatečné povrchové úpravy, povlaky a nátěry. [3]

2 DĚLENÍ ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ

Aditivní technologie lze rozdělit podle různých parametrů mezi něž patří druh tisknutého materiálu (plast, kov, keramika a jiné) nebo fyzikální princip zhutňování materiálu (topná tělesa, laser, UV záření a další). Nejčastěji se však tyto technologie rozdělují do 3 skupin podle skupenství vstupního materiálu. Na obrázku 9 je znázorněno rozdělení a nejvyužívanější metody, které budu dále popisovat. Metod je v dnešní době velká řada a mnohdy i kombinují jednotlivé principy.



Obrázek 9 – Dělení aditivních technologií ^[a]

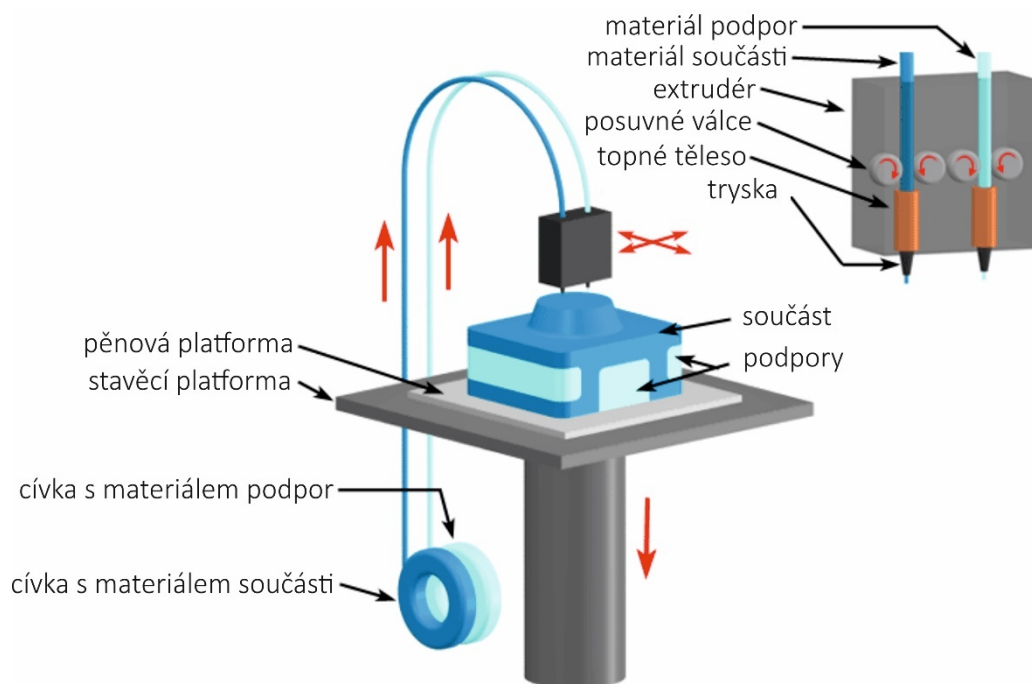
2.1 Metody využívající materiál v pevném skupenství

Do této skupiny se řadí veškeré aditivní technologie, jejichž použitý vstupní materiál je v pevném skupenství. Patří sem vstupní materiál ve formě prášku, drátu navinutého na cívce, speciální fólie nebo granulátu.

2.1.1 FDM – Fused Deposition Modeling

FDM je jednou z nejrozšířenějších metod, která stála u zrodu samotného 3D tisku. Princip této technologie spočívá v natavování drátu z termoplastu, který je obvykle navinut na cívce. Drát je odvíjen z cívky skrze tzv. extrudér, jež ho zahřívá na teplotu těsně pod bod tání termoplastu a vytlačuje na stavěcí platformu. Zhotovení jednotlivých vrstev probíhá v rovině X, Y a po dokončení je stavěcí platforma či hlava extrudéru posunuta o vzdálenost tloušťky jedné vrstvy v ose Z . Tímto způsobem je zhotoven finální výrobek vrstvu po vrstvě. Nejčastěji využívaným materiálem bývá ABS (Akrylonitril-Butadien-Styren), dále jsou to materiály PLA (Poly-Lactid-Acid), PC (Poly-Carbonate),

vosk či elastomerní materiály. Technologie FDM je patentována firmou Stratasys. Schéma metody je zobrazeno na obrázku 10. [6]



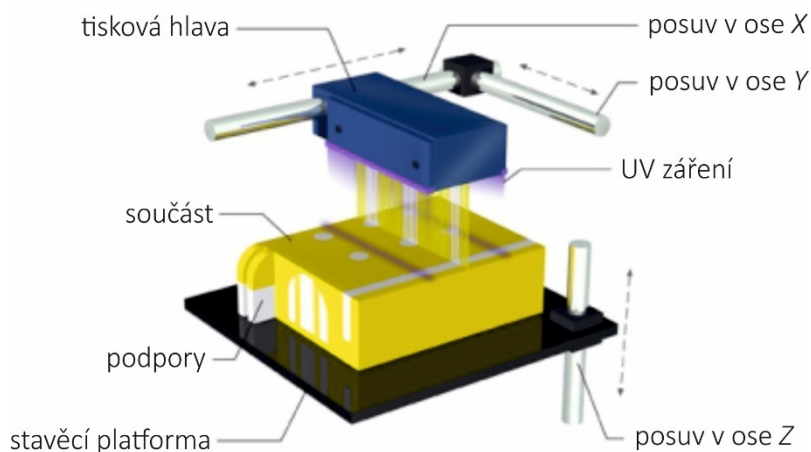
Obrázek 10 – Schéma metody FDM [6]

Výhodami této metody jsou – výroba funkčních modelů, minimální odpad, jednoduché odstranění podpor, možnost tisku relativně velkých součástí, jednoduchá výměna vstupního materiálu.

Nevýhodami jsou – nízká přesnost tisku, pomalý tiskový proces, obtížně předvídatelné smrštění, riziko deformace modelu a výsledná kvalita povrchu.

2.1.2 MJM – Multi Jet Modeling

Metoda MJM je založena na sestavování jednotlivých vrstev UV citlivního fotopolymeru. Ty jsou nanášeny speciální tiskovou hlavou se stovkami uspořádaných miniaturních trysek. Tisková hlava se pohybuje v osách X , Y a při dokončení jednotlivých vrstev je materiál vytvrzen UV zářením, následně se stavěcí platforma nebo samotná tisková hlava oddálí v ose Z a započne nanášení další vrstvy. Množství nanášeného materiálu je řízeno pro každou trysku samostatně. Díky množství trysek je výsledný výrobek vytisknut velmi rychle s jemnou strukturou. Pro vytváření podpor je zde využito speciálního vosku. V postprocessingu je hlavním úkolem tento vosk odstranit. To se nejčastěji provádí zahřátím modelu na teplotu tání vosku. Vosk poté z modelu jednoduše odkape. Schéma metody je zobrazeno na obrázku 11. [6]



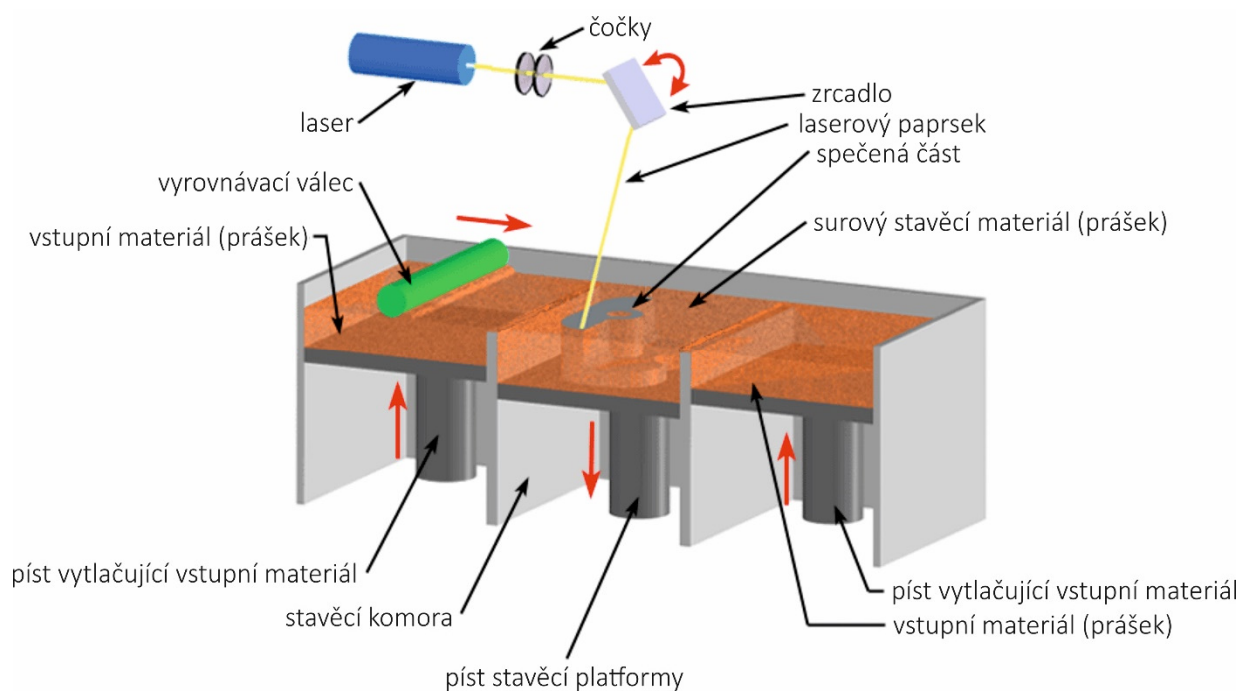
Obrázek 11 – Schéma metody MJM [1]

Výhodami této metody jsou – rychlý proces tisku součásti, vysoká přesnost tisku, nízká cena používaných vstupních materiálů.

Nevýhodami jsou – vyšší pořizovací cena zařízení, menší velikost tisknutelných součástí a menší výběr materiálů.

2.1.3 SLS – Selective Laser Sintering

V praxi se můžeme setkat s termínem sintrování, neboli spékání. Tato metoda využívá vysoko energetický zdroj světla, nejčastěji CO₂ laser, kterým spéká vstupní prášek dohromady. Prášek může být keramický, kovový nebo na bázi různých druhů plastů. Zrnitost prášku se pohybuje mezi 20 a 100 μm. Prášek je umístěn na stavební platformě a pomocí laseru je zahříván na teplotu těsně pod bod tání, čímž dojde k jeho natavení a spečení s předchozí vrstvou. Ke spékání dochází pouze ve stanovených oblastech (určitý řez součásti), po dokončení vrstvy je celý pracovní stůl posunut dolů v ose Z a je nanášena nová vrstva prášku. Nejčastějším způsobem nanášení vrstev je prováděno válečkovým mechanismem. Tímto procesem je pak zhotovena součást vrstvu po vrstvě. Nespečený prášek je po dokončení spékání odfiltrován ze stavěcí platformy a část z něj může být znovu použita. Po zhotovení součásti metodou SLS se často využívají dokončovací operace typu frézování, leštění, broušení či tryskání. Metoda je široce využívána především v oblastech výroby nástrojů a forem. Schéma metody je zobrazeno na obrázku 12. [6]

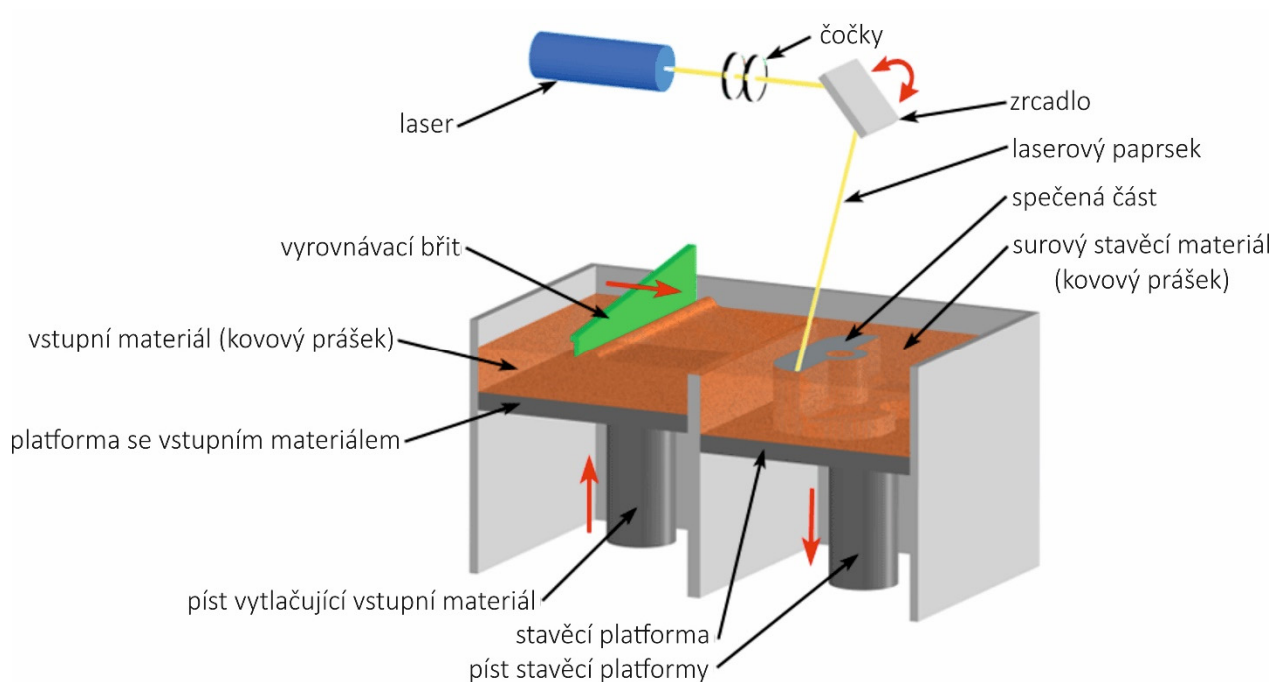
Obrázek 12 – Schéma metody SLS ^[K]

Výhodami této metody jsou – stabilita a celistvost součástí, široký výběr vstupního materiálu (kov, plast, keramika), není nutné dodatečné vytvrzování a používání podpor, tisk plně funkčních součástí a částečná recyklace nespečeného materiálu.

Nevýhodami jsou – velikost zařízení, velká spotřeba energie, horší kvalita povrchu, náklady na zařízení, nutnost dokončovacích operací a značná pórovitost.

2.1.4 DMLS – Direct Metal Laser Sintering

Metoda DMLS je založena na stejném principu jako předchozí metoda SLS. Byla vyvinuta v roce 1994 a stala se první komerční metodou 3D tisku kovových dílů. Na rozdíl od metody SLS jsou zde nanášeny velmi tenké vrstvy okolo $20 \mu\text{m}$, které jsou přesně dávkovány, což nám zajišťuje vyšší rozlišení detailů a možnost tisku složitějších součástí. Dávka prášku je rozprostírána na pracovní stůl pomocí keramického bříty. Součást je vyráběna ve vzduchotěsné pracovní komoře vyplněné dusíkem, pro zamezení oxidaci dílů. Nejčastěji využívanými druhy materiálů jsou nerezové oceli, maraging oceli, Inconel®, Al slitiny, Ti slitiny a Co-Cr slitiny. DMLS se dnes využívá ve strojírenství, komerčním i armádním letectví a v oblasti medicíny zabývající se výrobou implantátů. V roce 2014 společnost SpaceX oznámila úspěšnou výrobu provozuschopného raketového motoru SuperDraco plně vytisknutého na DMLS tiskárně EOS 3D z materiálu Inconel®. Schéma metody je zobrazeno na obrázku 13. ^[7]



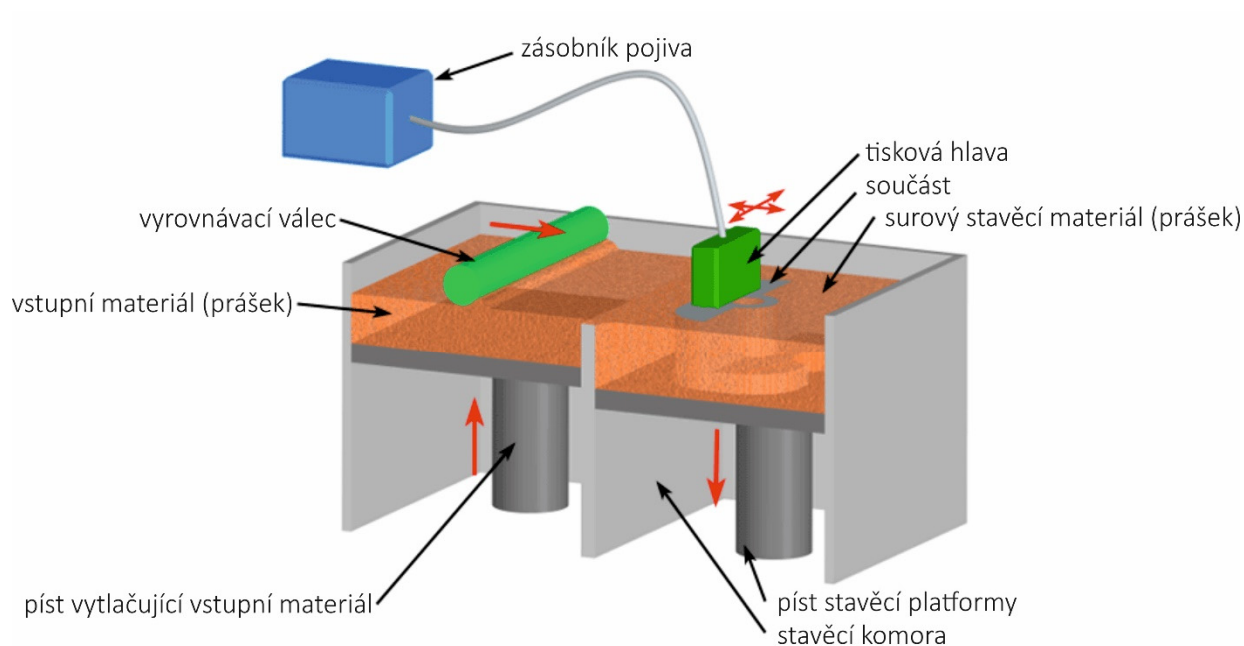
Obrázek 13 – Schéma metody DMLS [k]

Výhodami oproti metodě SLS jsou – vyšší rozlišení a přesnost tisknutých součástí, aktivní prostředí příznivé pro kovy, větší výběr tisknutelných kovů (ocel, titan, slitiny a další).

Nevýhodou oproti SLS je práce s vzduchotěsnou pracovní komorou se zmiňovaným aktivním prostředím.

2.1.5 3DP – 3D Inkjet Printing

Metoda 3D Inkjet Printing se nejvíce podobá klasickému 2D inkoustovému tisku s tím rozdílem, že je zde možnost pohybu stavěcí platformy svisle v ose Z. Tisková hlava se pohybuje klasicky v osách X, Y a zajišťuje nanášení speciálního tekutého pojiva. To je vrstvu po vrstvě nanášené na práškový vstupní materiál, který je umístěn na pohyblivé stavěcí platformě. Oproti ostatním metodám je tedy výsledný výrobek lepen a má podstatně nižší pevnost. Výhodou je možnost vytváření vícebarevné součásti, dle volby barvy pojiva. Dále je možno tisknout funkční modely, tedy i vůči sobě se pohybujících. Rychlost tisku je oproti metodám slinování značně vyšší. Vytisknuté výrobky bývají většinou opatřeny vrstvou epoxidové pryskyřice nebo voskem pro částečné snížení křehkosti. Touto metodou se dají tisknout výrobky z různých druhů plastů, sádry, celulózy a dokonce i kovu. Pro kov musí být použito speciální plastové pojivo, dále je nutné tepelné zpracování výrobku. Schéma metody je zobrazeno na obrázku 14. [8]

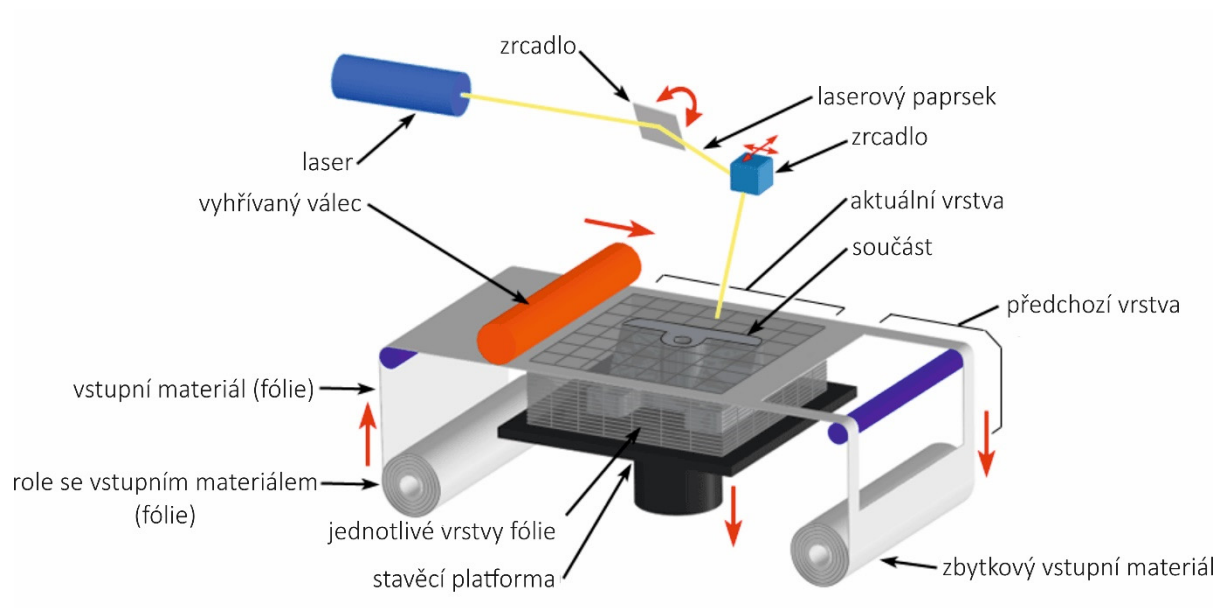
Obrázek 14 – Schéma metody 3DP ^[K]

Výhodami této metody jsou – vysoká rychlost tisku bez nutnosti stavění podpor, široké využití modelů, jednoduché použití, minimální odpad a možnost tisku barevných modelů.

Nevýhodami jsou – špatná kvalita povrchu, nízká pevnost a přesnost modelu, nutnost opatření speciálním povlakem pro částečné zvýšení pevnosti.

2.1.6 LOM – Laminated Object Manufacturing

Součásti zhotovované metodou LOM se skládají z jednotlivých tenkých lepidelných vrstev. Princip je založen na vrstvení lepidelného materiálu (plastové fólie či papíru napuštěného zpevňující hmotou) do vzniku finální součásti. Jednotlivé vrstvy jsou řezány na specifický tvar pomocí CO_2 laseru. Součást je vrstvena na stavební platformu, která se pohybuje svisle v ose Z. Již nanesená vrstva se opět potáhne papírovou fólií opatřenou vrstvou polyethylenu a je následně přitlačena soustavou nahřátých válců, tím dojde ke slepení. Zbytková odřezaná fólie je laserem rozdělena na čtverce a následně odstraněna, čímž vzniká značný odpad. Materiál těchto výrobků má podobné vlastnosti jako dřevo a může tak být dále obráběn. Výrobek by měl být opatřen silikonovým, epoxidovým nebo uretanovým nástřikem, aby nedocházelo ke změnám rozměrů vlivem navlhání. Schéma metody je zobrazeno na obrázku 15. ^[9]

Obrázek 15 – Schéma metody LOM ^[k]

Výhodami této metody jsou – vysoká rychlost stavění bez nutnosti podpor, vysoká přesnost, hotové modely nejsou deformované.

Nevýhodami jsou – nutnost precizního vyladění laserového paprsku, nízká celistvost modelů, nevhodnost pro vytváření tenkých stěn, nutnost opatření speciálním nástřikem pro zamezení navlhání, značný odpad ze zbytkového vstupního materiálu.

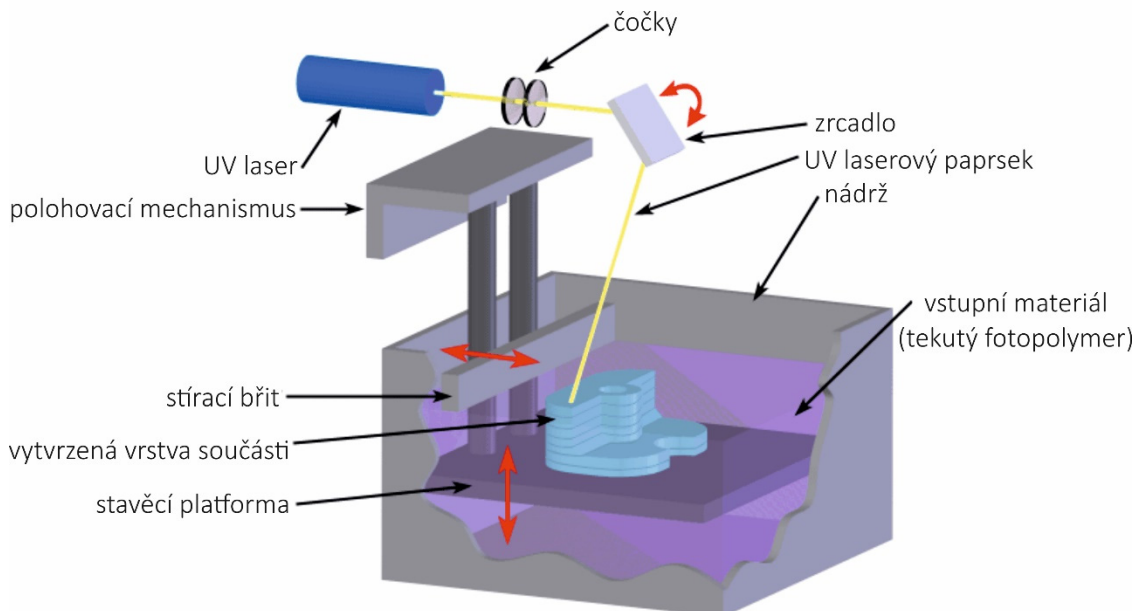
2.2 Metody využívající materiál v kapalném skupenství

Do této skupiny se řadí veškeré aditivní technologie, jejichž použitý vstupní materiál je v kapalném skupenství. 3D objekt vzniká vytvrzováním této kapaliny. Kapalina je buď přiváděna tryskami ze zásobníku nebo je přímo ve stavební komoře v utěsněné nádrži.

2.2.1 SLA – Stereolithography

Metoda stereolitografie je vůbec nejstarší aditivní technologií. Již v roce 1984 zažádal dnešní výkonný viceprezident společnosti 3D Systems Charles W. Hull o udělení patentu. Tuto metodu lze považovat za průkopníka moderního Rapid Prototypingu. Hlavním principem je zhotovení součásti postupným vytvrzováním jednotlivých vrstev fotopolymerní látky. Stavěcí platforma, na které se postupně vrstvu po vrstvě zhotovuje součást, je ponořena ve fotopolymerní kapalině a pohybuje se svisle v ose Z. Polohování pracovního stolu v ose Z bývá kolem $0,1 - 0,05 \text{ mm}$, což je i dosažitelná tloušťka jedné vrstvy. UV laserová hlava se pohybuje v osách X, Y, kopíruje naprogramovanou dráhu a ozařuje kapalinu na místech, kde má vzniknout vytvrzená vrstva polymeru. Vzniklou součást je nutno zbavit

podpěr a dále stabilizovat v UV peci. Součásti jsou zhotovovány s vysokou přesností a kvalitou povrchu. Na rozdíl od ostatních metod je zde možnost zhotovení velmi malých otvorů a prvků. Schéma metody je zobrazeno na obrázku 16. [6]



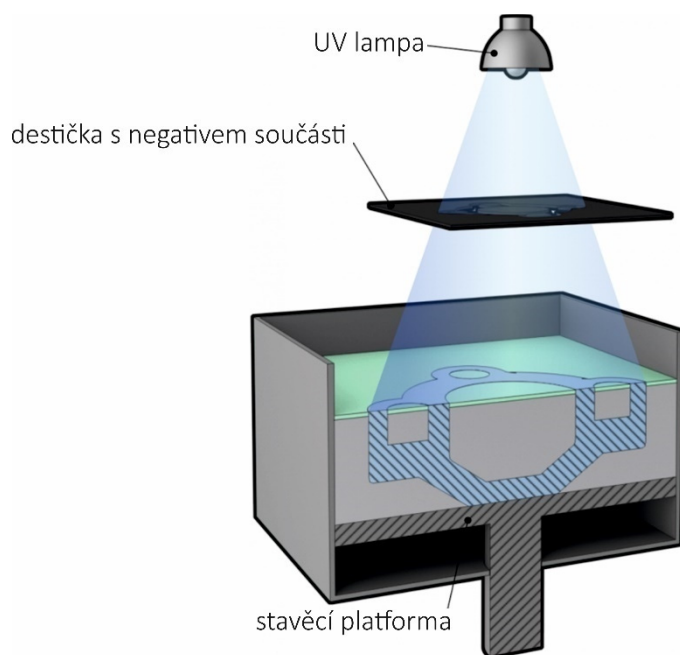
Obrázek 16 – Schéma metody SLA [6]

Výhodami této metody jsou – možnost tisku velmi malých prvků a otvorů, tisk objemnějších modelů, vysoká přesnost a kvalita povrchu.

Nevýhodami této technologie jsou – vyšší doba tisku, citlivost materiálu na teplo a vlhkost, nutnost následného vytvrzení, celistvost podpor s hlavní strukturou, toxicita fotopolyméru.

2.2.2 SGC – Solid Ground Curing

Tato metoda také využívá princip vytvrzování tekutého fotopolyméru. Zásadní rozdíl oproti metodě SLA je ten, že jsou zde jednotlivé vrstvy vytvářeny najednou. Před samotným tiskem musí být vytvořen negativ součásti, nejčastěji na skleněnou destičku. Namísto UV laseru je použito UV lampy, která skrz tuto negativní masku ozařuje fotopolymer a dochází k jeho okamžitému vytvrzení. Navíc je zde vytvořený povrch ofrézován na požadovanou tloušťku vrstvy a nachystán na zhotovení další vrstvy. Pro podpory a výplň meziprostorů se používá vosk, který je na konci procesu chemicky odstraněn. Schéma metody je zobrazeno na obrázku 17. [6]

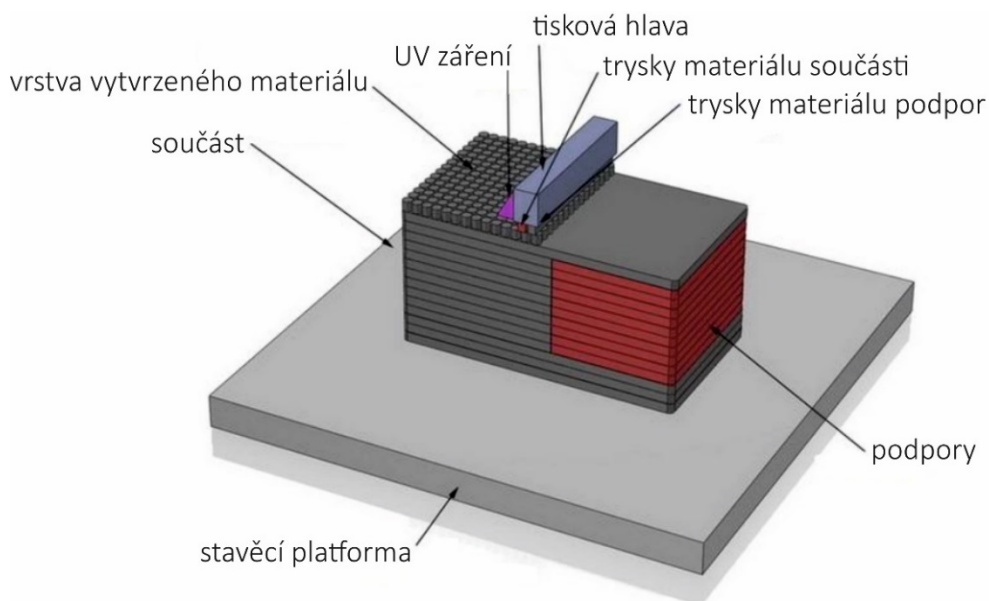
Obrázek 17 – Schéma metody SGC ^[m]

Výhodami oproti metodě SLA jsou – rychlost stavby jednotlivých vrstev, podpory jsou z vosku a lze je tak jednoduše odstranit.

Nevýhodami jsou – nutnost zhotovení negativů, použití pro méně tvarově náročné součásti.

2.2.3 PJ – Poly Jet

Metoda PolyJet byla vyvinuta firmou Objet a patentována počátkem roku 2000. Technologie funguje na principu tryskání fotopolymerních materiálů, které jsou vytvrzovány UV zářením. Touto metodou je možné tisknout vrstvy o tloušťce pod $0,1\text{ mm}$. Může vyrábět velmi tenké stěny různých složitých tvarů pomocí nejširší škály dostupných materiálů. PolyJet funguje na podobném principu jako Multi Jet Modeling s několika rozdíly. Prvním rozdílem je samotný vstupní materiál, který je v tomto případě kapalný fotopolymer. Dalším rozdílem je materiál podpor, jelikož zde jsou převisy nebo složité tvary vyžadují stavbu podpor zhotovovaných ze speciálního gelu. Separace podpor poté probíhá při otryskání vodou nebo ve speciálním roztoku. Při tryskání vodou však může hrozit poškození tenčích a slabších částí modelu. Jedná se o vůbec první vyvinutou aditivní technologii, která umožňuje současný tisk více druhů materiálů. Schéma metody je zobrazeno na obrázku 18. ^[10]

Obrázek 18 – Schéma metody PJ ^[K]

Výhodami této metody jsou – přesnost modelů (tloušťka vrstvy až $16\ \mu\text{m}$), rychlost tisku, velmi hladký a kvalitní povrch, tisk kompozitních materiálů, bezpečný a čistý provoz.

Nevýhodou je – vysoká pořizovací cena stroje, odstranění podpor vodní tryskou, kdy hrozí poškození velmi malých modelů s tenkými stěnami.

2.3 Metody využívající materiál v plynném skupenství

Metody na bázi plynného vstupního materiálu jsou zatím pouze uvažovány do budoucna. V současnosti mají jednoho hlavního představitele, který se vývojem této metody zabývá.

2.3.1 MGS – Metal from the Gaseous State

Společnost Concurrent Technologies Corporation (CTC) nově získala patent k procesu využití kovů v plynném stavu pro aditivní výrobu. Tato nová metoda umožní podle společnosti výrobu tenkostěnných kovových dílů. Princip výroby je založen na již známém postupu extrakce kovů z rud nazývaném Mondův proces, který vynalezl roku 1890 Ludwig Mond. Využívá oxid uhelnatý pro přeměnu oxidů niklu na čistý nikl. U technologie MGS je Mondův koncept modifikován k využití plynu oxidu uhelnatého společně s 18 rozdílnými kovy. Při reakci plynu a kovu za vysokých teplot se zformuje složený plyn, který umožňuje, aby byl kov deponován na substrát s vysokou teplotou, čímž se v reálu vytvoří tenký plášť tištěného dílu. Reakce uvolňuje oxid uhelnatý pro opětovné použití při reakci s dalšími kovovými atomy a pokračující aditivní proces. Pro tento inovativní proces však nebyly doposud vydány žádné podrobné specifikace, technologie je v raném stádiu vývoje. Patent je zaregistrován pod číslem US 9587309 B1. ^[11]

3 POŽADAVKY NA SOUČÁSTI ZHOTOVENÉ ADITIVNÍMI TECHNOLOGIEMI A VHODNÉ ZKUŠEBNÍ POSTUPY

Požadavky kladené na zakoupené součásti zhotovené aditivními technologiemi jsou popsány v normě ISO/ASTM 52901:2017. Definice součásti, která má být vyrobena musí obsahovat následující prvky:

- geometrie součásti – výkres součásti včetně plně definovaných rozměrů nebo virtuální model v požadovaném formátu,
- tolerance – tolerování dle ISO 1101, zahrnující funkční definice (přidavky na obrábění, dokončovací operace),
- textura povrchu – specifikování dle standardu ISO 1302/ISO 25178-1, kvalita povrchu může být předepsána maximální hodnotou drsnosti/vlnitosti pro celou součást nebo pro více určitých povrchů,
- orientace součásti – orientace stavby se řídí normou ISO/ASTM 52921, pokud nevyžaduje zákazník specifickou orientaci stavby součásti pro dosažení určitých vlastností, je zvolena výrobcem,
- vstupní materiál – typ a chemické složení vstupního materiálu by mělo být specifikováno již existující normou,
- zmetky – přípustnost vad, prasklin, nespojitostí, cizích vměstků, nedokonalostí, odbarvení a porozity musí být dohodnuta s výrobcem. ^[12]

3.1 Charakteristiky součástí

Charakteristiky součástí vyráběných aditivními technologiemi zahrnují ty, které obsahuje norma ISO 17296-3. Součást musí splňovat určité vlastnosti dle příslušných norem nebo mohou být stanoveny mezi výrobcem a zákazníkem. Z hlediska zákazníka jsou nejpodstatnějšími charakteristikami právě ty, které se týkají přesností rozměrů, vad spojených s aditivními technologiemi, požadovaných mechanických vlastností, zbytkového napětí a chemického složení. Jelikož jsou standardy pro aditivní technologie stále ve vývoji, některé ze specifických charakteristik nemusí být v současných normách popsány, v takovém případě je to na dohodě mezi výrobcem a zákazníkem. Tabulky 1, 2 obsahují seznam základní charakteristik, které jsou požadovány na vstupní materiál a finální výrobek. Seznam obsahuje doporučené mezinárodní normy, dle kterých by se jednotlivé charakteristiky měly stanovovat. K jednotlivým charakteristikám musí být uvedena orientace zkoušky a orientace zhotovování součásti. Orientace pro zkoušení je přesněji popsána v normě ISO ASTM 52915. ^[13] Detailnější popis zkušebních těles zhotovených aditivními technologiemi bude stanoven v normě ISO/ASTM 52902, která je zatím ve vývoji.

Tabulka 1 – Základní charakteristiky pro výrobky vyráběné aditivními technologiemi [9]

Charakteristiky		Kovy	Plasty	Keramika		
Vstupní materiál						
Požadavky na vstupní materiál	Velikost práškové částice	ISO 4497 ISO 8130-1 ISO 13319 ISO 13320	ISO 4610 ISO 13319 ISO 13320	ISO 13319 ISO 13320 ISO 24235 ISO 14703		
	Morfologie	ISO 9276-6	ISO 9276-6	ISO 9276-6		
	Povrch	ISO 9277	ISO 9277	ISO 18757 ISO 9277		
	Hustota	ISO 3923-2	ISO 1068	ISO 18753 ISO 23145-1 ISO 23145-2		
	Viskozita	ISO 4490	ISO 6186 ISO 4324	ISO 14629		
	Obsah popela	nepodstatné	ISO 3451-1	nepodstatné		
	Obsah uhlíku	ISO 7625	bez normy	nepodstatné		
Zhotovená součást						
Požadavky na povrch	Vzhled	ISO 16348				
	Textura povrchu	ISO 1302 ISO 4288				
	Barva	ISO 11664-1 ISO 11664-2 ISO 11664-4 ISO 11664-5	ISO 11664-1 ISO 11664-2 ISO 11664-4 ISO 11664-5	ISO 11664-1 ISO 11664-2 ISO 11664-4 ISO 11664-5		
Geometrické požadavky	Rozměry a jejich tolerance	ISO 129-1 ISO 286-1 ISO 14405-1 ISO 1938-1 ISO 2768-1	ISO 129-1 ISO 286-1 ISO 14405-1 ISO 1938-1 ISO 2768-1	ISO 129-1 ISO 286-1 ISO 14405-1 ISO 1938-1 ISO 2768-1		
		Geometrické tolerance	ISO 1101 ISO 2768-2	ISO 1101 ISO 2768-2	ISO 1101 ISO 2768-2	
		Mechanické požadavky	Tvrдость	ISO 6507	ISO 2039 ISO 868	ISO 14705

Tabulka 2 – Základní charakteristiky pro výrobky vyráběné aditivními technologiemi pokračování ^[6]

Charakteristiky		Kovy	Plasty	Keramika
Zhotovená součást				
Mechanické požadavky	Pevnost v tahu	ISO 6892-1	ISO 527-1 ISO 527-2 ISO 527-3 ISO 527-4 ISO 527-5	ISO 15490
	Pevnost v tlaku	ISO 4506	ISO 604	ISO 17162
	Vrubová houževnatost	ISO 148-1 ISO 148-2	ISO 179-1 ISO 179-2 ISO 180	ISO 11491
	Pevnost v ohybu	ISO 3327	ISO 178	ISO 14704 ISO 14610
	Únavová pevnost	ISO 1099 ISO 1143	ISO 13003 ISO 15850	ISO 22214 ISO 14610
	Tečení	ISO 204	ISO 899-1 ISO 899-2	ISO 22215
	Stárnutí	nepodstatné	ISO 4892-1 ISO 4892-2 ISO 4892-3 ISO 4892-4	nepodstatné
	Součinitel tření	bez normy	ISO 6601	ISO 20808
	Střížná pevnost	ISO 148-1	ISO 148-1	ISO 14129
	Šíření trhliny	ISO 22889	ISO 15850	ISO 15732 ISO 18756 ISO 24370 ISO 23146
Požadavky na vytisknutý materiál	Hustota	ISO 3369	ISO 1068	ISO 18754
Nedestruktivní zkoušky	Radiografická kontrola	ISO 5579	nepodstatné	nepodstatné
	Penetrační zkouška	ISO 3452-1 ISO 3452-2	ISO 3452-1 ISO 3452-2	ISO 3452-1 ISO 3452-2
	Tomografie	IEC 61675-1 IEC 61675-2	IEC 61675-1 IEC 61675-2	IEC 61675-1 IEC 61675-2
	Magnetická zkouška	ISO 9934-1	ISO 9934-1	ISO 9934-1

3.2 Výběrová kritéria

Kvalita součásti je určena její vhodností pro konkrétní aplikaci a tím i svou schopností vyhovět specifickým požadavkům. Součásti musí splňovat řadu požadavků, které jsou přesně definovány ve fázi návrhu a objednávky.

Existují tři zkušební kategorie používané pro kovové, plastové a keramické součásti. Tyto kategorie určují stupeň kritičnosti (nutné bezpečnosti) součásti vyrobené aditivní technologií. Každá kategorie určuje charakteristiky, které by měly být zjišťovány nebo jsou alespoň doporučené. V závěru opět záleží na dohodě mezi výrobcem a zákazníkem, které vlastnosti budou požadovány. Zkušební kategorie se dělí na:

- H – kategorie funkčních součástí, které představují bezpečnostní riziko,
- M – kategorie funkčních součástí bez bezpečnostního rizika,
- L – kategorie designových součástí a prototypů. ^[13]

Tabulka 3 – Zkušební kategorie ^[9]

Materiál		Kovy			Plasty			Keramika		
		H	M	L	H	M	L	H	M	L
Zkušební kategorie										
Požadavky na povrch	vzhled	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	textura	●	○	○	●	○	○	●	○	○
	barva				○	○	○	○	○	○
Geometrické požadavky	rozměry a jejich tolerance	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	geometrické tolerance	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Mechanické požadavky	tvrdost	●	●	●	●	●	●	●	○	○
	pevnost v tahu	●	●	●	●	●	●	●	○	○
	pevnost v tlaku	●	●	○	●	●	○	●	○	○
	rázová houževnatost	●	●	○	●	●	○	●	○	○
	pevnost v ohybu	●	○	○	●	○	○	●	○	○
	únavová pevnost	●	○		●	○				
	tečení	●	○		●	○				
	stárnutí				●	○				
	součinitel tření	●	○		●	○		○	○	
	střížná pevnost	●	○	○	●	○	○	○	○	○
	šíření trhliny	●	○		●	○		○	○	
Požadavky na vstupní materiál	hustota	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	fyzikálně-chemické vlastnosti	●	○		●	○			○	
Povinné charakteristiky jsou označeny značkou ●, doporučené charakteristiky jsou označeny značkou ○ a nepovinné nebo nepodstatné charakteristiky jsou bez značení.										

3.3 Zkušební postupy pro výrobky vyráběné aditivními technologiemi

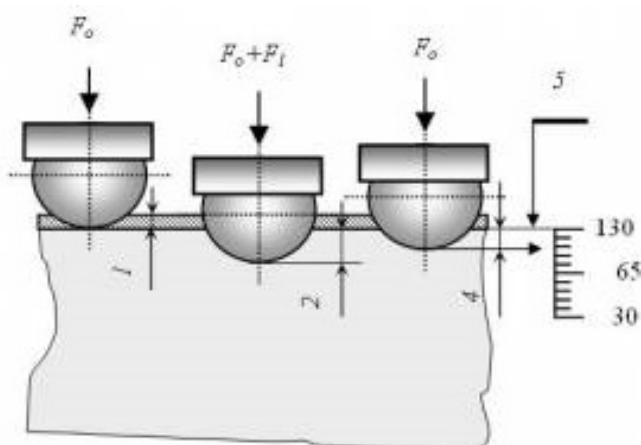
Výběr typu materiálu pro zhotovení daného výrobku závisí především na znalostech materiálů, zejména vlastností mechanických, technologických, termomechanických a fyzikálně-chemických. Při volbě materiálů se uvažují v první řadě ty parametry, které jsou z hlediska funkčnosti a životnosti nejdůležitější. Závisí především na provozním charakteru součásti a prostředí, kterému budou po dobu své funkce vystaveny. Parametry je nutné vyjádřit číselnými hodnotami, které zjistíme právě dle různých zkušebních metod.

Mezi hlavní a nejvyužívanější zkušební metody jsou řazeny mechanické zkoušky statické a dynamické, pomocí kterých jsou zjišťovány mechanické vlastnosti materiálu. Především u těchto zkoušek závisí na anizotropii materiálu, tedy na orientaci namáhání a orientaci zhotovení součástí. Vzhledem k tomu, že v experimentální části se budu zabývat 3D tiskem plastového dílu, uvedu zde několik nejzákladnějších zkušebních metod pro plastové díly. ^[14]

3.3.1 Zkoušky tvrdosti

Tvrdość podle Rockwella

Metoda měření tvrdosti dle Rockwella má původ v USA. Tvrdość se stanovuje na základě hloubky vniknutí indentoru do zkušebního materiálu, nikoliv plochy, jak je tomu např. u Vickersovy a Brinellovy metody. Princip metody spočívá ve dvoustupňovém zatěžování indentoru, který tak vniká do povrchu zkušebního tělesa a zanechává trvalý vtisk o určité hloubce. V prvním stupni se jedná pouze o předzatížení, kterým získá indentor a povrchu vzorku definovaný kontakt. Druhým stupněm je zatížení doplňkové, jímž se provádí vlastní měření tvrdosti (viz obrázek 19). Zkouška tvrdosti podle Rockwella plastových těles je předepsána v normě ČSN EN ISO 2039. ^[15]



Obrázek 19 – Schéma Rockwellovy metody ^[p]

Každý dílek Rockwellovy stupnice tvrdosti představuje svislý posun měřícího indentoru o $0,002\text{ mm}$. Maximální hloubka vtlačení je $0,26\text{ mm}$. Hodnota tvrdosti dle Rockwella je v praxi odvozena z následujícího vztahu:

$$HR = 130 - \frac{h}{0,002},$$

kde h [mm] je trvalá hloubka vtlačení.

Indentorem pro Rockwellovu metodu měření tvrdosti plastů je ocelová kulička o přesně definovaném průměru, která musí být vytvrzená a leštěná. Průměry kuliček spolu s oběma stupni zatížení jsou uvedeny v tabulce 4. ^[15]

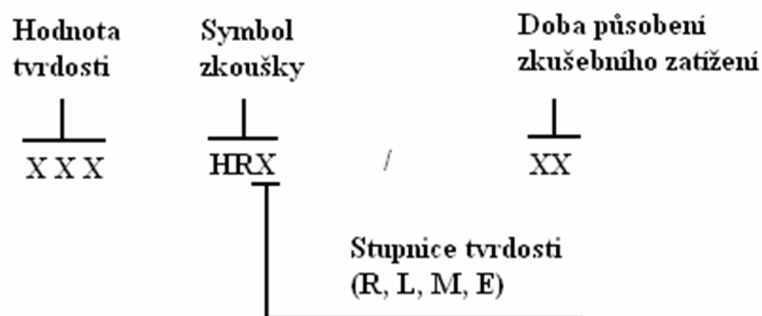
Tabulka 4 – Průměry kuliček a odpovídající hodnoty zatížení ^[q]

Stupnice tvrdosti	Předzatížení F_0 [N]	Doplňkové zatížení F_1 [N]	Průměr kuličky r [mm]
R	98,07	588,4	$12,7 \pm 0,015$
L	98,07	588,4	$6,35 \pm 0,015$
M	98,07	980,7	$6,35 \pm 0,015$
E	98,07	980,7	$3,175 \pm 0,015$

Maximální dovolená odchylka pro předzatížení a doplňkové zatížení je 2 %. Stupnice E je použita pouze pro kalibraci.

Zkoušená tělesa je nutno před samotnou zkouškou kondicionovat v prostředí uvedeném v normě ČSN EN ISO 291, nebo v prostředí přesně specifikovaném v odpovídající materiálové normě. Požadavky na zkušební těleso jsou rovinná plocha a minimální tloušťka 6 mm . V případě nemožnosti dosažení minimální požadované tloušťky 6 mm je dovoleno zkušební těleso složit z více tenkých zkušebních těles o stejné tloušťce a materiálu za podmínky, že dílčí tělesa jsou zcela v kontaktu s minimem nedokonalostí. Všechna vtlačení musí být provedena na stejném povrchu zkušebního tělesa. Po zkoušce se nesmí najít na podložce znatelný vtisk po měřícím tělísku.

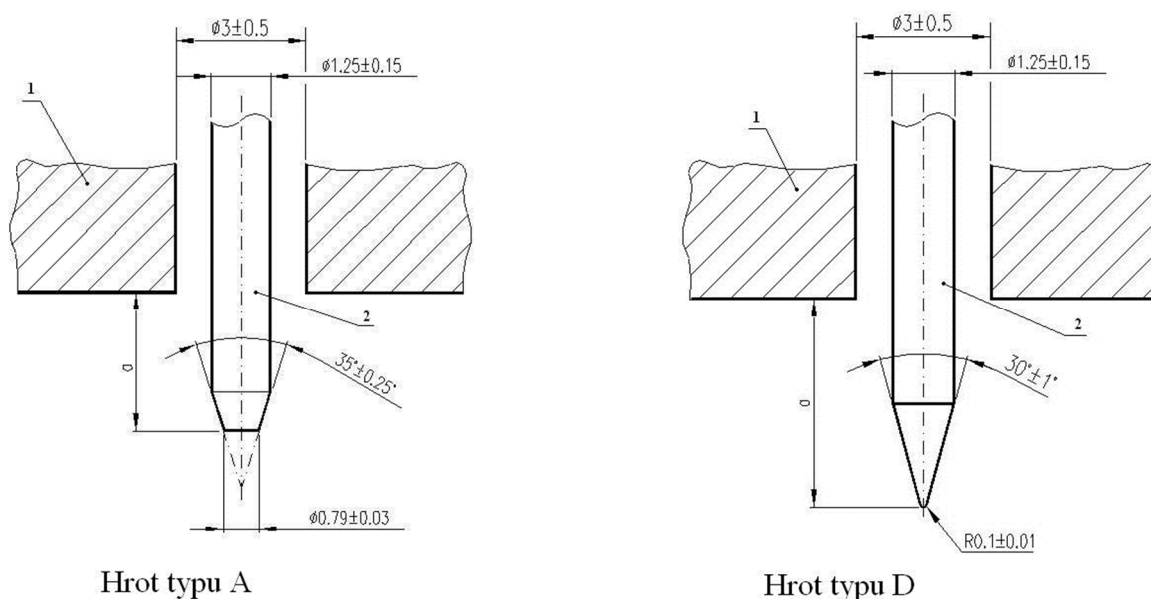
Zkouška se nejčastěji provádí při teplotě v rozmezí $10\text{ °C} \div 35\text{ °C}$. Pro docílení nejpřesnějších hodnot se zkouška provádí v prostředí, které je uvedeno v normě ČSN EN ISO 291 – Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení. Měřené těleso musí být položeno na tvrdé podložce a během zkoušky se nesmí pohnout. Před vlastním měřením drsnosti se aplikuje předzatížení. Do 10 sekund po aplikaci předzatížení se aplikuje doplňkové zatížení, které se odlehčí po 15 sekundách. Na jednom povrchu zkušebního tělesa se provede pět měření. Jednotlivá měření se nesmí realizovat 10 mm jak od kraje zkušebního tělesa, tak ani od sebe navzájem. Zápis hodnoty tvrdosti dle metody Rockwella je znázorněn na obrázku 20. ^[15]



Obrázek 20 – Schéma zápisu tvrdosti dle Rockwella [9]

Tvrdość Shore

Metoda Shore je jednou z nejrozšířenějších metod měření tvrdosti plastů v průmyslu. Princip je založen na vlačování hrotu do povrchu měřeného plastu silou vyvozenou tlakem ocelové pružiny. Metoda Shore je dělena do dvou typů dle použitého tvaru hrotu (viz obrázek 21). Hrot pro zkoušku Shore A má tvar komolého kužele a používá se pro měkké plasty. Hrot typ Shore D má tvar kužele s kulatým vrchlíkem, používá se pro tvrdší plasty. Tvrdość Shore je předepsána v normě ČSN EN ISO 868. [16]



Obrázek 21 – Zkušební hrot tvrdoměru typu A a typu D [1]

Stupnice tvrdosti Shore je definována na rozsahu 0 (úplné vysunutí indentoru) až 100 (nulové vysunutí indentoru). Pokud je při měření tvrdoměrem Shore A zaznamenána hodnota vyšší než 90, je nutné použít tvrdoměr Shore D. To platí analogicky i pro tvrdoměr Shore D, pokud je zaznamenána hodnota nižší než 20, je nutné použít typ metody pro měkké plasty Shore A. [16]

Kalibrované pružiny působí na zkušební hrot tvrdoměru určitou silou dle rovnic:

$$F_A = 550 + 75 \cdot H_A \text{ [mN]},$$

$$F_D = 455 \cdot H_D \text{ [mN]},$$

kde H_A je hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem Shore A a H_D je hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem typu Shore D.

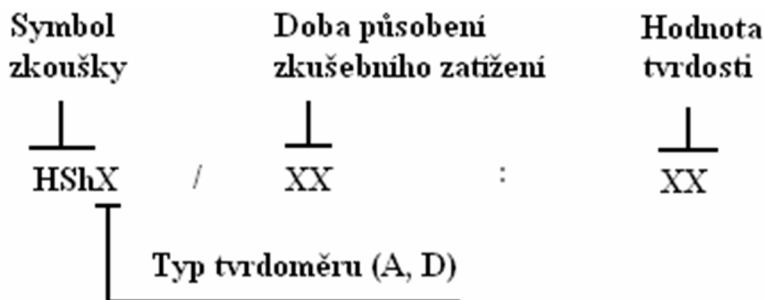
Minimální tloušťka zkušebních vzorků je pro obě metody 4 mm. V případě nemožnosti dosažení minimální požadované tloušťky 4 mm je dovoleno zkušební těleso složit z více tenkých zkušebních těles o stejné tloušťce a materiálu za podmínky, že dílčí tělesa jsou zcela v kontaktu. U vícevrstvých zkušebních těles se nemusí výsledky shodovat s výsledky jednokusového vzorku, díky případnému nedokonalému kontaktu mezi jednotlivými vrstvami.

Tvrdot měřená metodou Shore A se odečítá ze stupnice po 3 sekundách dotyku vtačovaného indentoru se zkušebním vzorkem. Za situace, kdy se tvrdost mění i nadále, se hodnota tvrdosti odečte až po 15 sekundách dotyku. Tvrdot Shore D se odečítá vždy až po 15 sekundách dotyku indentoru se zkušebním vzorkem. ^[16]

Tabulka 5 – Minimální požadované hodnoty na vzorek ^[1]

Tloušťka [mm]	Vzdálenost hrotu od okraje vzorku [mm]	Vzdálenost jednotlivých měření na vzorku [mm]	Počet měření [-]
≤ 4	≤ 9	≤ 6	≤ 5

Zápis hodnoty tvrdosti dle metody Shore je znázorněn na obrázku 22.



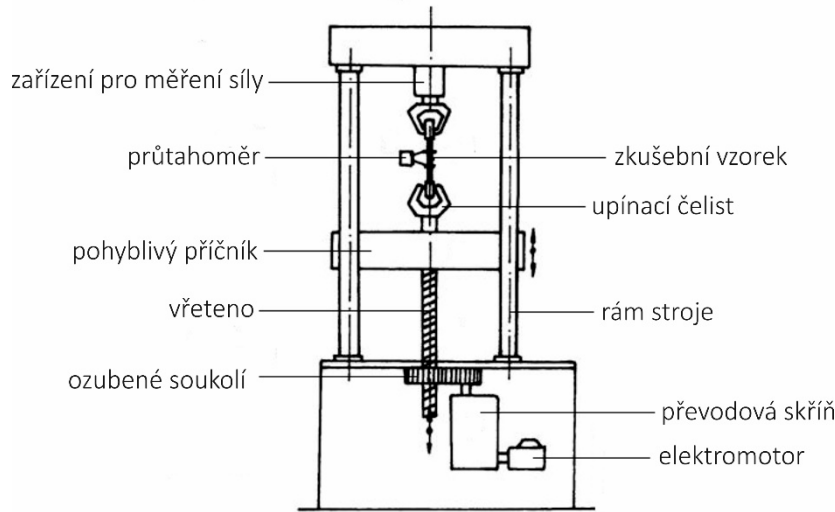
Obrázek 22 – Schéma zápisu tvrdosti dle Shore ^[1]

3.3.2 Mechanické zkoušky statické

Zkouška tahem

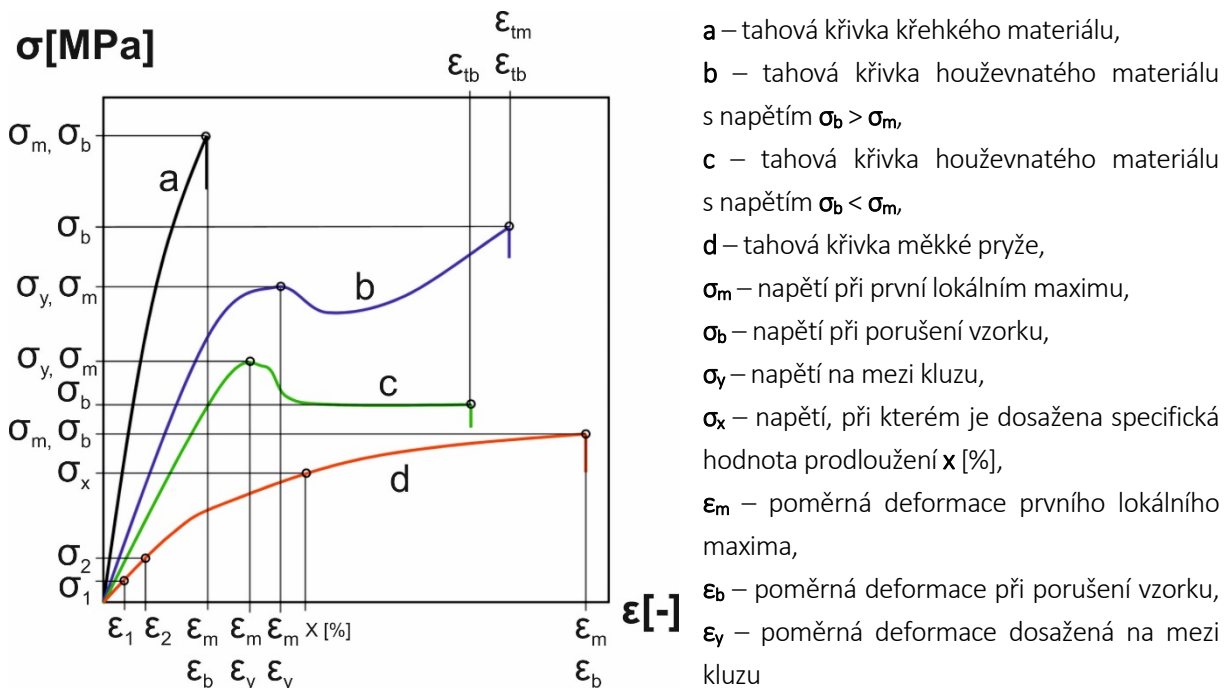
Zkouška tahem patří mezi mechanické zkoušky, pomocí které se určují základní mechanické charakteristiky používané k hodnocení kvality materiálu. Princip tahové zkoušky spočívá v deformaci zkušebního tělesa jednoosým tažením konstantní rychlostí ve směru hlavní podélné osy až do porušení tělesa nebo dokud protažení či tahové napětí nedosáhne požadované hodnoty. Univerzální

zkušební stroj (jinak také trhací stroj) je znázorněn na obrázku 23. Zkouška tahem plastových těles je předepsána v normě ČSN EN ISO 527. [17]



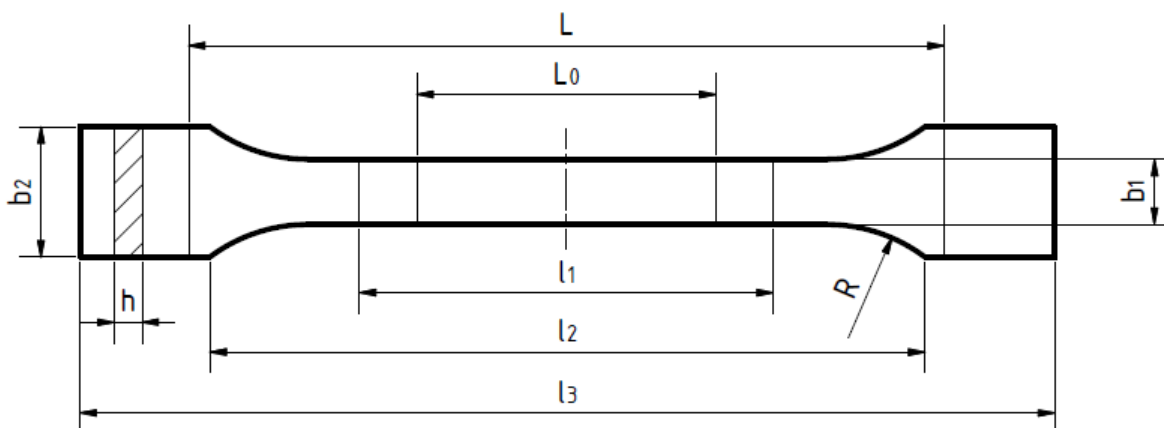
Obrázek 23 – Mechanický univerzální zkušební stroj [5]

Výsledek tahového diagramu je značně závislý na rychlosti deformace a teplotě. Z hlediska časové závislosti deformačního chování plastů nemohl být zaveden pojem tažnost, který se udává u kovů. Proto je pro plasty zaveden pojem prodloužení při přetržení, který zahrnuje deformace pružné i trvalé. U polymerních materiálů existují čtyři základní typy tahových křivek, které jsou zobrazeny na obrázku 24. [17]



Obrázek 24 – Tahový diagram plastových zkušebních těles [1]

Zkušební tělesa pro zkoušku tahem jsou přesně definována normou pro konkrétní polymerní materiál. Nejčastěji se používají zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek (viz obrázek 25), takzvaných osmiček, které umožňují dostatečně pevné uchycení vzorku v čelistech. Ke sledování tahových vlastností kaučuků se využívají zkušební tělesa ve tvaru kroužků. ^[18]



Obrázek 25 – Plastové zkušební těleso pro zkoušku tahem ^[4]

Tabulka 6 – Rozměry zkušebních vzorků dle normy ^[4]

Parametr	Rozměry [mm]	
	1A	1B
Typ zkušební vzorku	1A	1B
b_1 – šířka zúžené pracovní části	$10 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$
b_2 – šířka upínací části	$20 \pm 0,2$	$20 \pm 0,2$
l_1 – délka zúžené pracovní části	$80 \pm 0,2$	$60 \pm 0,2$
l_2 – vzdálenost mezi širšími částmi	$104 \div 113$	$106 \div 120$
l_3 – celková vzdálenost	≥ 150	≥ 150
L_0 – počáteční měřená délka	$50 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$
L – počáteční vzdálenost čelistí	115 ± 1	$l_2 \begin{smallmatrix} +5 \\ 0 \end{smallmatrix}$
h – tloušťka zkušební vzorku	$4 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$
R – poloměr zkušební vzorku	$20 \div 25$	≥ 60

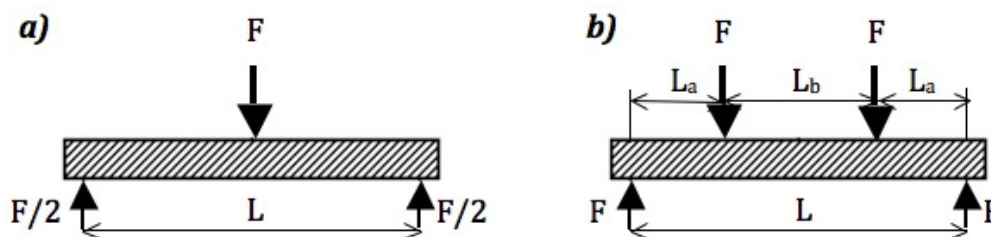
Zkouška ohybem

Zkouškou ohybem získáme závislost síly na průhybu zkušební tělesa, z níž určíme ohybové charakteristiky namáhání polymerních součástí. To je velice časté namáhání plastů (konstrukce z laminátů, nosníky, obkladové materiály a další). Principem zkoušky je zatěžování zkušební vzorku umístěného na dvou podporách. Dle typu ohybové zkoušky (viz obrázek 26) je zkušební vzorek zatěžován jedním trnem uprostřed vzorku (tříbodový ohyb) nebo jsou použity dva trny symetricky rozmístěny od středu vzorku (čtyřbodový ohyb). Zkouška ohybem plastových těles je předepsána

normou ČSN EN ISO 178. Pevnost v ohybu je dána maximální hodnotou tahového napětí, jež působí na povrch zkušební tělesa v okamžiku lomu. Smluvní pevnost v ohybu R_{mo} je dána vztahem:

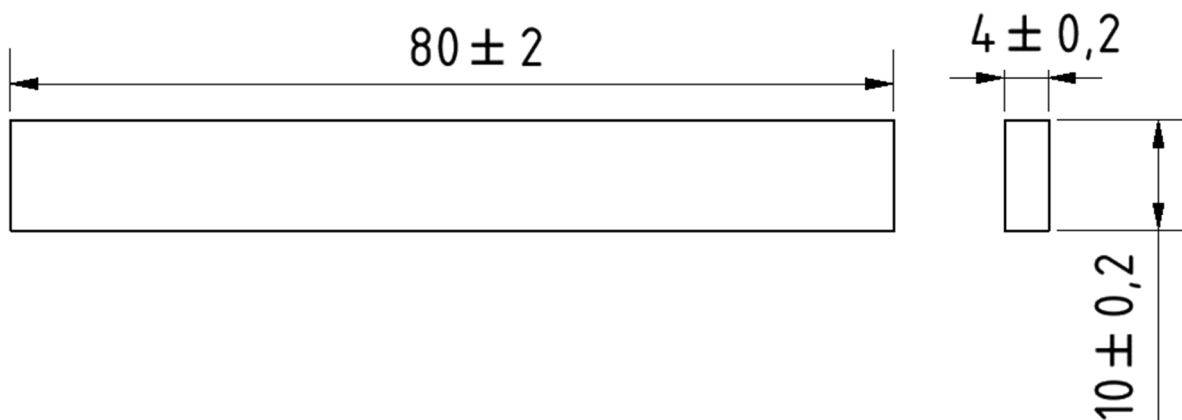
$$R_{mo} = \frac{M_{omax}}{W_o} [MPa],$$

kde M_{omax} je maximální ohybový moment a W_o je průřezový modul. ^[14]



Obrázek 26 – Zatěžování ohybem: a) tříbodový ohyb, b) čtyřbodový ohyb ^[14]

Přednostní zkušební těleso pro zkoušku ohybem definováno dle normy je zobrazeno na obrázku 27. Jestliže není možno použití rozměrů pro přednostní zkušební vzorek, je nutné využít ostatních rozměrů zkušebních vzorků. Pro ty je nutné zachovat specifický poměr délky a tloušťky $l/h = 20 \pm 1$. Taktéž je potřeba dodržet poměr tloušťky a šířky, který je uveden v tabulkách 7, 8. Minimálním předepsaným počtem testovaných vzorků nutných k určení výsledku zkoušky je 5, k zvýšení přesnosti se doporučuje použití více vzorků. ^[19]



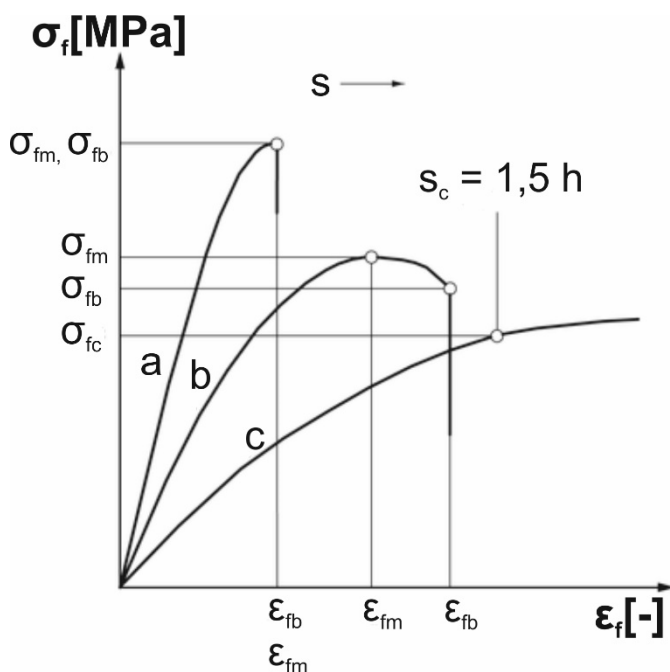
Obrázek 27 – Přednostní zkušební vzorek pro zkoušku ohybem ^[19]

Tabulka 7 – Poměr tloušťky a šířky pro ostatních zkušební tělesa ^[19]

Jmenovitá tloušťka h [mm]	Šířka b [mm]
$1 < h \leq 3$	$5 \pm 0,5$
$3 < h \leq 5$	$10 \pm 0,5$
$5 < h \leq 10$	$15 \pm 0,5$

Tabulka 8 – Poměr tloušťky a šířky pro ostatních zkušební tělesa pokračování ^[4]

Jmenovitá tloušťka h [mm]	Šířka b [mm]
$10 < h \leq 20$	$20 \pm 0,5$
$20 < h \leq 35$	$35 \pm 0,5$
$35 < h \leq 50$	$50 \pm 0,5$



- a – ohybová křivka křehkého materiálu,
- b – ohybová křivka houževnatého materiálu s napětím $\sigma_{fm} > \sigma_{fb}$,
- c – ohybová křivka houževnatého materiálu,
- σ_{fm} – maximální ohybové napětí,
- σ_{fb} – ohybové napětí při porušení vzorku,
- σ_{fc} – ohybové napětí při průhybu s_c rovno 1,5násobku tloušťky h vzorku,
- ϵ_{fb} – deformace při porušení vzorku,
- ϵ_{fm} – deformace při maximálním napětí.

Obrázek 28 – Ohybová zkouška plastových vzorků ^[4]

3.3.3 Mechanické zkoušky dynamické

Charpyho zkouška rázem v ohybu

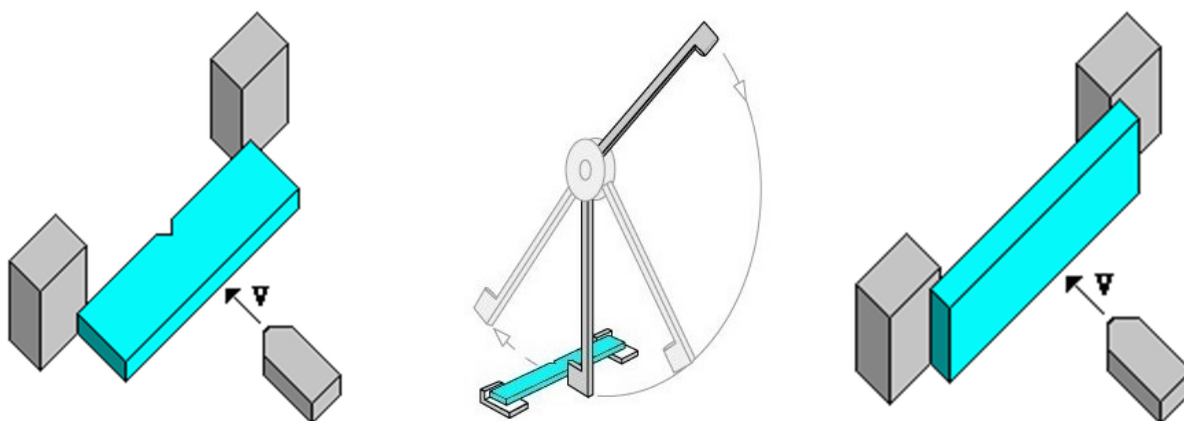
Podstatou Charpyho zkoušky rázem v ohybu je přeražení specifického zkušebního tělesa s vrubem nebo bez vrubu jedním rázem beranu kyvadlového kladiva za předem definovaných podmínek (viz obrázek 29). Vrub o předepsané geometrii je uprostřed tělesa na protilehlé straně k místu úderu. Při zkoušce se stanovuje energie absorbovaná zkušebním tělesem, která je dána rozdílem potenciálních energií. Zjištěnými charakteristikami jsou rázová houževnatost a_{cU} pro těleso bez vrubu a vrubová houževnatost a_{cV} pro těleso s vrubem, které jsou definovány jako nárazová energie spotřebovaná k přeražení zkušebního vzorku vztažená k původnímu průřezu:

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} [kJ \cdot m^{-2}],$$

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} [kJ \cdot m^{-2}],$$

kde E_c je kinetická energie, h je tloušťka vzorku, b je šířka vzorku, b_N je šířka pod vrubem. [20]

Jelikož se hodnoty při nárazu u mnoha plastových materiálů mění s teplotou je nutno zkoušky realizovat při definované teplotě. Jedná-li se o jinou teplotu než standartní teplotu okolí (21 °C) musí být zkušební těleso zahřáté nebo ochlazené na danou teplotu za řízených podmínek. Rázová zkouška v ohybu se provádí na tzv. Charpyho kladivu, které se liší rozsahem dle typu zkoušeného materiálu. Naměřené hodnoty ze zkoušky by se měly pohybovat mezi 10 % ÷ 80 % rozsahu měřicí stupnice přístroje. Zkouška rázem v ohybu plastových těles je předepsána v normě ČSN EN ISO 179. [20]

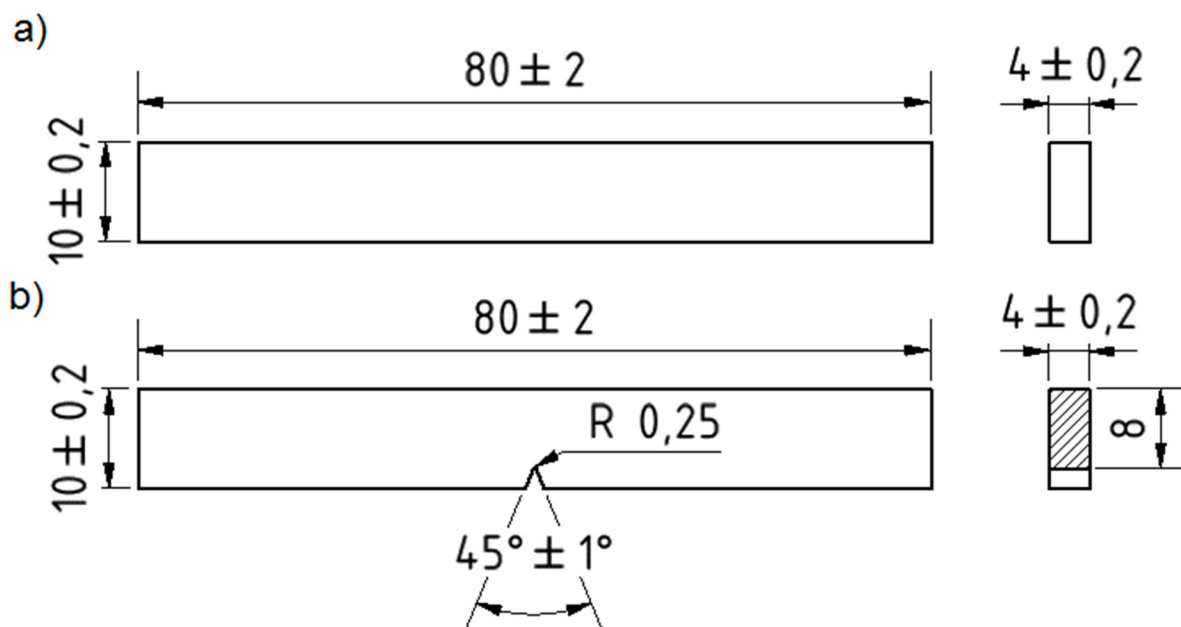


Obrázek 29 – Zkušební vzorek s vrubem (dopad na bok) vlevo [w], přerážení vzorku uprostřed [x], vzorek bez vrubu (dopad naplocho) vpravo [w]

Zkušební tělesa pro zkoušku ohybem v rázu jsou ve tvaru normovaných trámčů (viz obrázek 30). Pro typ zkoušky s dopadem na bok je těleso opatřeno také normalizovaným V nebo U vrubem (nejčastěji to bývá V vrub), který je zhotoven frézováním nebo pilováním. Nejčastěji využívaný V vrub má šířku 2 mm a hloubku 3,3 mm. [20]

Tabulka 9 – Normované rozměry zkušebních těles [v]

Zkušební těleso	Délka l [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka h [mm]	Vzdálenost podpěr L [mm]
velké	120	15	10	70
střední	80	4	10	70
malé	50	6	4	40



Obrázek 30 – Ukázka středních vzorků pro Charpyho zkoušku rázem v ohybu a) zkušební těleso bez vrubem, b) zkušební těleso s V vrubem ^[4]

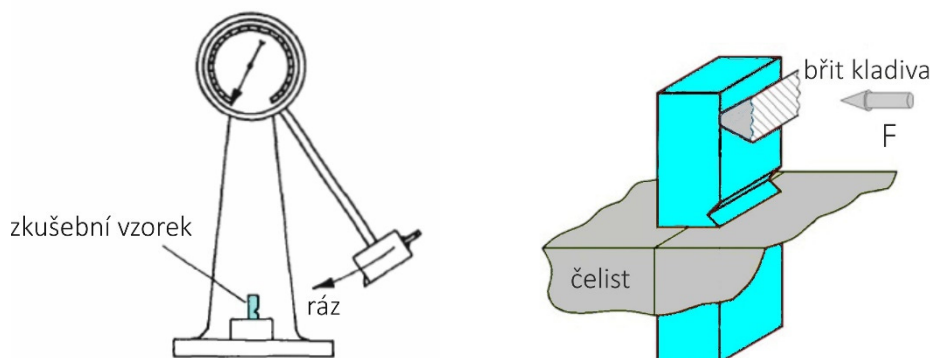
Rázová houževnatost Izod

Princip je obdobný jako u předchozí Charpyho zkoušky rázem v ohybu. Rozdíl je v umístění zkušebního tělesa, které je v případě zkoušky Izod ve svěráku jako svislý vetknutý nosník (viz obrázek 31). Ráz je vyvozen na oblast vzorku v určité výšce nad svěrákem, resp. v dané výšce nad vrubem (22 mm). Vrubová zkušební tělesa se uchytávají tak, aby byla přerážena ze strany vrubem. Rázová houževnatost a_{iU} a vrubová houževnatost a_{iN} jsou definovány analogicky jako u Charpyho metody:

$$a_{iU} = \frac{E_c}{h \cdot b} [kJ \cdot m^{-2}],$$

$$a_{iN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} [kJ \cdot m^{-2}],$$

kde E_c je kinetická energie, h je tloušťka vzorku, b je šířka vzorku, b_N je šířka pod vrubem. Zkouška rázové houževnatosti Izod plastových těles je předepsána v normě ČSN EN ISO 180. ^[21]



Obrázek 31 – Kladivo pro zkoušku Izod vlevo ^[2], umístění vzorku vpravo ^[4]

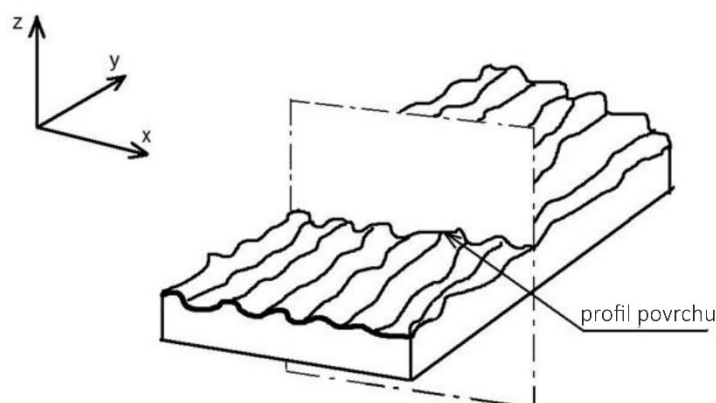
Nevýhodou této zkoušky je brždění pohybu kladiva přeraženým zbytkem zkušebního tělesa, což vede k naměření nižších hodnot. Jako opatření se provádí po vlastním měření tzv. slepý pokus s kyvadlem, na kterém je umístěna přeražená část vzorku. Z rozdílu této hodnoty a hodnoty naměřené s volným kyvadlem se získá energie potřebná k odmrštění zkušebního tělesa. Tento rozdíl se pak odečítá od měření vlastního přeražení vzorku. ^[21]

3.3.4 Měření drsnosti povrchu

Veškeré technologické metody, používané ke zhotovení technických ploch, po sobě zanechávají nerovnosti, které jsou sledovány pro zajištění správné funkce součástí. Nerovnost lze definovat jako prostorový útvar, kterým se od sebe liší ideální funkční plocha od skutečné funkční plochy. Ideální funkční plochou je myšlena plocha bez jakýchkoliv nerovností a nedokonalostí, kde nedokonalosti jsou náhodné povrchové vady, jako jsou například povrchové trhliny, rýhy a koroze. Nezahrnujeme je do hodnocení textury povrchu. Sledovaný reálný povrch můžeme vyjádřit jako dvourozměrné či třírozměrné opakované úchyly od ideálního povrchu v závislosti na použité metodě. Hodnocení kvality a textury povrchu se zabývají normy ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288. ^[22]

Profilové hodnocení textury povrchu

Jednotlivé parametry u profilového hodnocení textury povrchu jsou vyhodnocováni na základě jednoho profilu. Profilem povrchu je křivka vzniklá jako průsečnice skutečného povrchu a vhodně zvolené roviny, nejčastěji kolmé k rovině rovnoběžné se skutečným povrchem (viz obrázek 32). Profilové hodnocení textury povrchu je popsáno normou ČSN EN ISO 4288. ^[23]

Obrázek 32 – Profil povrchu ^[aa]Tabulka 10 – Profily ^[bb]

Název	Definice
Profil povrchu	Průsečnice skutečného povrchu a dané roviny.
Snímaný profil	Geometrické místo středů snímacího hrotu stanovených parametrů.
Referenční profil	Dráha, po které se snímač podél vedení pohybuje v rovině řezu.
Úplný profil	Číselná forma snímaného profilu vzhledem k referenčnímu profilu.
Základní profil	Úplný profil po aplikaci krátkovlnného filtru λ_s . Základní profil reprezentuje základnu pro číselné zpracování profilu pomocí filtrů profilu a pro výpočet parametrů profilu. Základní profil je základem pro hodnocení parametrů základního profilu.
Zbytkový profil	Základní profil získaný snímáním ideálně hladkého a rovného povrchu (optická rovina). Zbytkový profil je složen z úchylek vedení, vnějších a vnitřních poruch a z úchylek vzniklých při přenosu profilu.
Profil drsnosti	Profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu λ_c . Profil drsnosti je základem pro hodnocení parametrů profilu drsnosti.
Profil vlnitosti	Profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru profilu λ_c na základní profil. Profil vlnitosti je základem pro hodnocení parametrů profilu vlnitosti.

Nejnámějším a nejpoužívanějším parametrem povrchu je bezesporu průměrná aritmetická úchylka profilu (P_a, W_a, R_a), jedná se o výpočet aritmetického průměru absolutních hodnot pořadnic $Z(X)$.

$$P_a, R_a, W_a = \frac{1}{l_{P,R,W}} \int_0^{l_{P,R,W}} |Z(x)| dx$$

Průměrná kvadratická úchylka profilu (P_q, W_q, R_q), je kvadratický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(X)$.

$$P_q, R_q, W_q = \sqrt{\frac{1}{l_{P,R,W}} \int_0^{l_{P,R,W}} |Z^2(x)| dx}$$

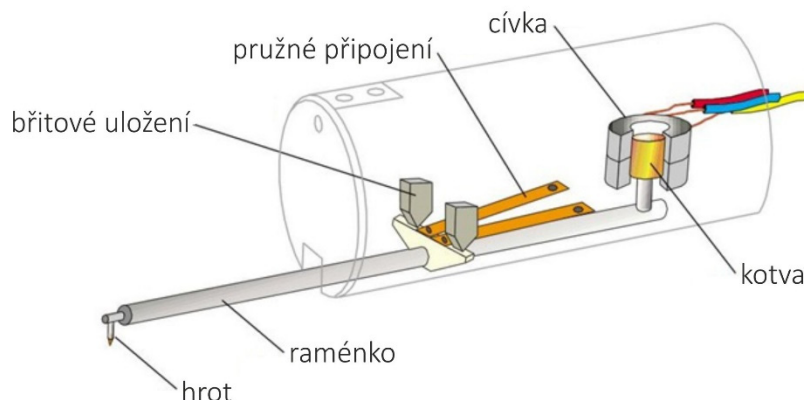
Šikmost profilu (P_{sk} , W_{sk} , R_{sk}) je podílem průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(X)$ a třetí mocniny hodnoty P_q , W_q nebo R_q . Rovnice uvedená níže je definována pro R_{sk} s tím, že pro P_{sk} a R_{sk} je definice obdobná. Tento parametr je významně ovlivňován ojedinělými výstupky a prohlubněmi.

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[\frac{1}{l_R} \int_0^{l_R} |Z^3(x)| dx \right]$$

Špičatost profilu (P_{ku} , W_{ku} , R_{ku}) je podílem průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(X)$ a čtvrté mocniny hodnoty P_q , W_q nebo R_q . Rovnice níže je opět obdobná i pro P_{ku} a W_{ku} .^[24]

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \left[\frac{1}{l_R} \int_0^{l_R} |Z^4(x)| dx \right]$$

Profilová metoda patří mezi tzv. dotykové metody. Tyto metody využívají přesné přístroje s vysokou citlivostí, a proto jsou tradiční a v průmyslu nejčastěji využívaným způsobem pro měření profilové textury povrchu. Dotykový měřicí přístroj (viz obrázek 33) je dle normy ČSN EN ISO 3274 definován jako přístroj, který zkoumá dané povrchy snímacím hrotem a získává tím úchytky ve formě profilu povrchu, vypočítává parametry a je zároveň schopen tento profil zaznamenat. Postup měření spočívá v přímočarém posuvu diamantového hrotu profilometru po měřeném povrchu. Mechanický signál přenášený na měřicí hrot je indukčně převeden na elektrický signál. Výstupem je profil povrchu v digitalizované podobě, který představuje řez měřeným povrchem. Profil je poté vyhodnocován řadou normalizovaných i nenormalizovaných parametrů. Naměřená data jsou zpracována samotným profilometrem nebo je použit dodaný software.^[25]



Obrázek 33 – Schéma indukčního snímače^[cc]

Zvolený měřicí hrot odpovídá za to, zda dojde k zachycení celého tvaru profilu drsnosti až na dno největších a nejužších prohlubní. Proto je dobré správně uvážit a volit geometrii hrotu profilometru v závislosti na typu měřeného povrchu. Hrot musí být přitlačován takovou silou, aby při pohybu snímače byla jeho kulová plocha v neustálém dotyku s měřeným povrchem.

Tabulka 11 – Jmenovité hodnoty charakteristik profilometru ^[bb]

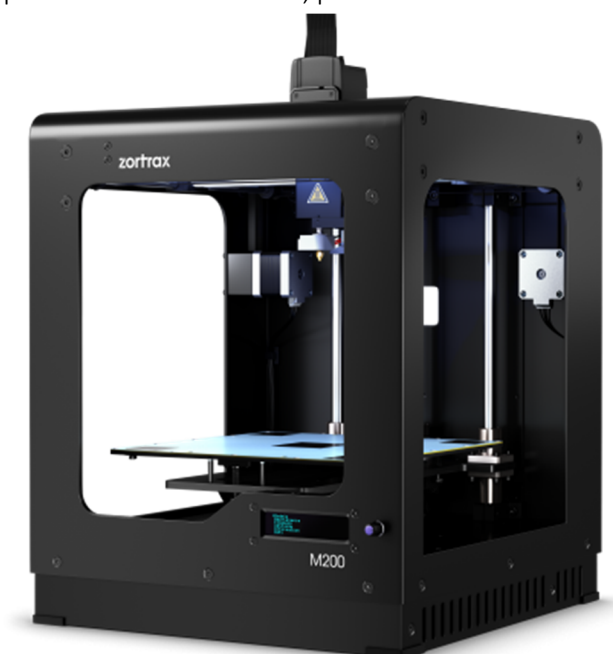
Geometrie hrotu snímače	Ideálním tvarem snímacího hrotu je kužel s kulovou špičkou. Poloměr zaoblení špičky $r_{tip} = 2\mu m, 5\mu m, 10\mu m$. Vrcholový úhel kužele je 60° (přednostně) nebo 90° .
Statická měřicí síla	Jmenovitá hodnota statické měřicí síly ve střední poloze snímacího hrotu je $0,00075 N$. Jmenovitá rychlost změny měřicí síly je $0 Nm^{-1}$.
Mezní vlnová délka filtru profile (cut-off)	(Charakteristiky filtru podrobně popsány v ČSN EN ISO 11562) Jmenovité hodnoty mezních vlnových délek filtru (cut-off) se vybírají z řady: ... mm; 0,08 mm; 0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm; 8 mm; ... mm.

4 REALIZACE ZKUŠEBNÍHO TISKU

V této části diplomové práce se zaměřuji na 3D tisk modelu s využitím nejrozšířenější aditivní technologie známé jako FDM. Problematika tisku pomocí této metody bude popsána na vytištěném modelu proudového motoru, který je složen z více než 40 dílů. Případné nedostatky (vady) tisku těchto dílů budou zhodnoceny a bude navrženo opatření pro jejich eliminaci. Následně bude model podroben rozměrové kontrole, z níž se vyhodnotí rozměrová přesnost tištěných dílů. Kontrola rozměrů bude prováděna na průmyslovém výpočetním tomografu.

4.1 3D Tiskárna

Veškerý tisk dílů byl prováděn na 3D tiskárně Zortrax M200 (viz obrázek 34) od stejnojmenné polské firmy Zortrax. Princip metody tisku je pojmenován jako LPD (Layer Plastic Deposition), což je v podstatě totéž jako FDM (Fused Deposition Modeling), pouze tento nový název nepodléhá registrované ochranné značce společnosti Stratasys. Vývoj a vznik této tiskárny byl umožněn díky kick-starterovému projektu, který odstartoval v březnu roku 2013 a v roce 2014 byl zahájen oficiální prodej. Tiskárna získala již mnoho ocenění na mezinárodním poli, např. v roce 2015, 2016 obsadila v rámci hodnocení na 3D HUBS první místo v kategorii Plug'n'play. Zortrax M200 se řadí mezi kancelářské 3D tiskárny ve vyšší cenové kategorii s pořizovací cenou kolem 50 000 Kč. Spolu s tiskárnou je dodáván speciální software Z-Suite, pomocí kterého CAD model připravíme k tisku.



Obrázek 34 – 3D tiskárna Zortrax M200 ^[dd]

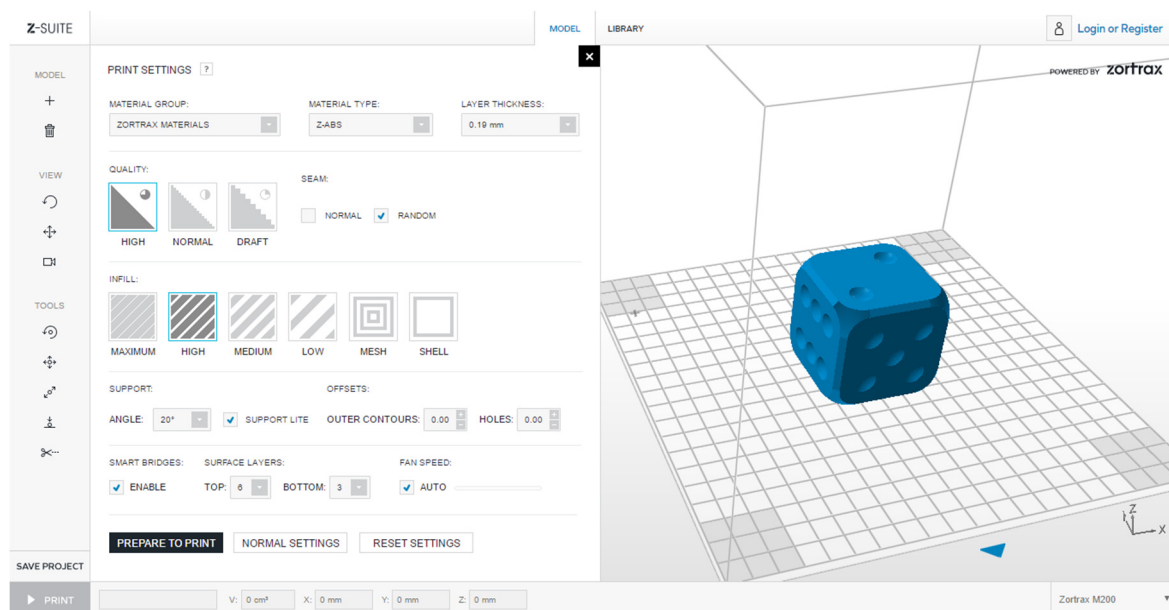
4.1.1 Technické parametry

Tabulka 12 – Technické parametry 3D tiskárny Zortrax M200 ^[dd]

Parametry tisku	
Technologie	LPD (Layer Plastic Deposition)
Tloušťka vrstvy	0,39 ÷ 0,09 mm
Minimální tloušťka stěny	0,4 mm
Vyrovnávání stavěcí platformy	automatická kalibrace platformy
Rozměrová a úhlová přesnost	± 0,2 %
Maximální teplota extrudéru	290 °C
Maximální teplota stavěcí platformy	105 °C
Provozní teplota okolí	20 ÷ 30 °C
Maximální spotřeba	200 W
Parametry tiskárny	
Hmotnost	18 kg
Rozměry (s cívkou)	350 x 440 x 505 mm
Stavěcí prostor	200 x 200 x 180 mm
Vstupní materiál	termoplast (drát navinutý na cívce)
Průměr drátu vstupního materiálu	1,75 mm
Vnitřní průměr trysky	0,4 mm
Počet extrudérů	1
Podpory	ze stejného materiálu jako model, odstranění mechanicky
Přenos dat	pomocí SD karty

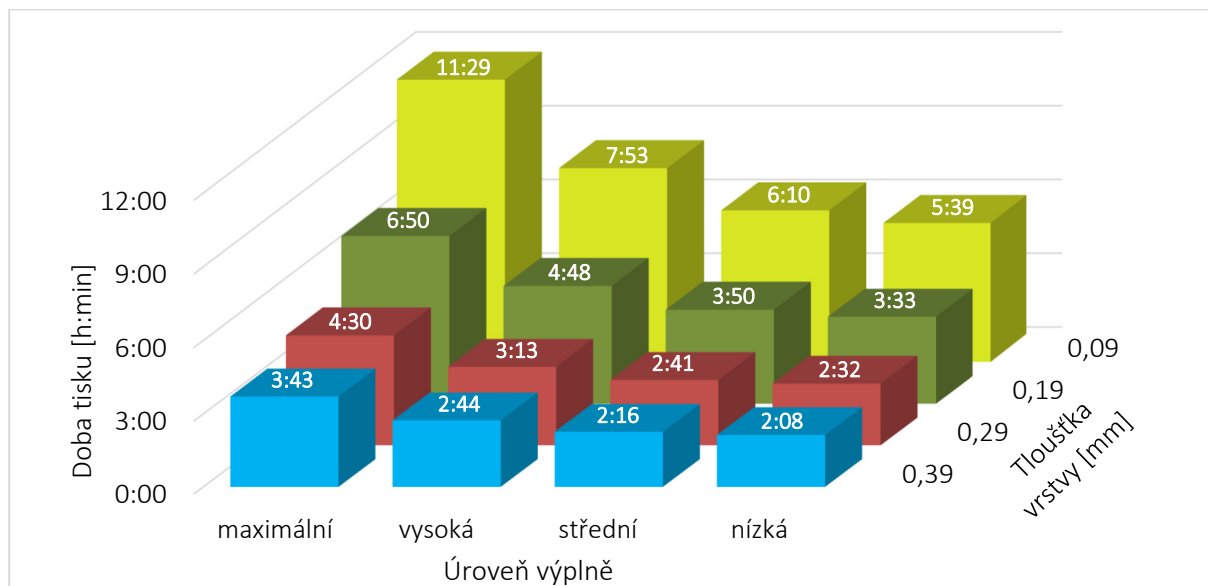
4.1.2 Software

Tiskárny Zortrax vyžadují použití výhradně softwaru Z-Suite. Tento software přímo od výrobce Zortrax vytváří speciální typ formátu (zcode), který nelze nahradit použitím jiných dostupných softwarů. V mém případě byl použit software Z-Suite verze 1.13.1.1, který byl v tu dobu nejstabilnější. Nyní už je možno upgradovat minimálně na verzi 2.5, což sebou jistě přináší více možností nastavení tisku. Prostředí Z-Suite je intuitivní, v první fázi nabízí možnosti rotace, posunu, změny velikosti a rozdělení modelu. Dále se nastavují parametry tisku, kdy je nutno zvolit typ použitého materiálu, tloušťku vrstvy, kvalitu povrchu, množství a styl výplně a v neposlední řadě úhel tvorby podpor. Všechny tyto parametry mohou výrazně ovlivnit jak kvalitu výsledné součásti, tak i dobu tisku. Prostředí softwaru Z-Suite je znázorněno na obrázku 35.



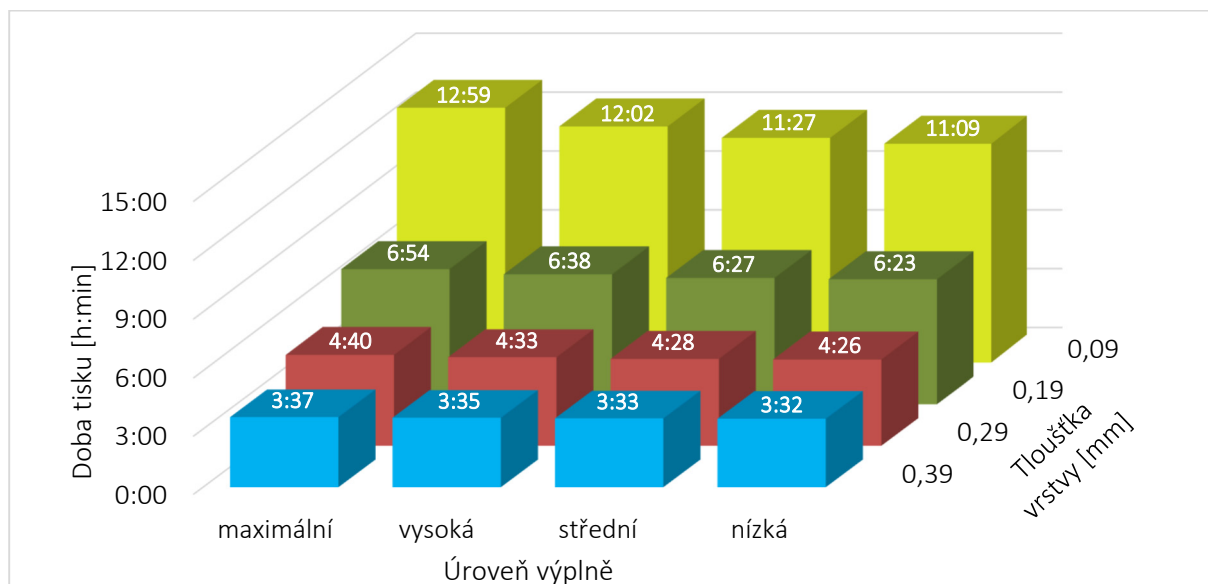
Obrázek 35 – Prostředí softwaru Z-Suite

Doba tisku je nejvíce ovlivněna tloušťkou tisknuté vrstvy a úrovní výplně. Úroveň výplně hraje nejvyšší roli v případě objemných a tlustostěnných těles. V případě tenkostěnných těles není nárůst doby tisku s rostoucím množstvím výplně tak znatelný. V následujícím grafu 3 jsem znázornil závislost doby tisku na tloušťce vrstvy a úrovni výplně při normální kvalitě povrchu. Jako model pro demonstraci byla zvolena zvětšená hrací kostka (na obrázku 35) o rozměrech 50 x 50 x 50 mm, která představuje právě zmíněné tlustostěnné těleso.

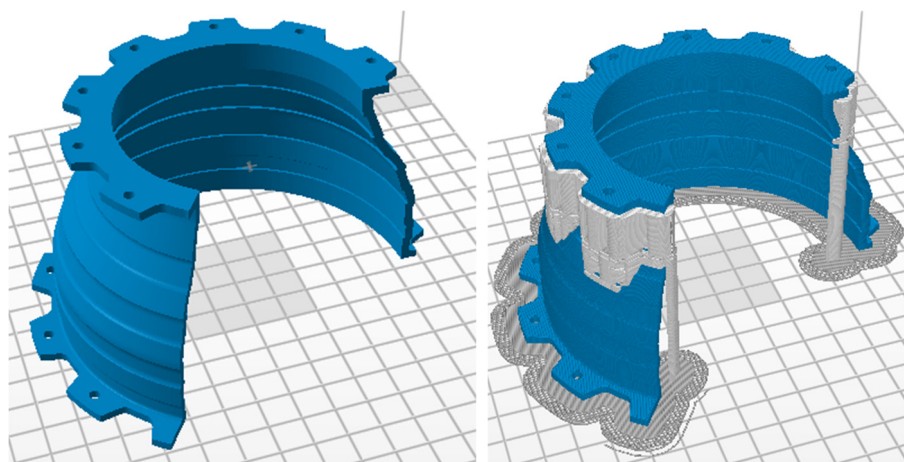


Graf 3 – Závislost doby tisku na tloušťce vrstvy a úrovni výplně pro model hrací kostky

Naopak v grafu 4 jsem znázornil tutéž závislost (doby tisku na tloušťce vrstvy a úrovni výplně při normální kvalitě povrchu), ale jako model byl použit tenkostěnný díl, přesněji kryt turbíny znázorněný na obrázku 36, který byl následně reálně vytisknut.



Graf 4 – Závislost doby tisku na tloušťce vrstvy a úrovni výplně pro tenkostěnný model



Obrázek 36 – Tenkostěnný díl (kryt turbíny)

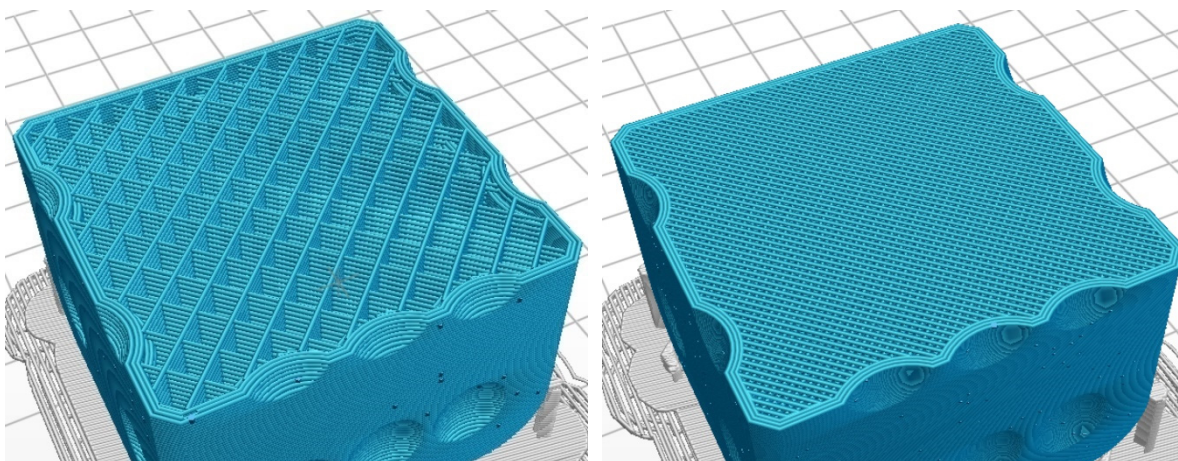
Z grafu 4 je patrné, že úroveň výplně v tomto případě neměla tak znatelný vliv jako u předchozího modelu hrací kostky. Větší část doby tisku je u těchto tenkostěnných dílů využita pro stavbu vnějších a vnitřních stěn. Dalším poznatkem je skutečnost, že vliv úrovně výplně na dobu tisku značně narůstá s klesající tloušťkou vrstvy. Příkladem je rozdíl dob tisku, který je při tloušťce vrstvy $0,39\text{ mm}$ mezi vysokou a maximální úrovní výplně pouze 2 minuty, kdežto při tloušťce vrstvy $0,09\text{ mm}$ mezi stejnými úrovněmi výplně již 57 minut. Pro tento typ dílů je tedy zásadní volba vhodné tloušťky vrstvy v závislosti na požadované kvalitě.

V následující tabulce 13 jsou uvedeny nejpoužívanější nastavení parametrů tisku v závislosti na celkové kvalitě vytisknutého modelu. Simulace byla opět provedena na modelu hrací kostky.

Tabulka 13 – Doba tisku v závislosti na tiskových parametrech

Celková kvalita	Tloušťka vrstvy [mm]	Kvalita povrchu	Výplň	Úhel tvorby podpor [°]	Spotřeba materiálu [g]	Doba tisku [h:min]
Nejvyšší	0,09	hladký	maximální	20	94	14:32
Mnou použitá	0,19	hladký	vyšoká	20	56	05:24
Střední	0,29	normální	střední	45	45	02:41
Nejnižší	0,39	normální	nížká	45	36	02:08

Na obrázku 37 jsou ukázky dvou úrovní výplně. Nížká hustota a maximální hustota výplně. Software dále nabízí možnost tisku skořepiny s volbou tloušťky stěny. Ale i v případě skořepiny by byly stavěny alespoň podpory pro následnou stavbu horní stěny. Z obrázku 37 u maximální úrovně výplně je patrné, že ani v tomto případě se nejedná o 100 % vyplnění prostoru. Novější verze softwaru již sebou přinese přesnější procentuální nastavení hustoty výplně, které v této verzi softwaru není možné.

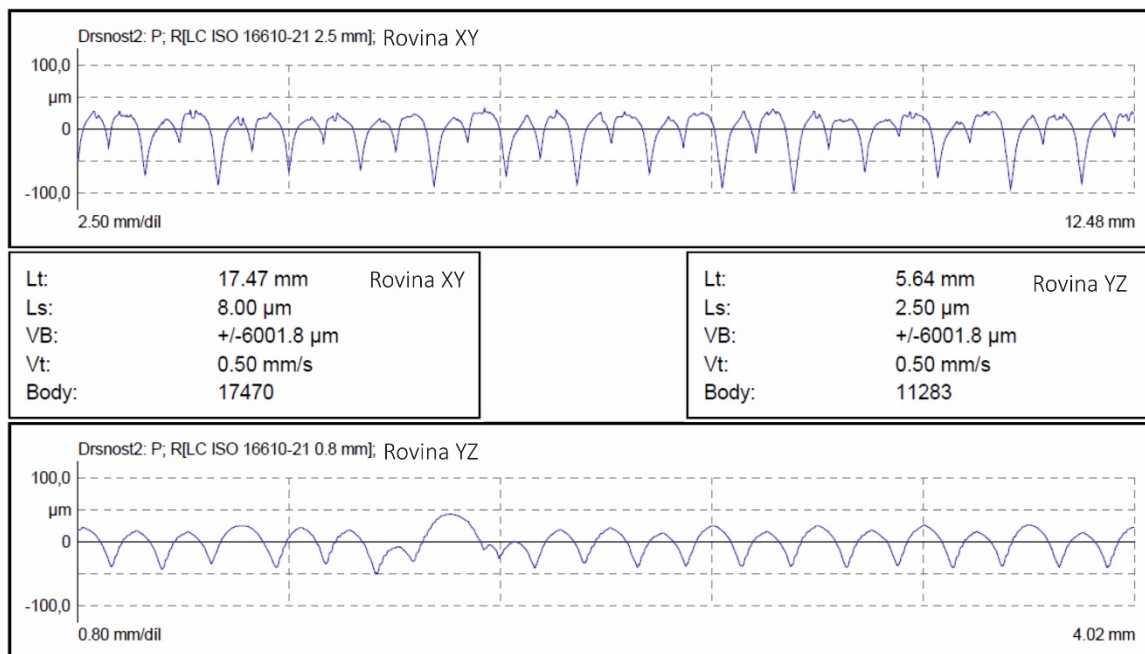


Obrázek 37 – Ukázka dvou úrovní výplně (vlevo nízká, vpravo maximální)

Z pohledu kvality povrchu software nabízí tři možnosti volby: hladký, normální, hrubý. Tyto nastavení jsou z hlediska drsnosti povrchu naprosto nevyovídající hodnotou. Proto jsem provedl měření drsnosti povrchu na vytisknuté součásti, u které bylo použito nastavení kvality povrchu jako „hladké“ při tloušťce vrstvy 0,19 mm. Drsnost byla měřena ve dvou rovinách. V rovině XY, která je rovnoběžná s platformou tiskárny, a v rovině YZ, která je kolmá na rovinu platformy. Drsnost v rovině XY je závislá na kladení vláken vedle sebe, kdežto drsnost v rovině YZ je ovlivněna kladením jednotlivých vrstev na sebe. Posuv hrotu profilometru byl vždy kolmo na jednotlivá vlákna. V následující tabulce 14 jsou uvedeny hodnoty z měření.

Tabulka 14 – Změřené parametry drsnosti

[μm]	Parametry drsnosti v rovině XY					Parametry drsnosti v rovině YZ				
	1	2	3	\bar{x}	σ	1	2	3	\bar{x}	σ
Ra	21,19	19,42	21,82	20,81	1,25	17,81	16,39	15,91	16,70	0,99
Rz	127,04	121,00	133,41	127,15	6,21	79,12	71,96	66,07	72,39	6,53
Rt	139,83	129,36	144,79	137,99	7,88	93,34	93,65	67,96	84,99	14,74
Rp	32,88	30,03	37,27	33,39	3,65	34,05	28,97	25,55	29,52	4,27
Rv	94,16	90,97	96,14	93,76	2,61	45,07	42,99	40,52	42,86	2,28
RSm	422,44	420,10	456,65	433,07	20,46	252,00	222,94	200,11	225,02	26,01
RSk	-1,53	-1,47	-1,53	-1,51	0,04	-0,11	-0,32	-0,62	-0,35	0,25
Rku	4,70	4,74	4,63	4,69	0,06	2,23	2,36	2,17	2,25	0,09



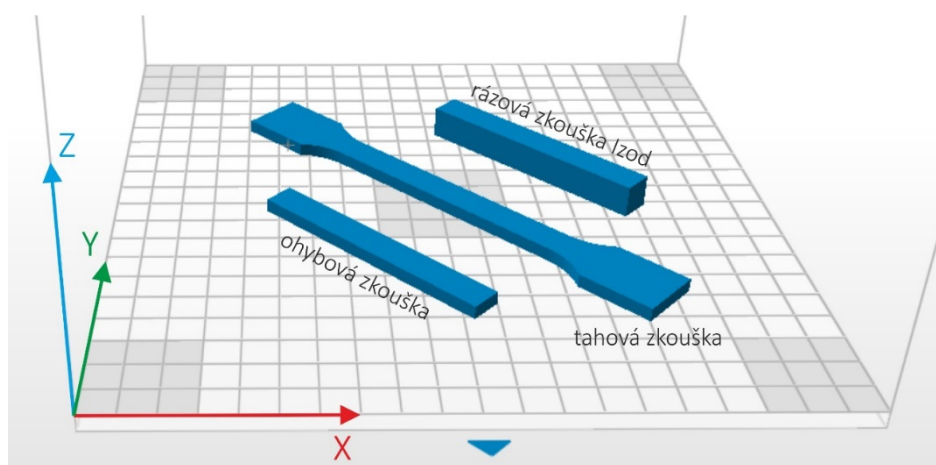
Obrázek 38 – Profil drsnosti pro rovinu XY nahoře a rovinu YZ dole

4.1.3 Materiál

Spolu s tiskárnou je doporučeno použít vstupní materiál přímo od výrobce Zortrax, pro který je tiskárna optimálně nastavena. Materiál od výrobce je podstatně dražší než běžně dostupné filamenty, což svádí k použití neoriginálního materiálu. Tiskárna dovoluje použití i neoriginálního vstupního materiálu, ale v tom případě je nutné přesné vyladění teplot extrudéru a stavěcí platformy. Já jsem měl k dispozici dva typy materiálů přímo od výrobce, které jsem uvedl v následující tabulce 15. Výrobce také uvádí k jednotlivým materiálům některé mechanické vlastnosti pro vytištěné zkušební vzorky. Orientace tisku těchto vzorků je znázorněna na obrázku 39.

Tabulka 15 – Charakteristika použitých materiálů pro 3D tisk ^[dd]

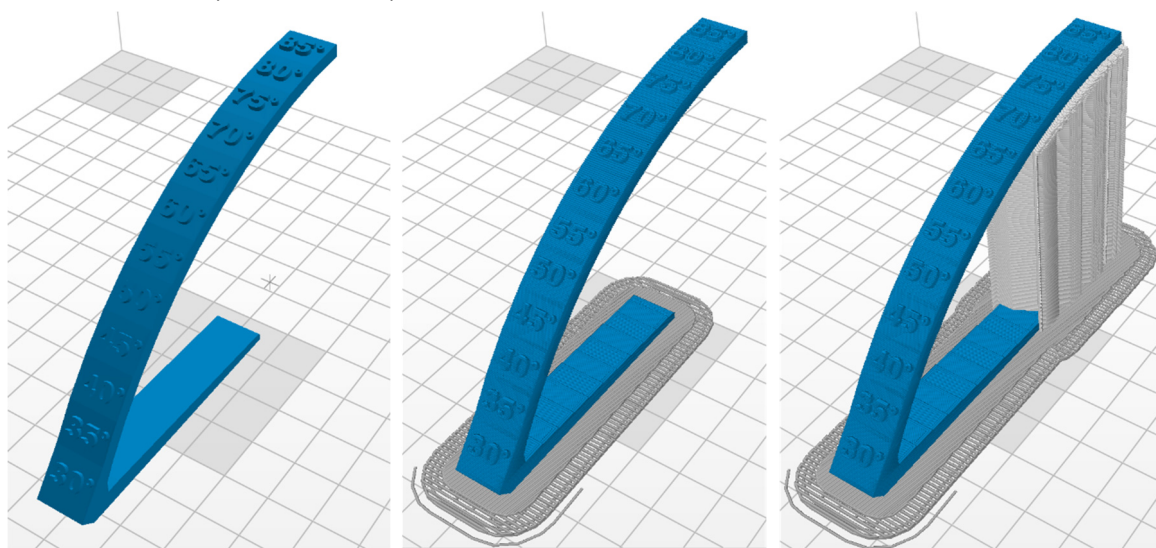
Charakteristiky	Z-ABS	Z-ULTRAT	
Základní údaje			
Obecný název	>ABS< (Akrylonitril-Butadien-Styren)	>ABS+PC< (ABS + Polykarbonát)	
Složení	90 ÷ 100 % ABS, 0 ÷ 10 % aditiva a barviva	90 ÷ 100 % ABS, 0 ÷ 3 % PC, 0 ÷ 10 % aditiva a barviva	
Popis	ABS – amorfnní termoplastický kopolymer, středně polární	PC – amorfnní termoplastický polymer, středně polární	
Hustota	1,195 g/cm ³	zkoušeno dle ISO 1183-3:2003	1,179 g/cm ³
Barva	šedá	slonová kost	
Mechanické vlastnosti			
Pevnost v tahu (σ_m, σ_y)	30,46 MPa	zkoušeno dle ISO 527:1998	32,60 MPa
Napětí při porušení vzorku (σ_b)	25,89 MPa	zkoušeno dle ISO 527:1998	30,70 MPa
Poměrná deformace na mezi kluzu (ϵ_m, ϵ_y)	4,52 %	zkoušeno dle ISO 527:1998	3,78 %
Poměrná deformace při porušení vzorku (ϵ_{tb})	11,08 %	zkoušeno dle ISO 527:1998	4,87 %
Pevnost v ohybu (R_{m0})	46,30 MPa	zkoušeno dle ISO 178:2011	54,00 MPa
Modul pružnosti (E)	1,08 GPa	zkoušeno dle ISO 178:2011	1,85 GPa
Vrubová houževnatost Izod (a_{iN})	8,93 kJ/m ²	zkoušeno dle ISO 180:2004	5,26 kJ/m ²
Tvrdoost Shore (HShD)	69,2	zkoušeno dle ISO 868:1998	73,4
Teplotní vlastnosti			
Teplota skelného přechodu	107,89 °C	zkoušeno dle 11357-3:2014	106,40 °C
Horní teplota zpracovatelnosti	280 °C		280 °C



Obrázek 39 – Orientace tisku zkušebních vzorků pro výše uvedené zkušební metody

4.1.4 Postprocessing

Tiskárna má pouze jeden extrudér, což znamená, že podpory jsou tisknuty ze stejného materiálu jako samotný model. Podpory se poté musí odstranit z modelu mechanicky. U všech modelů je tisknut nejprve tzv. raft, tedy první vrstva stavěcího materiálu, která přilne k povrchu stavěcí platformy a vytvoří základnu pro následný tisk modelu (viz obrázek 40). Tisk podpor se nastavuje ve stupních a jedná se o rozsah úhlu, který svírá rovina stavěcí platformy s modelem. Pokud nastavím úhel tvorby podpor na 20° , pak se podpory budou tvořit pod částmi modelu, které svírají s kolmicí na stavěcí platformu $90^\circ \div 70^\circ$ (viz obrázek 40). Tedy při nastavení 0° by se měly podpory tvořit jen pod částmi modelu rovnoběžnými se stavěcí platformou.



Obrázek 40 – Ukázka tvorby raftu a podpor (model, raft, podpory)

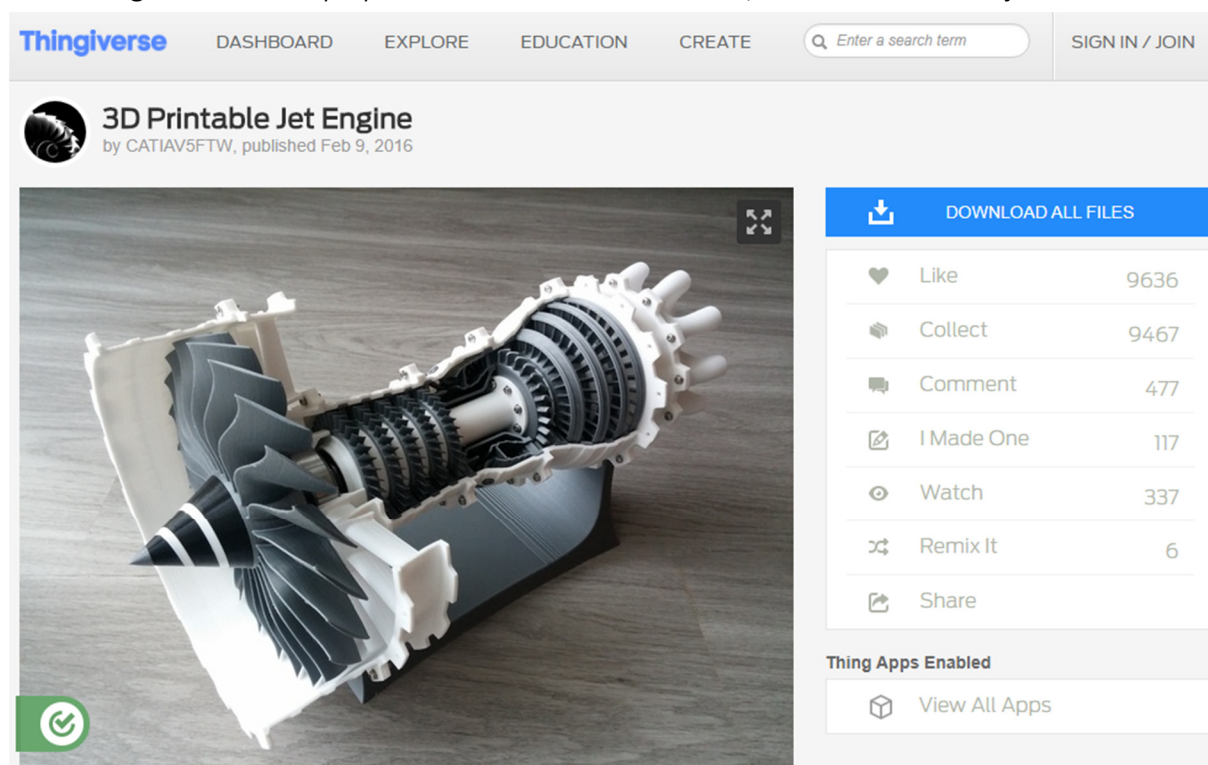
Po dokončení tisku je dobré nechat model a stavěcí platformu vychladnout, nejen kvůli bezpečnosti, ale pro snadnější odstranění modelu. Po zchladnutí je možno model seškrábnout z platformy, při této činnosti by hrozilo riziko poškození spodní části modelu přilehající k platformě. Toto riziko nám však řeší výše zmiňovaný raft, který je mezi součástí a platformou. Raft lze ve většině případů lehce strhnout ze součásti. Podpory se dají také odstranit ručně, ale většinou zanechávají na modelu vlákna filamentu a je nutné je dodatečně odstranit skalpelem.

Finální dokončení součásti může být provedeno několika způsoby. Nejlevnějším a nejdostupnějším způsobem je broušení, např. pomocí smirkového papíru. To je však časově náročné a mnohdy neproveditelné díky tvarové složitosti modelu. Další možností je tryskání, které je daleko rychlejší a může být provedeno i na tvarově složitějších modelech. Při tryskání však hrozí riziko poškození tenkostěnných dílů. Nejpoužívanější bývá metoda napařování, kdy je model vystaven parám látky (nejčastěji acetonu), která rozpouští jeho povrchovou vrstvu a dochází tak vlivem gravitační síly

k vyhlazování. V mém případě bude použit aceton pouze pro slepení nadměrně velkých dílů, které byly tisknuty po částech a povrch součástí bude v neupraveném stavu po tisku.

4.2 Model

Aby došlo k objektivnímu zhodnocení tiskárny a metody FDM jako takové, bylo nutné vybrat model s tvarovou komplexností. Z tohoto důvodu byl zvolen zmenšený model proudového motoru, který se celkově skládá z 40 dílů o tvarové různorodosti. Model je volně dostupný z webové stránky www.thingiverse.com a byl vytvořen uživatelem Chris Shakal, kterému tímto děkuji.



Obrázek 41 – Model proudového motoru z webu^[ee]

4.2.1 Součásti modelu

V následujících tabulkách 16, 17 jsem uvedl veškeré tisknuté součásti použité pro stavbu modelu proudového motoru. Ke každému dílu je uvedena doba tisku a hmotnost spotřebovaného materiálu. Většina dílů byla tisknuta samostatně, avšak některé menší součásti byly tisknuty současně. Tiskem více dílů současně se na jednu stranu prodlužuje doba tisku, což je způsobeno přejezdy trysky mezi jednotlivými součástmi, na druhou stranu se nemusí čekat na vychladnutí, odtržení součástí a opětovné nahřátí platformy. Díly byly tisknuty s tloušťkou vrstvy $0,19\text{ mm}$ a vysokou úrovní výplně.

Tabulka 16 – Seznam vytisknutých součástí

Součást	Výpočet SW [h:min:s]	Doba tisku [h:min]	Postprocessing [h:min]	Hmotnost [g]
Materiál Z-ABS				
Hřídelová spojka	0:00:05	0:23	0:01	2
Vstup vstřikovačů paliva	0:00:05	0:25	0:01	5
Kužel dmyhadla	0:00:30	1:12	0:01	10
Nízkotlaká hřídel kompresoru	0:00:40	2:56	0:01	23
Výfuk	0:03:40	4:21	0:02	35
Nízkotlaká hřídel turbíny	0:00:55	4:13	0:05	36
Nízkotlaká cívka turbíny	0:01:40	4:14	0:07	37
Kryt spalovací komory	0:01:55	5:26	0:15	40
Kryt kompresoru	0:01:50	5:49	0:10	50
Kryt turbíny	0:02:40	7:07	0:10	58
Kryt dmyhadla	0:04:45	11:04	0:15	88
Výstupní tryska	0:10:05	12:08	0:20	97
Celkem Z-ABS	0:28:50	59:18	1:28	481
Materiál Z-ULTRAT				
Špička kužele dmyhadla	0:00:01	0:06	5	1
Proužek kužele dmyhadla	0:00:05	0:19	2	4
Vstřikovače paliva	0:00:30	0:54	11	11
Spojka stojánku	0:00:25	1:15	2	15
Kužel trysky	0:00:44	2:17	1	21
Vysokotlaká turbína	0:00:50	2:39	2	23
Spalovací komora	0:03:10	4:52	20	32
Vysokotlaká cívka kompresoru	0:02:05	4:40	1	38
Stojánek část 1	0:02:20	5:28	5	58
Stojánek část 2	0:02:55	6:40	5	68
Stator ventilátoru část 1	0:03:35	8:51	25	71
Stator ventilátoru část 2	0:03:55	9:32	25	76
Dmyhadlo	0:30:10	19:12	5	140
Vysokotlaký stator kompresoru stupně 3	0:03:20	2:09	3	18
Vysokotlaký stator kompresoru stupně 4				
Vysokotlaký stator kompresoru stupně 5				
Nízkotlaká turbína stupně 4	0:05:45	4:01	3	33
Nízkotlaký stator turbíny stupně 4				
Nízkotlaká turbína stupně 3	0:07:15	5:21	4	45
Nízkotlaký stator turbíny stupně 2				
Nízkotlaký stator turbíny stupně 3				

Tabulka 17 – Seznam vytisknutých součástí pokračování

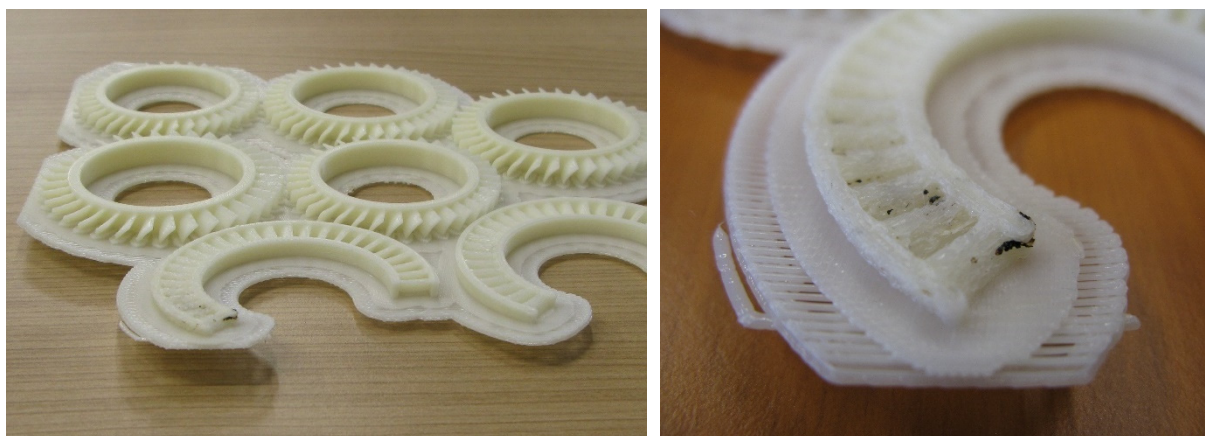
Součást	Výpočet SW [h:min:s]	Doba tisku [h:min]	Postprocessing [h:min]	Hmotnost [g]
Materiál Z-ULTRAT				
Nízkotlaká turbína stupně 1	0:07:50	5:48	4	45
Nízkotlaká turbína stupně 2				
Nízkotlaký stator turbíny stupně 1				
Vysokotlaký kompresor stupně 1	0:11:15	7:05	15	58
Vysokotlaký kompresor stupně 2				
Vysokotlaký kompresor stupně 3				
Vysokotlaký kompresor stupně 4				
Vysokotlaký kompresor stupně 5				
Vysokotlaký stator kompresoru stupně 1				
Vysokotlaký stator kompresoru stupně 2				
Celkem Z-ULTRAT	1:26:10	91:19	2:18	757
CELKEM	1:55:00	150:37	3:46	1238 g
	156 h 18 min			

4.3 Typické vady metody FDM

V průběhu tisku součástí došlo k několika typickým vadám, které jsou spojeny právě s metodou FDM. Na níže uvedených obrázcích 42 až 47 jsou tyto vady ukázány, včetně popisu příčiny jejich vzniku a návrhem jejich eliminace. Tyto vady značně znehodnocují výslednou kvalitu součásti a také mají zásadní vliv na dobu postprocessingu.

Ohyb

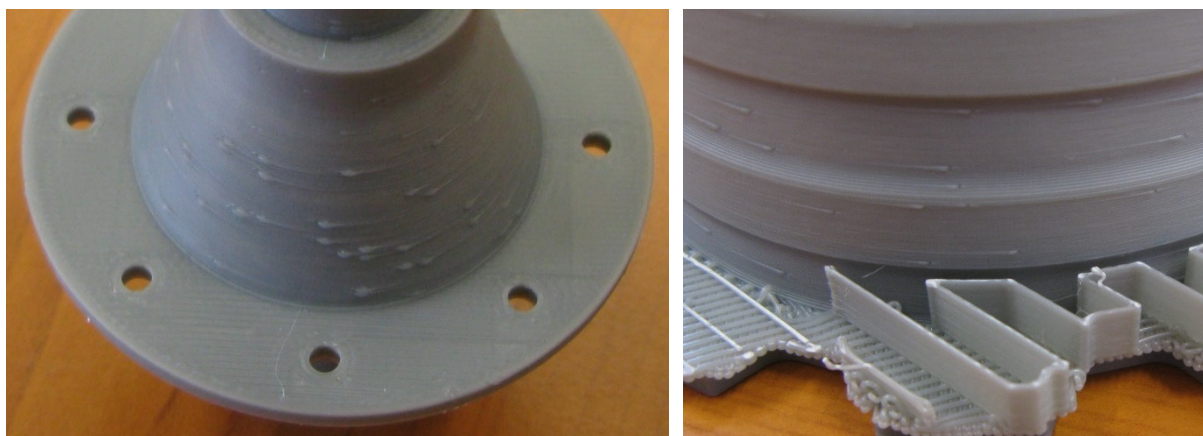
Zřejmě nejčastější vadou FDM metody je ohyb modelu (viz obrázek 42 vlevo), který je převážně pozorován při tisku rozměrných modelů. Může probíhat při chladnutí plně vytištěné součásti, kdy dochází vlivem nerovnoměrného ochlazování ke zkřivení částí modelu. V horším případě dochází k ohybu součásti v průběhu samotného tisku, kdy je navíc model destruován přejíždějící ohřátou tryskou (viz obrázek 42 vpravo). Tento typ vady vzniká především u tzv. otevřených tiskáren, jejichž tiskový prostor není izolován od okolního prostředí. Příčinou bývá náhlý proud vzduchu (postačí např. průvan při otevření dveří), který projde přes součást a tím dojde k nerovnoměrnému ochlazení a smrštění. Tento problém se dá částečně řešit použitím vyhřívané tiskové platformy spolu s ochrannými kryty pro tiskárnu. Tím se zajistí konstantní teplota v celém tiskovém prostoru a následně rovnoměrné ochlazování. Opatřením v mém případě bylo přemístění tiskárny do místností se stálými podmínkami (teplota, ustálený vzduch).



Obrázek 42 – Zkroucené součástky vlevo, poničená součást tryskou vpravo

Kapky

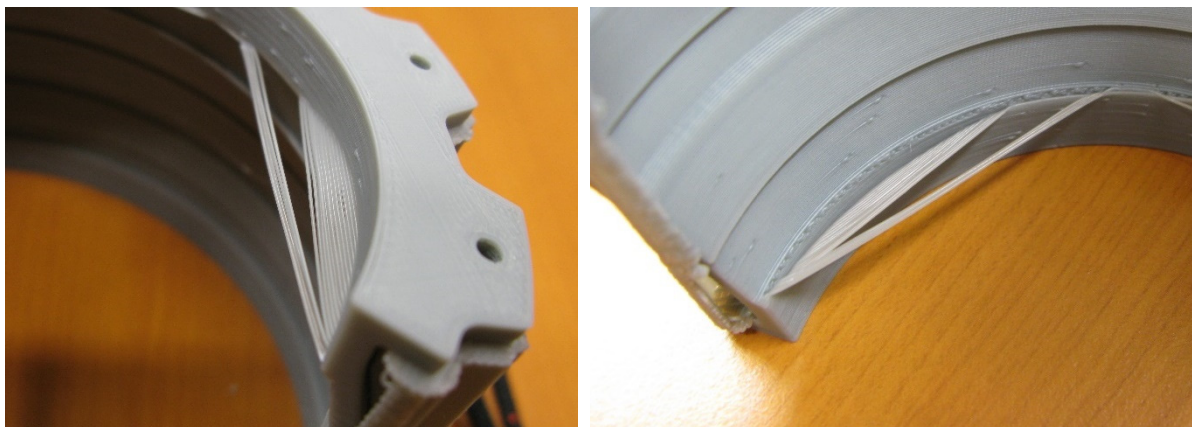
Kapky vznikají v průběhu tisku a tvoří se v místech zahájení extruze jednotlivých vrstev. Příčinou je přerušovaný proces extruze při přejezdech na novou pozici, kdy je průchod filamentu extrudérem opakovaně přerušován a započat na nové pozici. Tato vada lze různými nástroji minimalizovat, ale nelze ji zcela zabránit. Jednou z možností je přerušování extruze těsně před dojezdem na finální polohu, tím dojde k uvolnění tlaku uvnitř trysky a při zahájení extruze na nové poloze není vytlačeno tolik přebytečného materiálu. Softwary dále nabízejí možnost umístění počátku tisku vrstvy do míst, která nejsou viditelná. Mnou používaný software však tyto možnosti nastavení nenabízí a jediná funkce softwaru, která částečně ovlivní vznik kapek, je volba rozmístění počátků tisku. Náhodné rozmístění je zobrazeno na obrázku 43, druhá možnost je seřazení počátků tisku rovnoměrně např. pod sebe. Tuto vadu lze poměrně jednoduše odstranit napařováním acetonovými parami nebo broušením.



Obrázek 43 – Náhodně rozmístěné počátky tvorby vrstev (kapky)

Separace vrstev

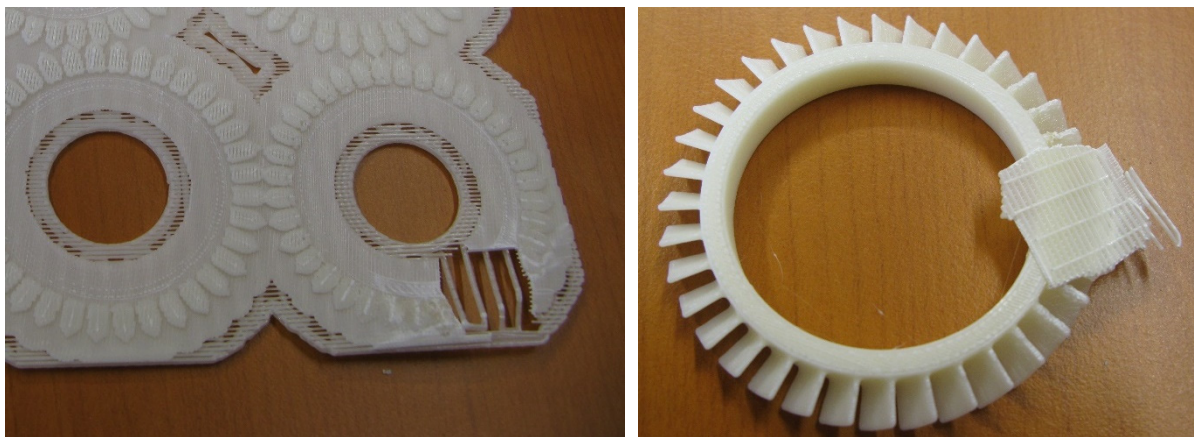
K této vadě může docházet jak v průběhu tisku, tak i při chladnutí vytisknuté součásti. Vlivem ochlazování modelu dochází k separaci vrstev nebo jednotlivých vláken, u kterých došlo k nedostatečnému spojení s předchozí vrstvou modelu. Nejčastěji se tato vada vyskytuje u převisů, kde nebyly použity podpory (tzv. mosty), protože je zde nutné natavený filament rychle ochladit, aby mohl most vzniknout. Této vadě se dá předejít zvýšením teploty extruze, čímž dojde k lepšímu spojení s předchozí vrstvou. Pro kritická místa je vhodné použít podpory. Další možnou variantou je přiblížení trysky blíže k předchozí vrstvě, což by mělo také zajistit lepší spojení vrstev. Vlákna extrudovaného materiálu na obrázku 44 se vlivem smršťování a nedostatečného spojení odtrhla od předchozí vrstvy a musela být odstraněna mechanicky.



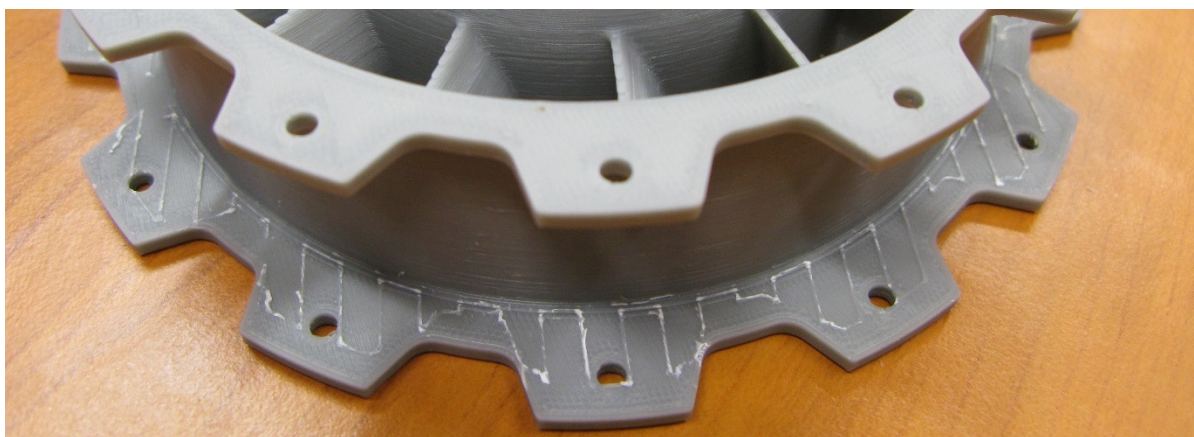
Obrázek 44 – Vypružená vlákna na součástce

Spojení raftu a podpor s modelem

Ideálně lze raft a podpory z modelu odstranit ručně odtržením. V některých případech však může dojít k nadměrnému spojení raftu či podpor s modelem. V takové situaci se stává část raftu či podpor z hlediska homogenity součástí samotného modelu. Spojení s raftem je následkem nadměrného natavení první vrstvy modelu, která je tisknuta na raft (viz obrázek 45). Kdežto spojení s podporami je způsobeno nadměrným natavením první vrstvy podpor. Především tehdy, kdy je díky tvarové složitosti nutno tisknout podpory na plochu modelu (viz obrázek 46). U obou vad dochází k nadměrnému natavení filamentu a zároveň nedostatečnému ochlazení extrudovaného materiálu. Řešením tohoto problému je vlastně příčina vzniku předchozí vady (separace vrstev). Aby nedocházelo k nadměrnému spojení je nutné provádět extruzi při nižších teplotách a s vyšší vůlí mezi tryskou a přechozí vrstvou. Pokud k tomuto spojení dojde, je nutné model upravit za použití skalpelu a výsledná kvalita povrchu je značně ovlivněna šikovností obsluhy.

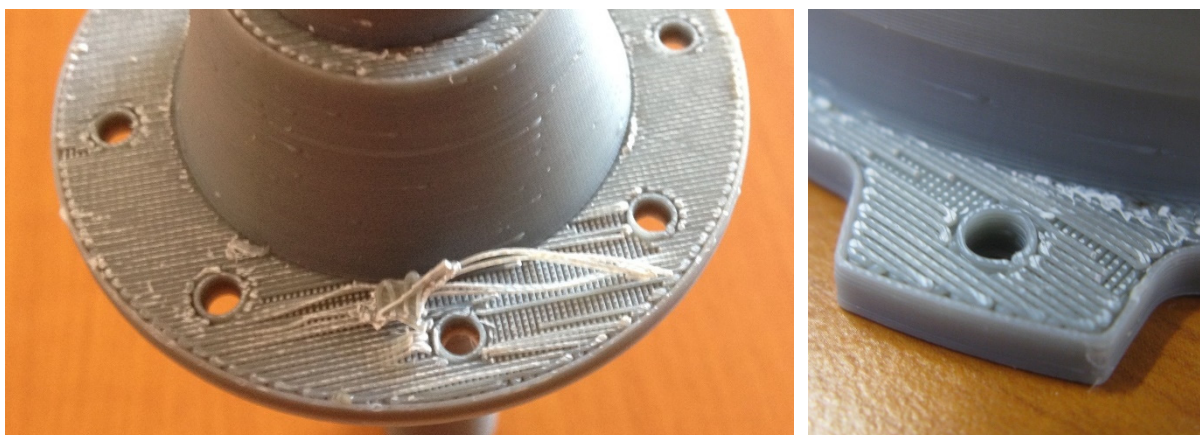


Obrázek 45 – Vytržený raft vlevo, raft spojený s modelem vpravo



Obrázek 46 – Stopy vláken z odstraněných podpor

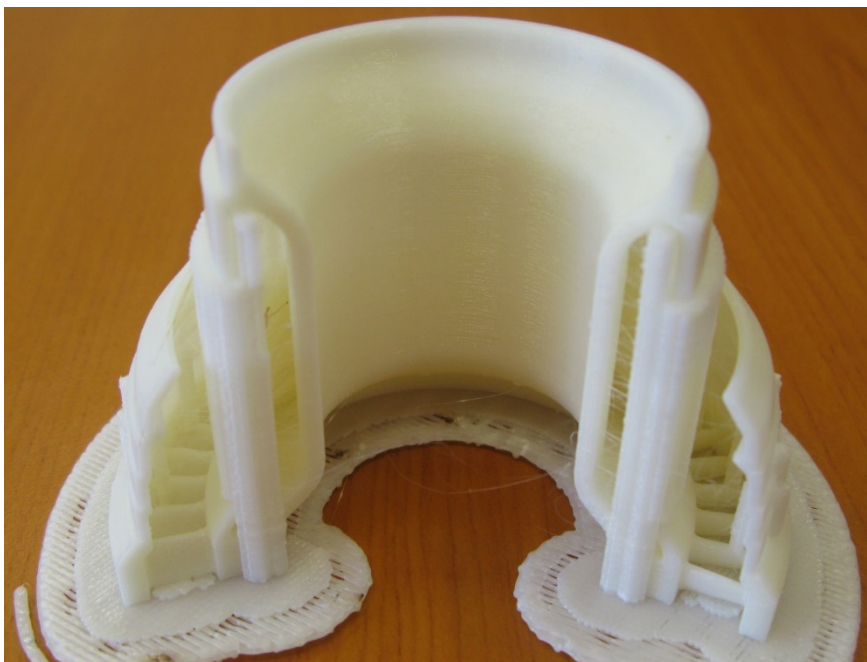
Pokud není tato vada zřejmá na první pohled, může dojít v průběhu postprocessingu k dalšímu poškození modelu. Především při odstraňování raftu nebo podpor z modelu hrozí riziko vytržení části vrstvy (viz obrázek 47), následkem je poškození povrchu a výsledná rozměrová nepřesnost součásti.



Obrázek 47 – Vytržená vlákna z vrstev modelu

Vláknitost

Vlákna extrudovaného materiálu způsobují na modelu tzv. pavučinu. Ta je vytvářena tažením vytékajícího zbytkového extrudovaného materiálu z trysky k místu započetí následující vrstvy. Příčinou může být příliš velká teplota extrudéru, kdy má extrudovaný materiál vyšší viskozitu a snadněji teče z trysky. Řešením by v tomto případě bylo snížení teploty extrudéru o maximálně 5 až 10 °C, razantnější snížení teploty by mělo za následek nedostatečné natavení materiálu. Dalším možným řešením je zpětné vytažení materiálu z extrudéru o několik milimetrů a tím přerušit zbytkovou extruzi. Některé softwary nabízejí možnosti zkrácení vzdálenosti přejezdů, zvýšení rychlosti přejezdů a tím snížení doby po kterou může zbytkový extrudovaný materiál vytékat. Druhou možností je nastavení drah trysky tak, aby přejezdy nebyly prováděny mimo objem součásti.



Obrázek 48 – Vlákňitost

4.4 Výrobní náklady

Jedním z důležitých faktorů Rapid Prototypingu je výrobní cena, kterou se snažíme právě díky 3D tisku nejvíce minimalizovat. Dnes je na trhu mnoho firem, které nabízejí FDM tisk na zakázku. Většinou se pohybuje cena okolo 100 Kč/h v závislosti na použitém materiálu a kvalitě tisku. Pro výpočet nákladů na zhotovení modelu proudového motoru FDM metodou byly brány v úvahu variabilní náklady na provoz 3D tiskárny a náklady na materiál. Ostatní činnosti jako příprava virtuálního modelu a postprocessing nebyly kalkulovány. Výrobní náklady jsou uvedeny v tabulce 18.

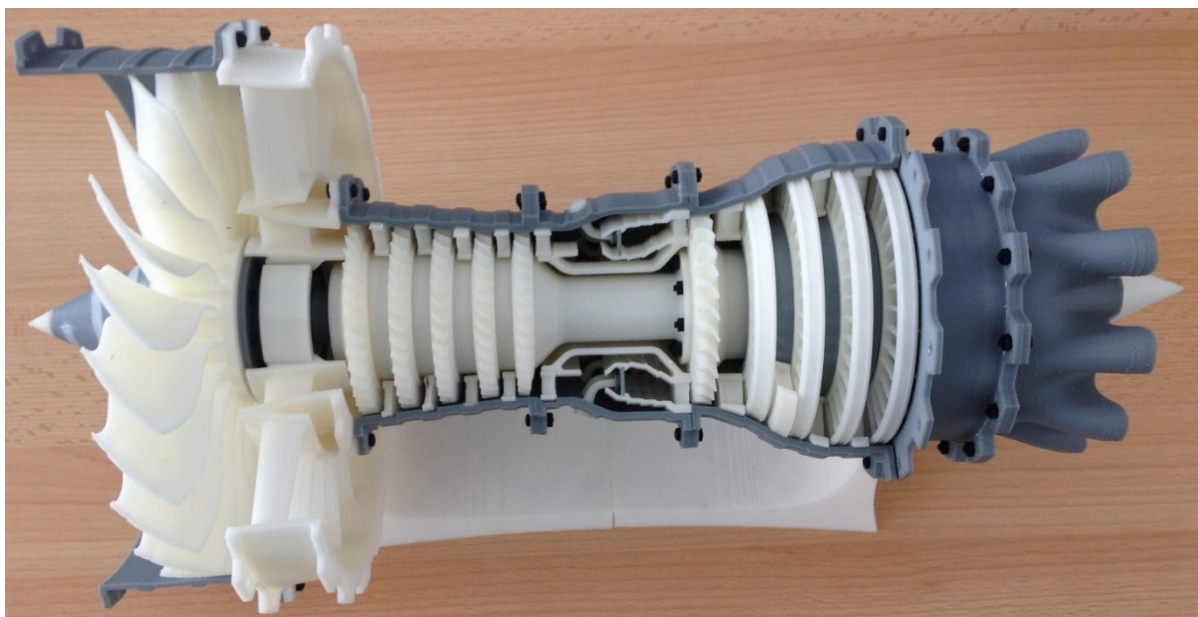
Tabulka 18 – Výrobní náklady na 3D tisk modelu

Náklad	Cena
Ceník	
Variabilní náklady na provoz tiskárny	1,33 Kč/min
Filament Z-ABS (800 g)	1,10 Kč/g (879 Kč)
Filament Z-ULTRAT (800 g)	1,62 Kč/g (1299 Kč)
Výpočet nákladů	
VN na provoz (1,33 Kč/min · 9019 min)	11 996 Kč
Z-ABS (481 g · 1,10 Kč/g)	530 Kč
Z-ULTRAT (757 g · 1,62 Kč/g)	1 227 Kč
Celkem	13 753 Kč

Tabulka 19 - Výpočet odpadového materiálu z raftů a podpor

Odpad	
Z-ABS (72 g · 1,10 Kč/g)	78 Kč
Z-ULTRAT (220 g · 1,62 Kč/g)	357 Kč
Celkem	435 Kč (25 % z ceny materiálu)

Náklady na 3D tisk modelu činí 13 753 Kč. Do výpočtu není zahrnuta doba přípravy virtuálních modelů a postprocesingu, která byla přes 5,5 hodiny. Významný je také poznatek, že odpadový materiál tvořený rafty a podporami tvoří přes 25 % z celkového spotřebovaného materiálu. Při tisku na zakázku by tak bylo výhodné uvažovat nad recyklací vzniklého zbytkového materiálu a jeho opětovným použitím při dalším tisku.

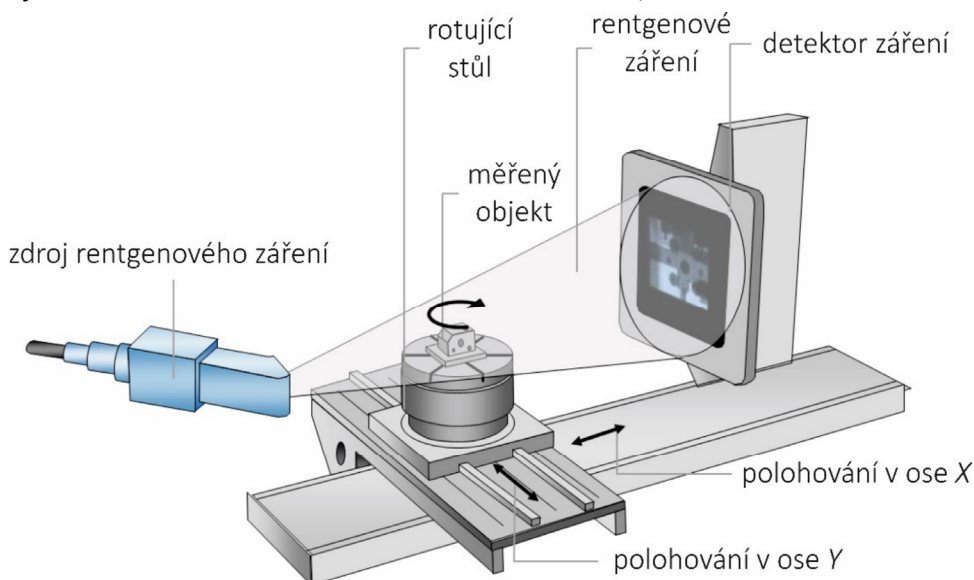


Obrázek 49 – Vytisknutý model proudového motoru

5 ROZMĚROVÁ KONTROLA MODELU

Rozměrová kontrola vybraných dílů a sestavy byla provedena komparací CAD modelu s vytištěným modelem naskenovaným pomocí průmyslové výpočetní tomografie. Výhodou oproti běžným metodám rozměrové kontroly (např. souřadnicové měřící stroje) je možnost překrytí, vyrovnaní obou modelů a zobrazení všech odchylek tvaru vytištěného dílu vzhledem ke CAD modelu.

K dispozici jsem měl průmyslový výpočetní tomograf Zeiss Metrotom 1500, který je určen pro měření a kontrolu součástí vyrobených z plastů nebo lehkých kovů. Schéma principu měření je zobrazeno na obrázku 50. Oproti tradiční souřadnicové technice zde mohou být měřeny i nedostupné povrchy a struktury bez nutnosti časově náročné destrukce. Průmyslovou tomografií lze využít nejen k nedestruktivnímu zkoušení a měření součástí, ale také k reverznímu inženýrství.



Obrázek 50 – Schéma průmyslové výpočetní tomografie ^[6]

5.1.1 Technické parametry

Tabulka 20 – Technické parametry tomografu Zeiss Metrotom 1500

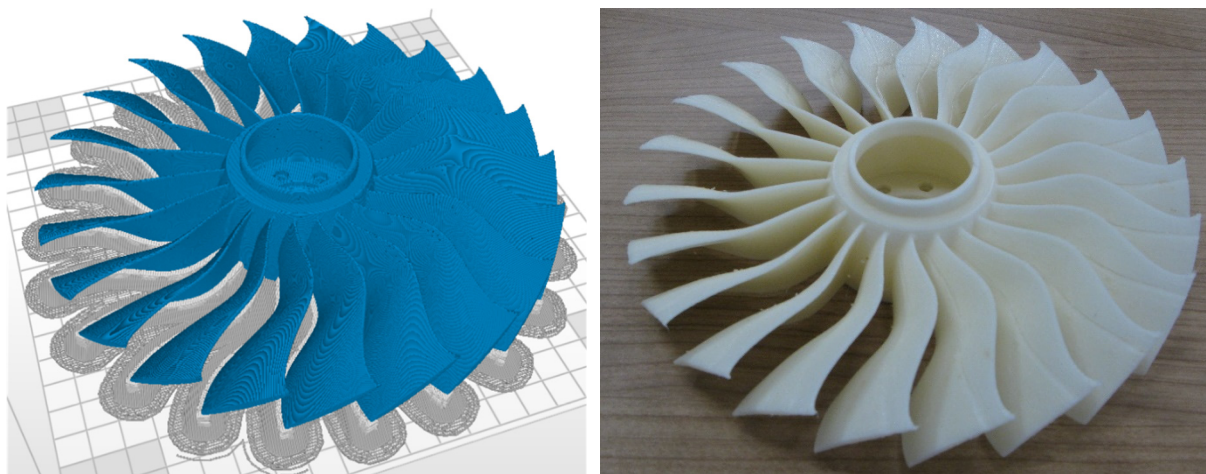
Parametry generátoru záření a detektoru	
Maximální napětí	225 kV
Maximální proud	3000 μ A
Maximální výkon	500 W
Minimální velikost ohniskové plochy	7 μ m
Rozlišení detektoru	2048 x 2048 pixelů
Velikost pixelu	200 x 200 μ m

Tabulka 21 – Technické parametry tomografu Zeiss Metrotom pokračování

Parametry měřené součásti	
Maximální rozměry	ø700 – 750 mm
	ø430 – 1100 mm
Maximální hmotnost	50 kg
Maximální penetrační tloušťka pro plasty	250 mm

5.2 Rozměrová kontrola dmychadla

První kontrolovanou součástí bylo dmychadlo (viz obrázek 51). To je objemově největší a tvarově nejsložitější součástí celého modelu motoru s dobou tisku přes 19 hodin. Dmychadlo se skládá z náboje a 22 lopatek, které mají v některých místech úhel sklonu až 60° . Přesto byla součást tisknuta bez použití podpor z důvodů úspory materiálu, doby tisku a nákladů.



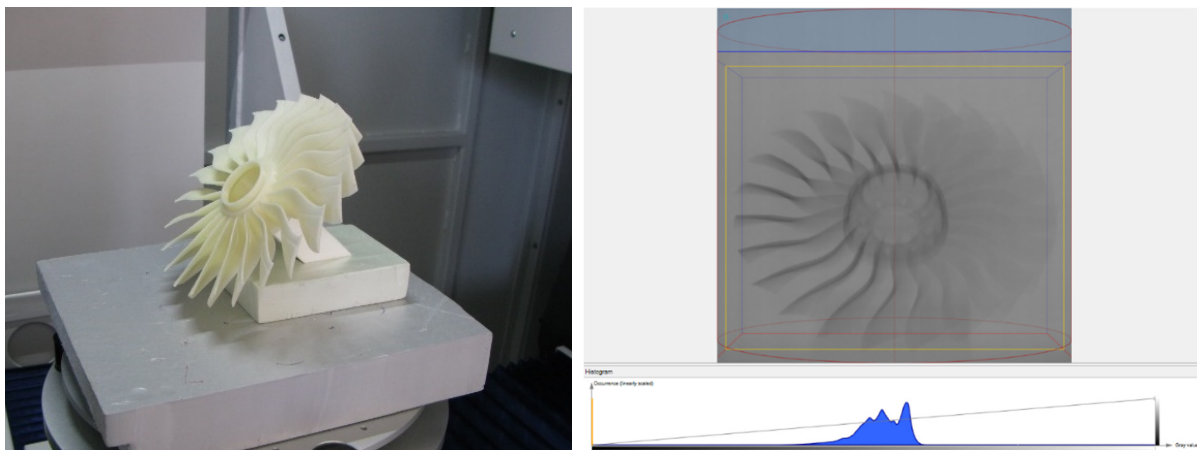
Obrázek 51 – Dmychadlo

Příprava měření dmychadla

Dmychadlo bylo umístěno do snímkovacího prostoru tomografu ve stojánek tak, aby nevznikaly vodorovné plochy, které by mohly způsobovat odchylování rentgenového záření od původního směru (viz obrázek 52 vlevo). Stojánek je z materiálu s nižší absorpcí rentgenového záření než samotné dmychadlo z důvodu snadnějšího odfiltrování z výsledného 3D snímku. V softwaru tomografu došlo k vytvoření virtuálního kvádrů okolo skenované součásti, který vymezuje skenovaný prostor, a tím se snižuje doba skenování a vnesený šum (viz obrázek 52 vpravo). Dále bylo nutné nastavení parametrů generátoru záření pro plastový materiál Z-ULTRAT (viz tabulka 22).

Tabulka 22 – Nastavené parametry generátoru záření a detektoru pro měření dmyhadla

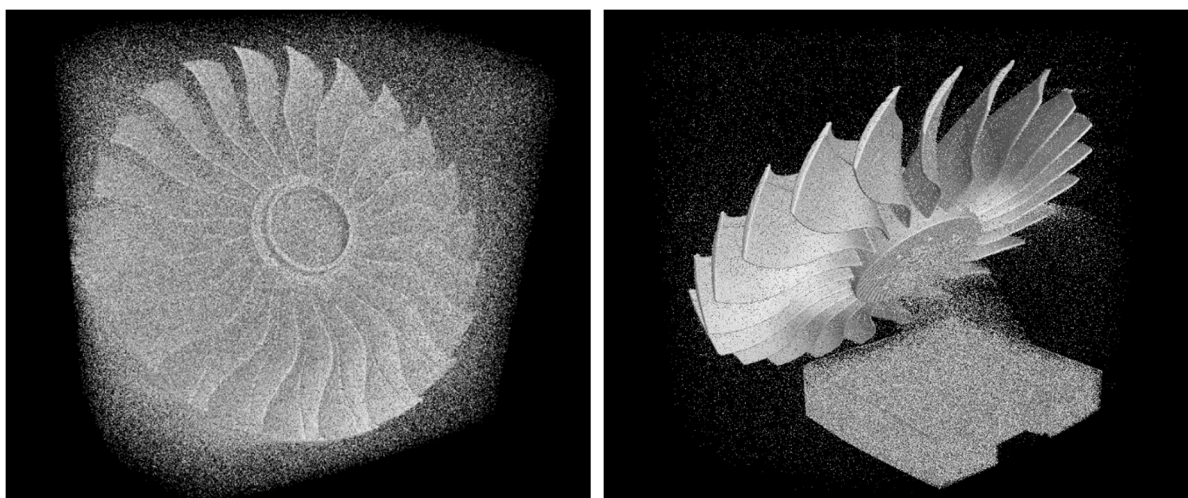
Nastavené parametry generátoru záření	
Napětí	180 kV
Proud	1033 μ A
Externí filtr	Cu 0,50 mm



Obrázek 52 – Umístění dmyhadla v tomografu

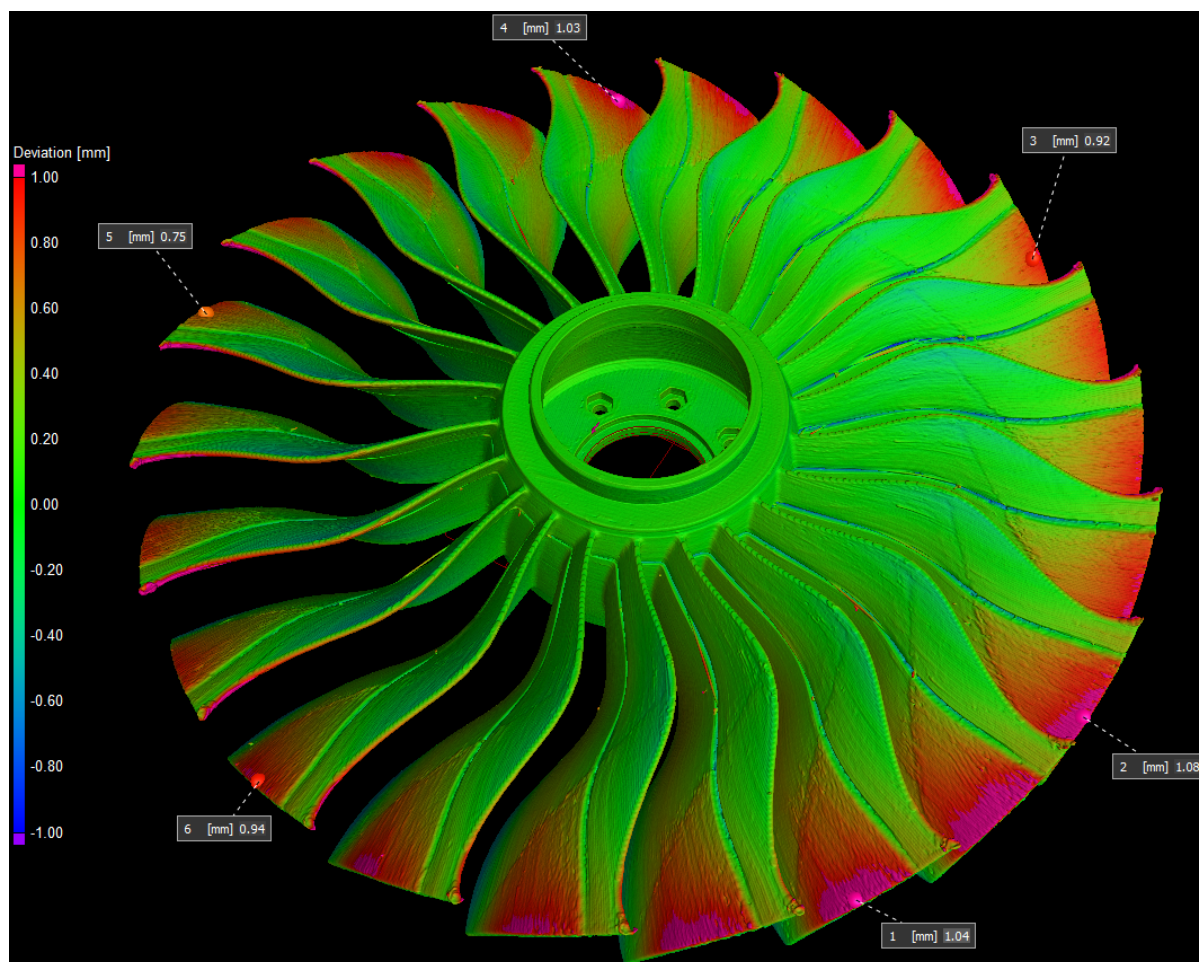
Vyhodnocení rozměrového měření dmyhadla

Následné vyhodnocování CT scanu bylo prováděno v softwaru VG Studio Max. Do programu byla importována data zaznamenaná tomografem, tzv. mrak bodů (viz obrázek 53 vlevo), který představuje námi vymezený skenovaný prostor. Dále bylo nutné provést výpočet stanovení povrchu, při kterém došlo k odfiltrování bodů ve volném prostoru, bodů materiálu stojánku a bodů šumu. Částečně filtrovaný 3D scan modelu s částí stojánku je zobrazený na obrázku 53 vpravo.

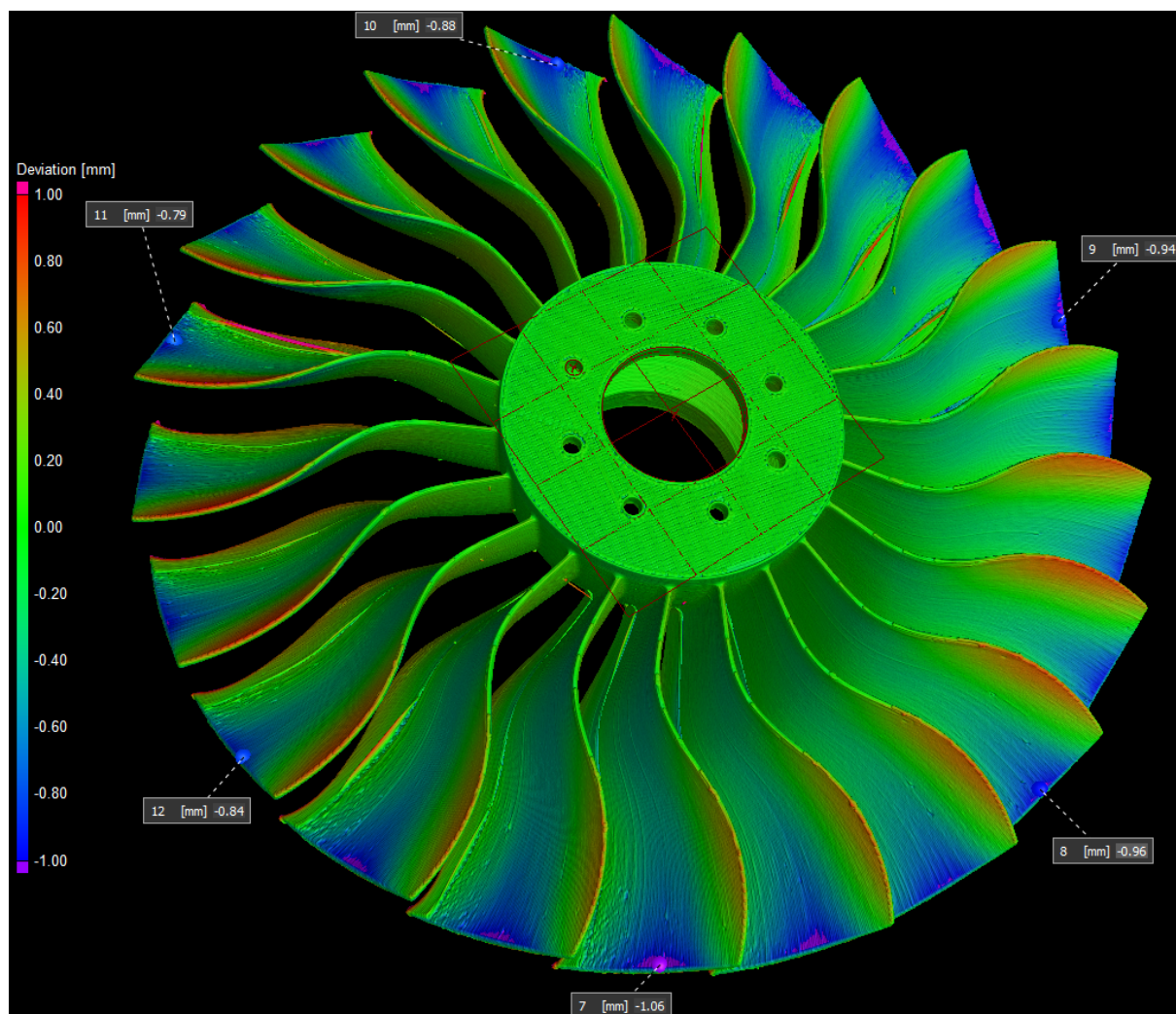


Obrázek 53 – Mrak bodů ze snímkování dmyhadla a jeho filtrace

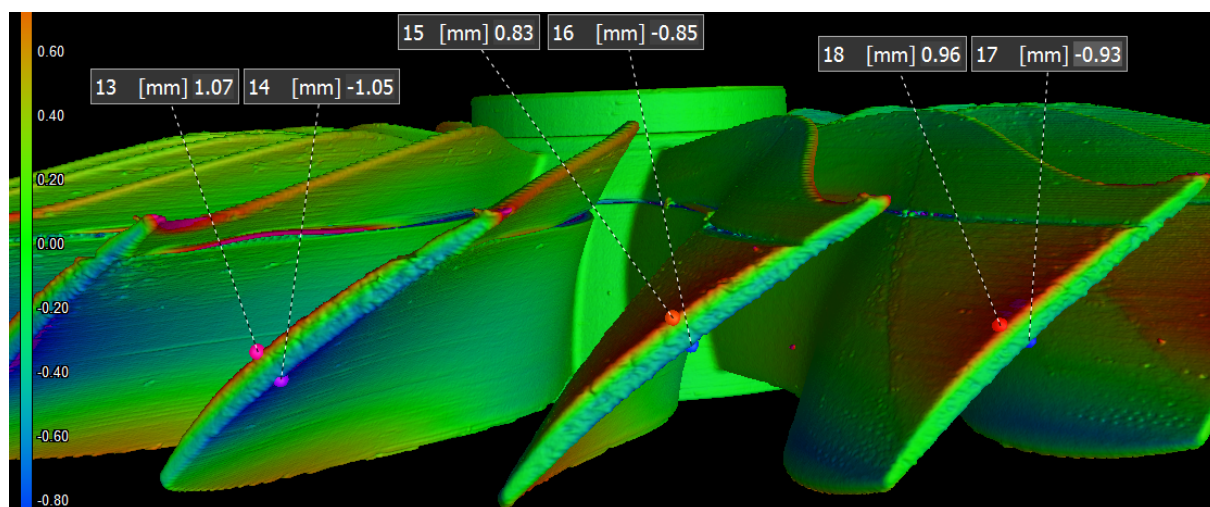
Vytvořený scan modelu dmychadla, po finální filtraci, tak mohl být porovnán s předlohovým CAD modelem. Nejprve byl CAD model importován k nascanovanému modelu, kde byl zvolen stejný souřadný systém. Virtuální modely byly překryty a vyrovnány pomocí 3 prvků. Rovina XY byla stanovena osou rotace součásti, osa Z byla zablokována rovinou spodní plochy náboje a pootočení bylo dáno osou jednoho otvoru pro šroubek. U takto překrytých součástí byla provedena analýza rozměrů zobrazená na obrázcích 54 až 56. Zvolený rozsah odchylek, který je znázorněn barevně činí 2 mm (resp. $-1\text{ mm} \div 1\text{ mm}$). Spektrum barev od zelené k červené značí přebytek materiálu na vyrobené součásti, spektrum barev od zelené k modré značí naopak nedostatek materiálu vzhledem ke CAD modelu.



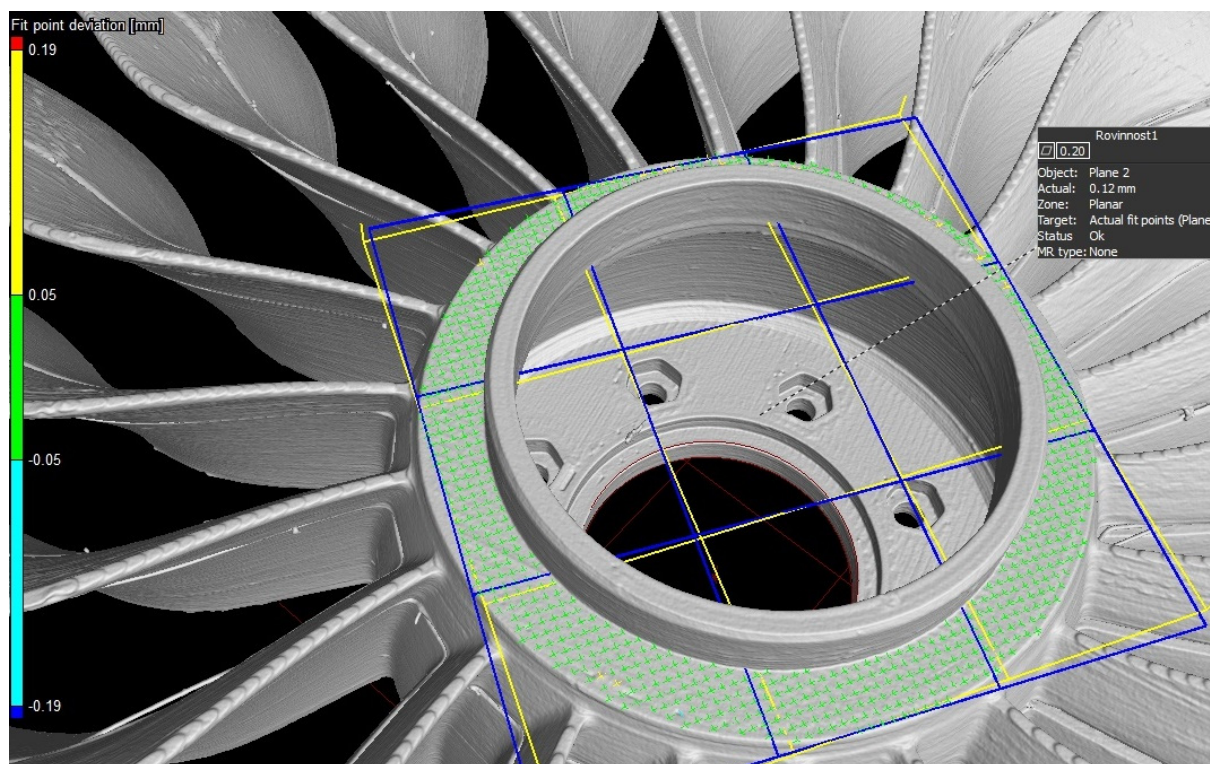
Obrázek 54 – Rozměrová analýza horní části dmychadla



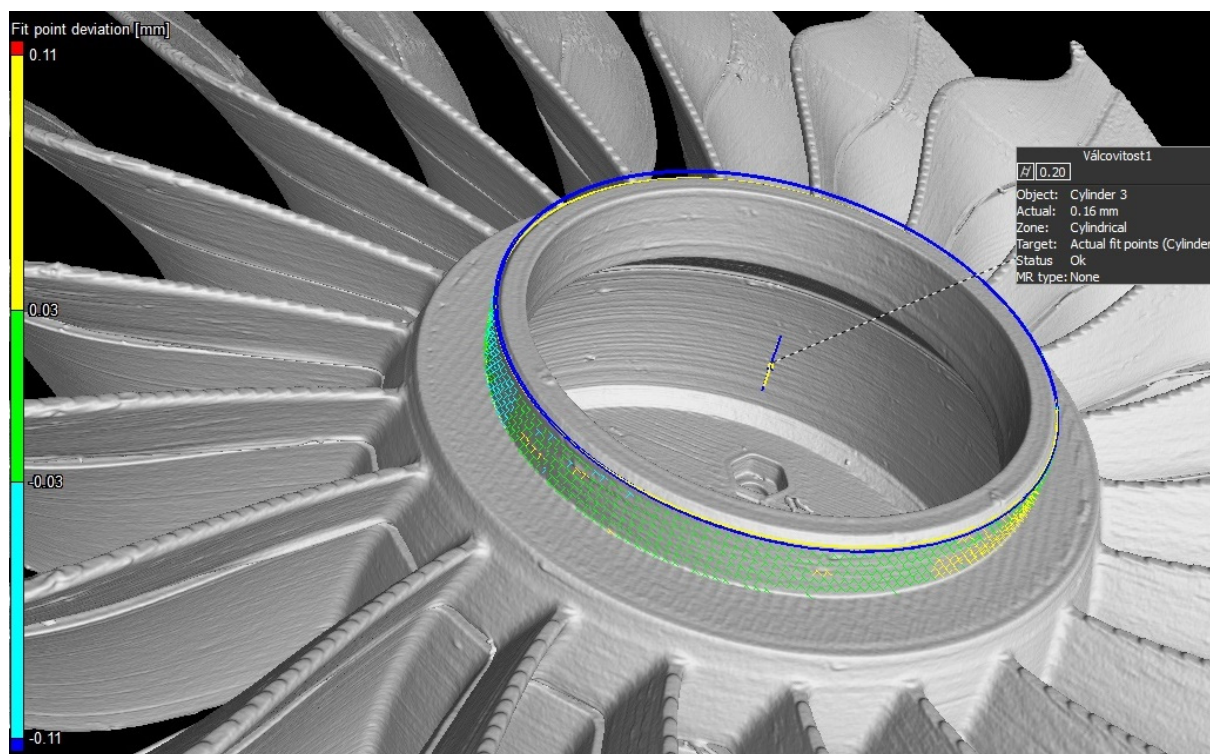
Obrázek 55 – Rozměrová analýza spodní části dmychadla



Obrázek 56 – Odchytky horní a spodní části lopatek



Obrázek 57 – Vyhodnocení rovinnosti horní plochy náboje dmychadla



Obrázek 58 – Vyhodnocení válcovitosti horní části náboje dmychadla

Výsledek rozměrového měření dmychadla

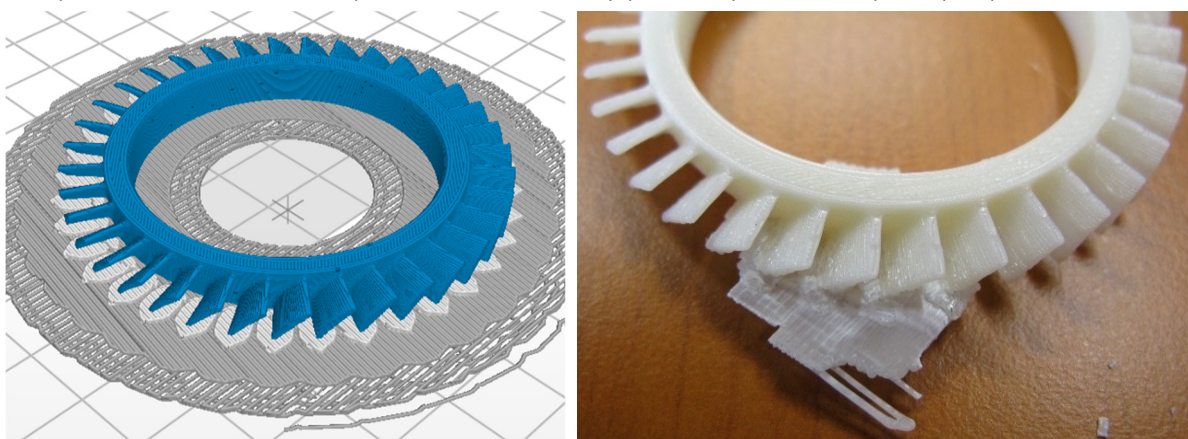
Tabulka 23 – Výsledky rozměrového měření dmychadla

Maximální rozměrová odchylka horní části (viz obrázek 54)	1,08 mm
Maximální rozměrová odchylka spodní části (viz obrázek 55)	-1,06 mm
Hodnota rovinnosti horní plochy náboje (viz obrázek 57)	0,12 mm
Hodnota válcovitosti horní části náboje (viz obrázek 58)	0,16 mm

Z rozměrového měření je zřejmé, že největší odchylky od původního tvaru se nacházejí na konci lopatek přibližně v jejich polovině výšky. Rozměrové odchylky horní a spodní části jsou na shodných lopatkách přibližně stejné, ale opačné orientace (viz obrázek 56). To znamená, že se nejedná o problém tisku ve smyslu nanesení menšího nebo většího množství extrudovaného materiálu, ale pravděpodobně jde o ohyb součásti. Dmychadlo má relativně velkou plochu s malou tloušťkou stěn, především u částí lopatek, které jsou v některých místech tisknuty pod úhlem sklonu až 60° . Tím se stávají kritickým místem pro nerovnoměrné chladnutí a následný ohyb. Analýza rozměrů potvrzuje, že takřka u všech lopatek došlo k vyboulení a změně tvaru. U samotného náboje dmychadla, který byl tisknut převážně v 0° sklonu, byla vyhodnocena relativně malá odchylka válcovitosti $0,16\text{ mm}$. Vyhodnocená odchylka rovinnosti $0,12\text{ mm}$ byla nižší, než je tloušťka jedné vrstvy.

5.3 Rozměrová kontrola lopatkového kola

Druhou součástí, která byla podrobena rozměrové kontrole, je lopatkové kolo vysokotlakého kompresoru stupně 5 zobrazené na obrázku 59. Tento méně rozměrný díl byl tisknut najednou spolu s některými dalšími součástmi, doba tisku samotného dílu je přibližně 1 hodina. Součást je tvořena 36 lopatkami s úhlem sklonu přibližně 45° , které byly tisknuty také bez využití podpor.



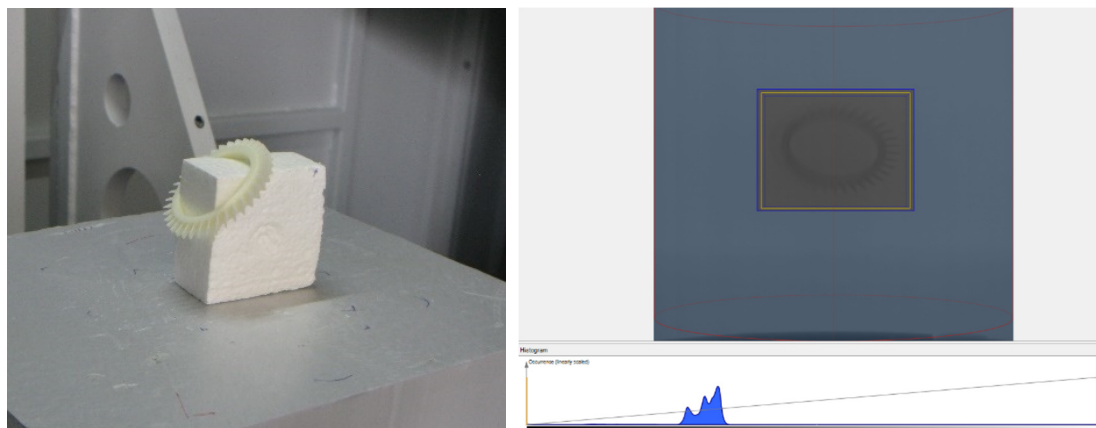
Obrázek 59 – Lopatkové kolo vysokotlakého kompresoru stupně 5

Příprava měření vysokotlakého kompresoru

Analogicky, jako u předchozí součásti, byl i tento díl umístěn do snímkovací komory ve stojánku pod úhlem (viz obrázek 60 vlevo). V softwaru tomografu byl vytvořen virtuální kvádr co nejtěsněji okolo skenované součásti (viz obrázek 60 vpravo). Protože je díl ze stejného materiálu jako předchozí součást (Z-ULTRAT), byla ponechána hodnota napětí z předchozího měření a pouze došlo k upravení hodnoty proudu vzhledem k velikosti součásti (viz tabulka 24).

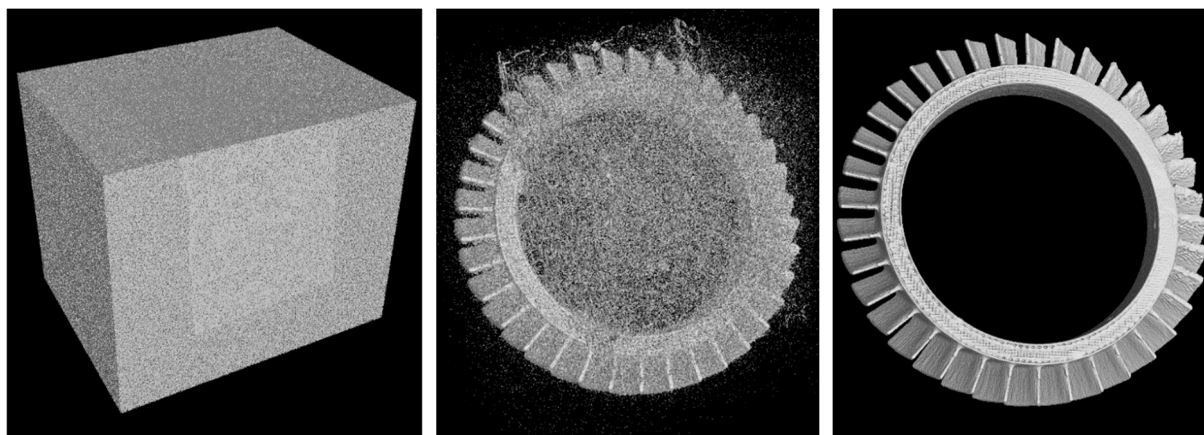
Tabulka 24 – Nastavené parametry generátoru záření a detektoru pro měření lopatkového kola

Nastavené parametry generátoru záření	
Napětí	180 kV
Proud	746 μ A
Externí filtr	Cu 0,50 mm



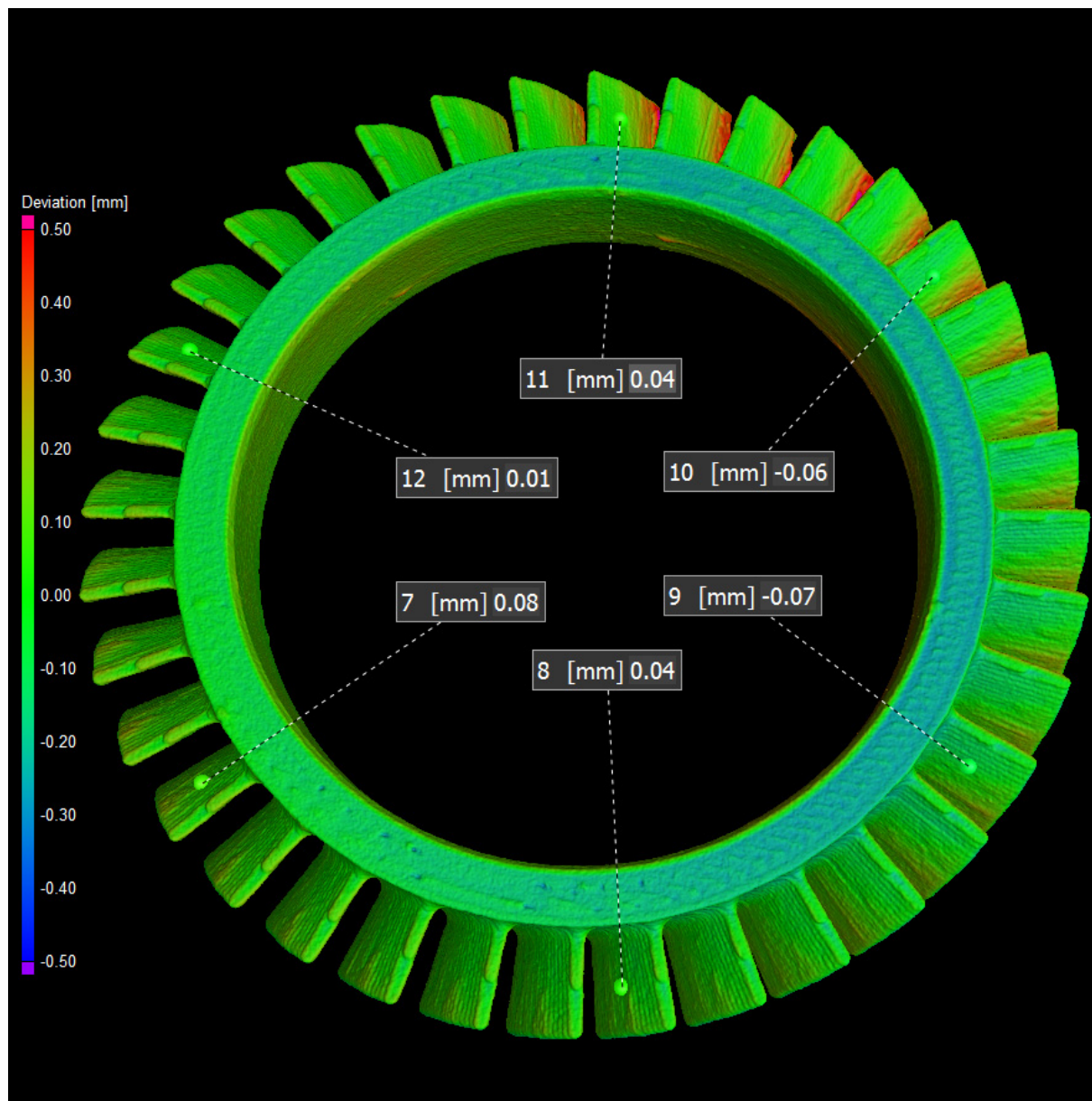
Obrázek 60 – Umístění lopatkového kola

Vyhodnocení rozměrového měření lopatkového kola

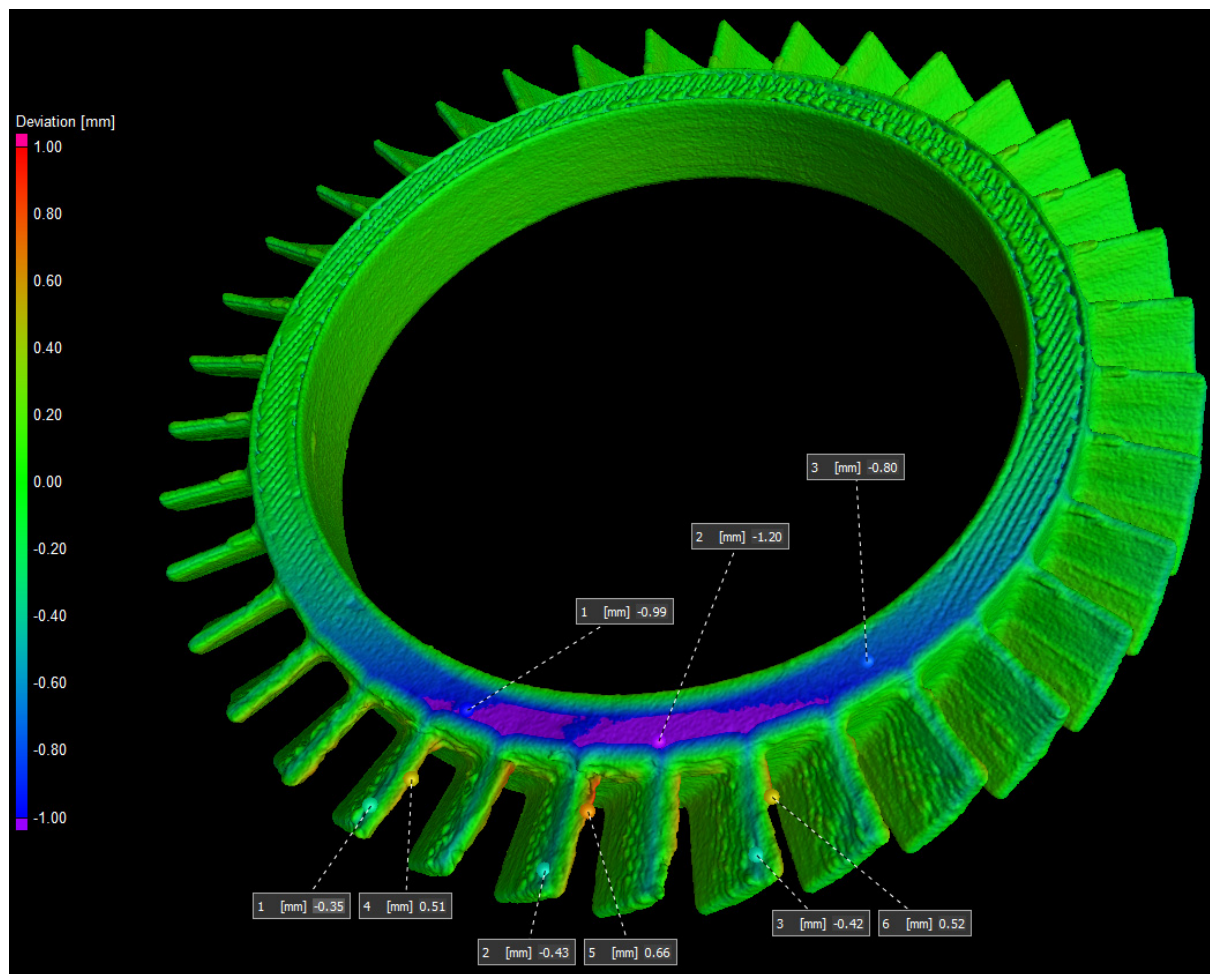


Obrázek 61 – Mrak bodů ze snímkování lopatkového kola a jeho filtrace

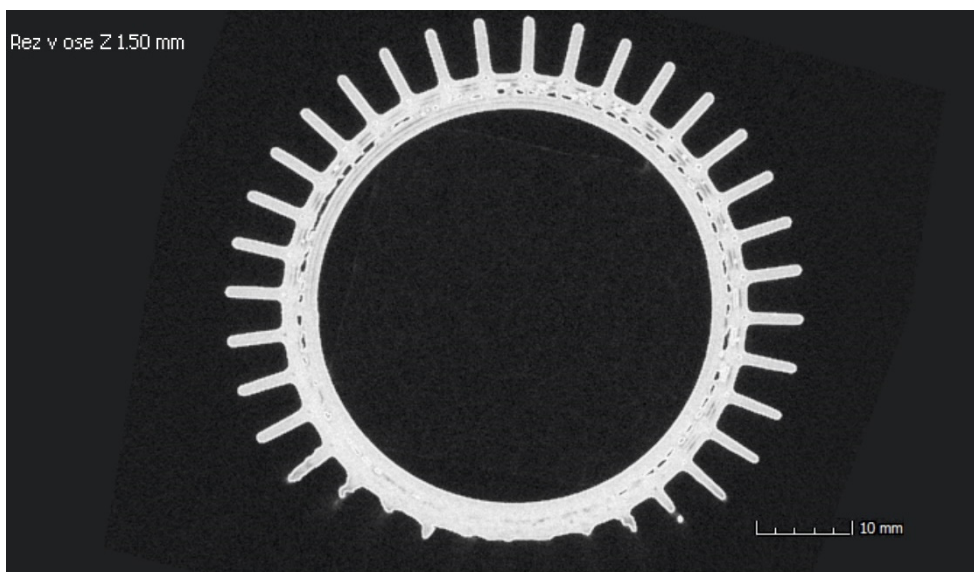
Vytvořený scan modelu lopatkového kola byl porovnán s předlohovým CAD modelem. Po zvolení stejného souřadného systému byly virtuální modely překryty a vyrovnány pomocí funkce best-fit, kdy software sám určil nejvhodnější polohu obou virtuálních modelů. Funkce best-fit byla využita díky lepšímu řešení pootočení součástí vůči sobě, než by tomu bylo při vlastním vyrovnání. Vyrovnané součásti dále prošly analýzou rozměrů (viz obrázek 62 a 63). Zvolený rozsah odchylek, který je znázorněn barevně činí pro horní část lopatkového kola 1 mm ($-0,5\text{ mm} \div 0,5\text{ mm}$) a pro spodní část 2 mm ($-1\text{ mm} \div 1\text{ mm}$).



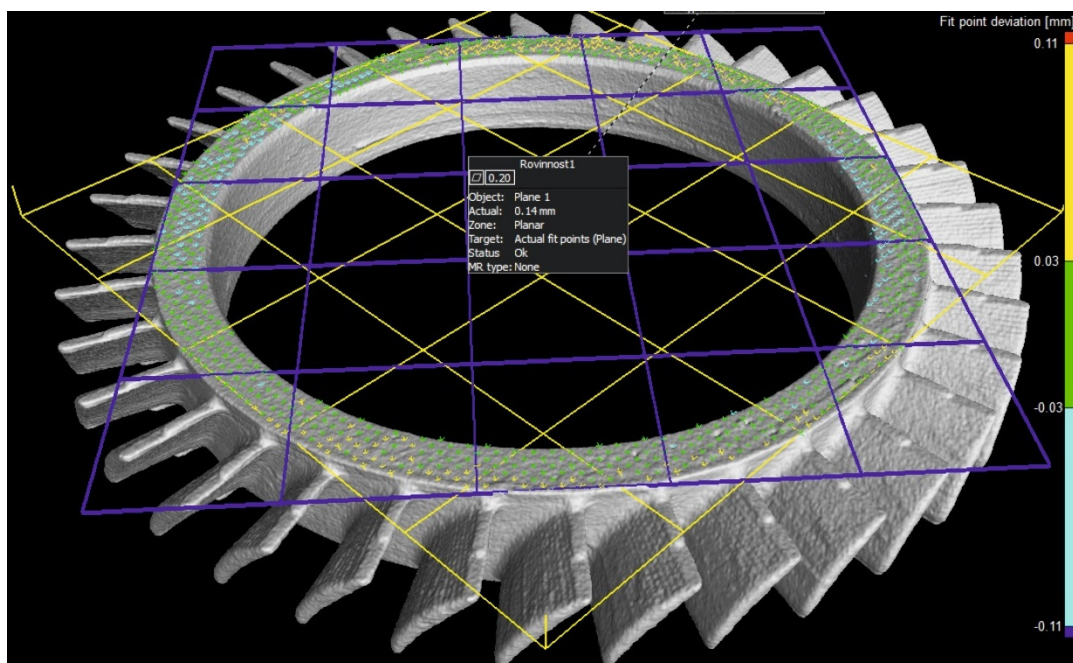
Obrázek 62 – Rozměrová analýza horní části lopatkového kola



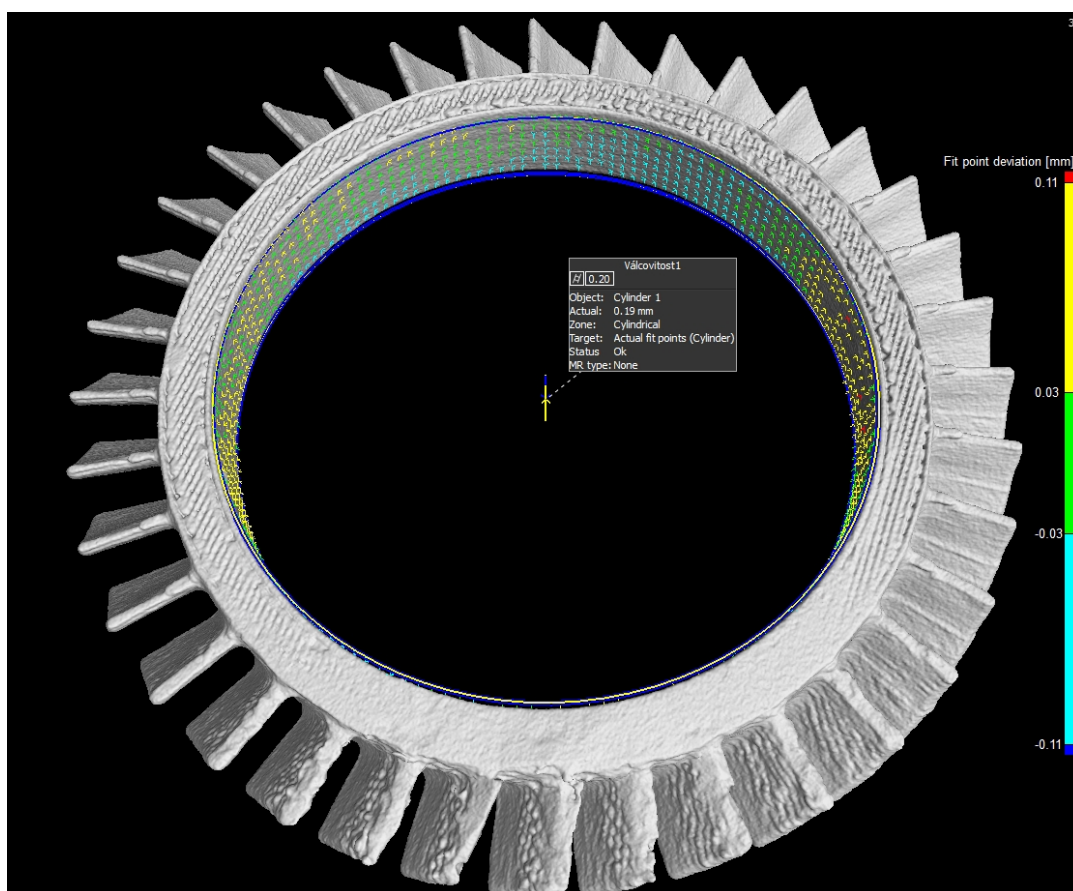
Obrázek 63 – Rozměřová analýza spodní části lopatkového kola



Obrázek 64 – Řez součástí v kritické oblasti vady tisku



Obrázek 65 – Vyhodnocení rovinnosti horní plochy lopatkového kola



Obrázek 66 – Vyhodnocení válcovitosti otvoru lopatkového kola

Výsledek rozměrového měření lopatkového kola

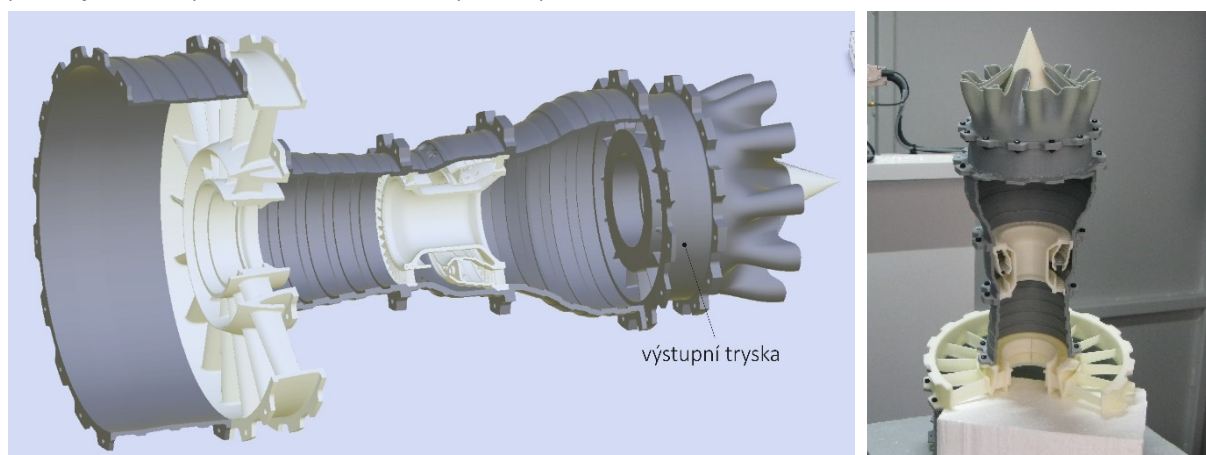
Tabulka 25 – Výsledky rozměrového měření lopatkového kola

Maximální rozměrová odchylka horní části (viz obrázek 62)	-0,21
Maximální rozměrová odchylka spodní části (viz obrázek 63)	-1,20 mm
Hodnota rovinnosti horní plochy (viz obrázek 65)	0,14 mm
Hodnota válcovitost otvoru (viz obrázek 66)	0,19 mm

Rozměrová kontrola lopatkového kola, u kterého byla pozorována vada nadměrného spojení s raftem, prokázala, že příčinou vzniku vady byl ohyb rohu raftu běh tisku. To mělo za následek přiblížení tiskové trysky k raftu v dané části a zmiňované nadměrné spojení. V místech ohybu raftu je celková výška součásti o více než $1,2\text{ mm}$ nižší než CAD model. Jelikož tryska tiskne jednotlivé vrstvy v předem dané výšce nehledě na vady tisku, neměl ohyb zásadní vliv na výslednou hodnotu rovinnosti horní plochy, která je menší než tloušťka jedné vrstvy. Následkem menší vůle mezi tryskou a povrchem bylo vytlačování většího množství extrudátu do boků, kolmo k tiskové dráze. To je nejvíce patrné na částech lopatek a vnější ploše prstence. Lopatky, které nebyly ovlivněny vadou tisku, měly relativně malou rozměrovou odchylku. Přestože byly lopatky tisknuty pod úhlem přibližně 45° , jejich poměr plochy vzhledem k tloušťce nebyl kritický pro vznik ohybu.

5.4 Rozměrová kontrola sestavy

Závěrečná rozměrová kontrola byla provedena na sestavě vnějšího obalu proudového motoru zobrazeného na obrázku 67. Zvolen byl pouze vnější obal motoru, protože při montáži by bylo takřka nemožné natočit všechna lopatková kola a rotační součásti tak, jako v CAD modelu. U jednotlivých lopatek by proto nemohlo dojít k překrytí a vyrovnání. Obal motoru má jednoznačně definovanou pozici jednotlivých dílů, takže mohl být komparován s CAD modelem.



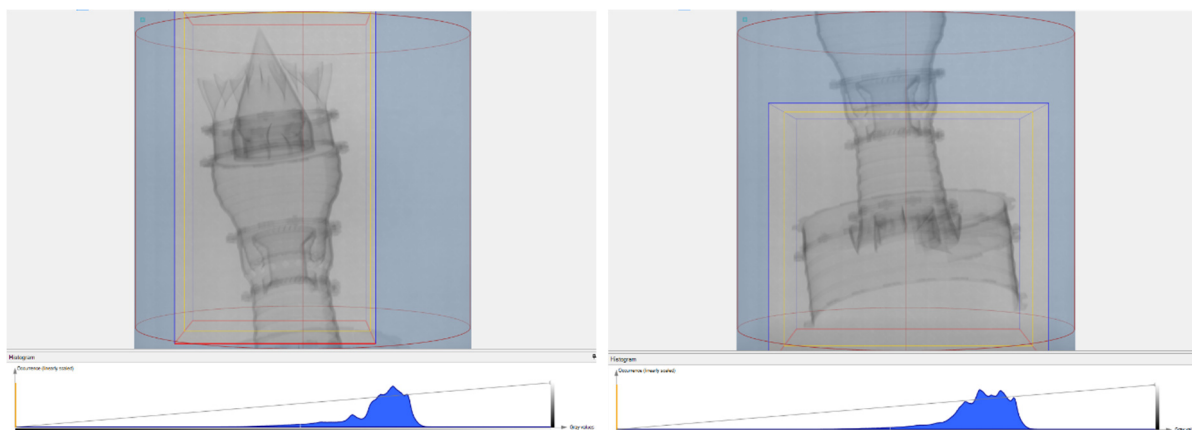
Obrázek 67 – Sestava obalu proudového motoru

Příprava měření sestavy

Umístění sestavy do snímkovacího prostoru tomografu je znázorněno na obrázku 67 vpravo. Zvolena byla poloha na výšce pro zajištění co nejmenší penetrační tloušťky (tloušťky ve směru záření) s cílem dosažení nejvyšší kvality snímků. Také z tohoto důvodu bylo snímkování rozděleno na dvě části (viz obrázek 68). Nejprve proběhlo snímkování horní části sestavy, následně spodní části a poté software automaticky obě části spojil do jednoho výsledného virtuálního modelu. Pro sestavu byly nastaveny nové parametry generátoru záření uvedené v tabulce 26.

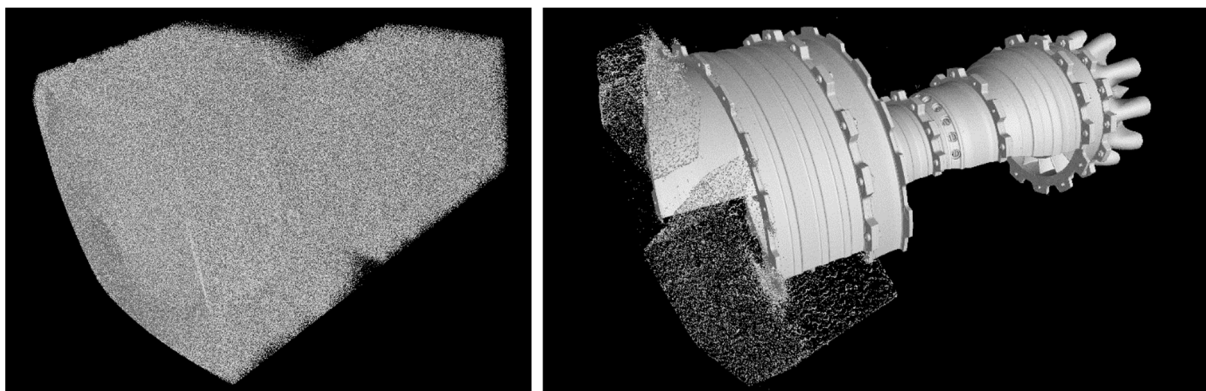
Tabulka 26 – Nastavené parametry generátoru záření a detektoru pro měření sestavy

Nastavené parametry generátoru záření	
Napětí	190 kV
Proud	2625 μ A
Externí filtr	Cu 1,00 mm



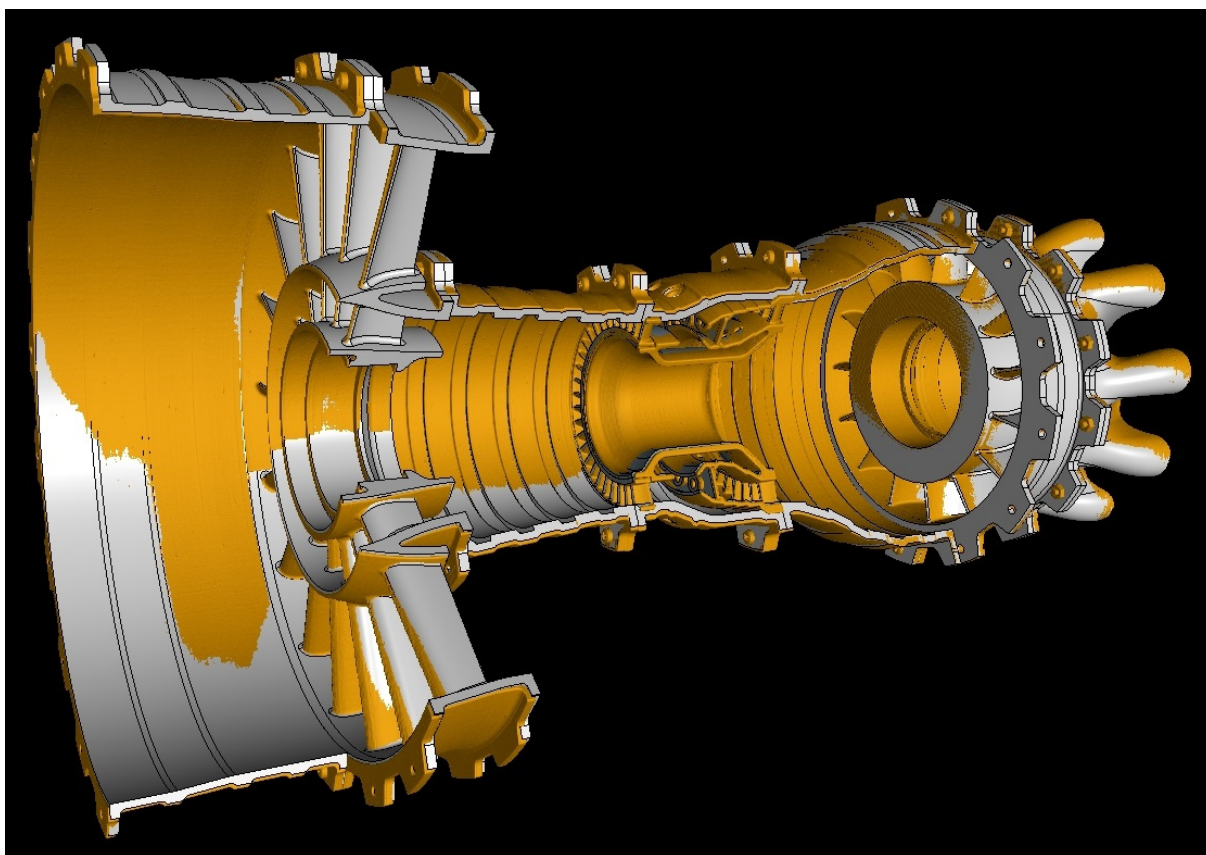
Obrázek 68 – Rozdělení snímkování sestavy

Vyhodnocení rozměrového měření sestavy

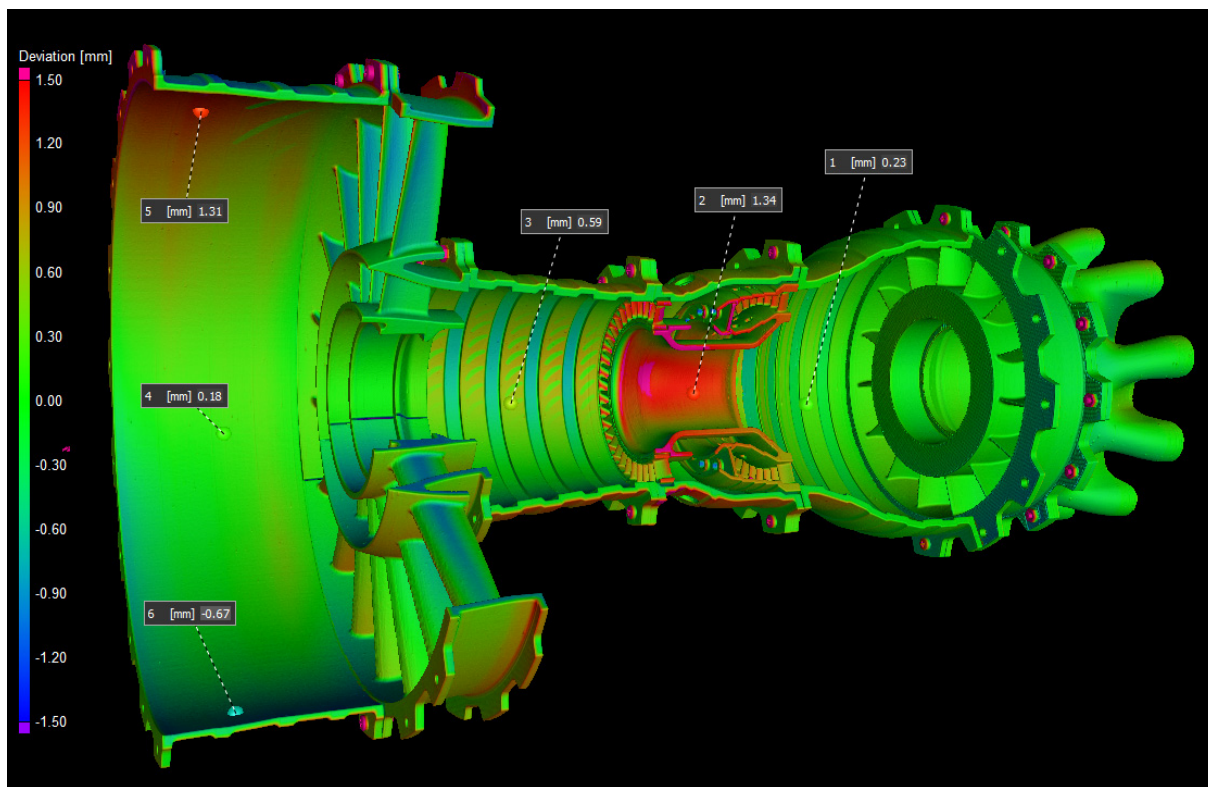


Obrázek 69 – Mrak bodů ze snímkování sestavy a jeho filtrace

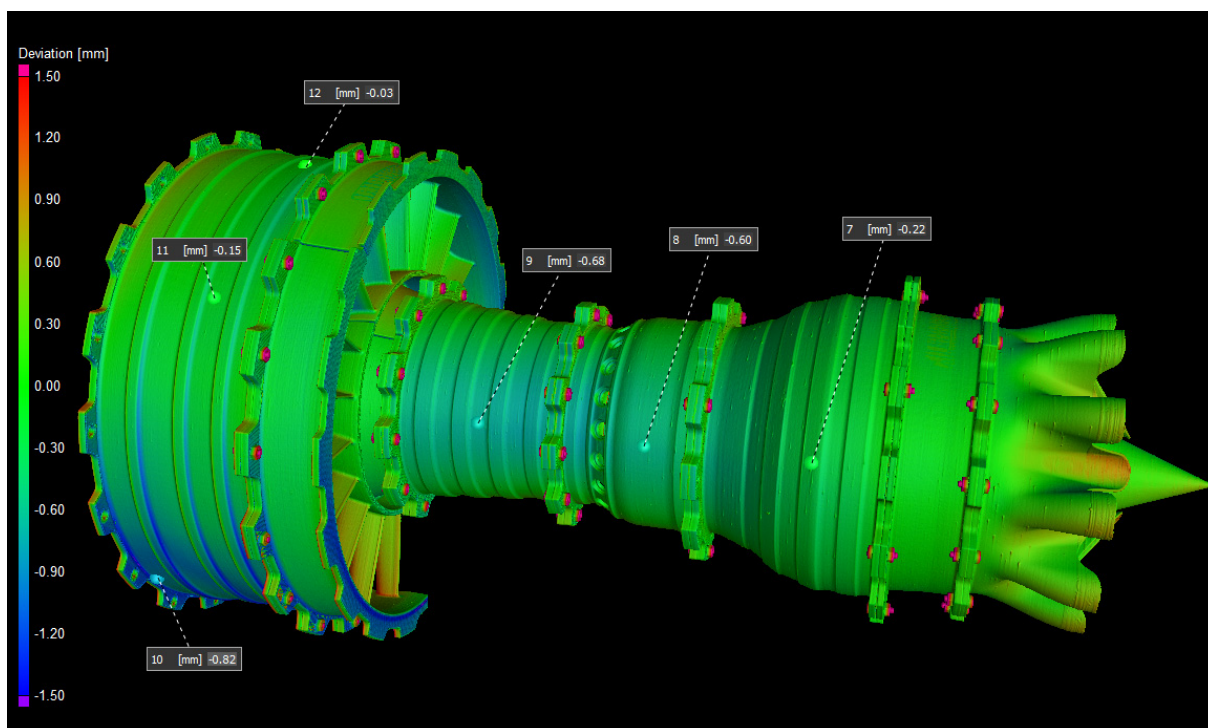
Nasnímaný model sestavy byl vyrovnán a překryt s CAD modelem prostřednictvím geometrie jednoho z dílů, přesněji pomocí výstupní trysky motoru označené na obrázku 67 vlevo. Opět jako v případě dmyhadla byly využity 3 prvky pro vytvoření pevné vazby. Rovina XY se stanovila osou rotace trysky, osa Z byla zablokována rovinou spodní plochy trysky a pootočení bylo dáno osou jednoho otvoru pro šroubek. Výsledek je ukázán na obrázku 70, CAD model šedý a scan modelu oranžový. Očekává se, že u takto překrytých virtuálních modelů budou nejmenší rozměrové odchylky právě v okolí trysky a směrem od tohoto dílu budou narůstat vlivem nepřesností tisku a montáž. Samotný výpočet rozměrové analýzy, který je znázorněn na obrázcích 71 až 74, trval více než 8 hodin. Barevně znázorněný rozsah odchylek byl nastaven na 3 mm ($-1,5\text{ mm} \div 1,5\text{ mm}$).



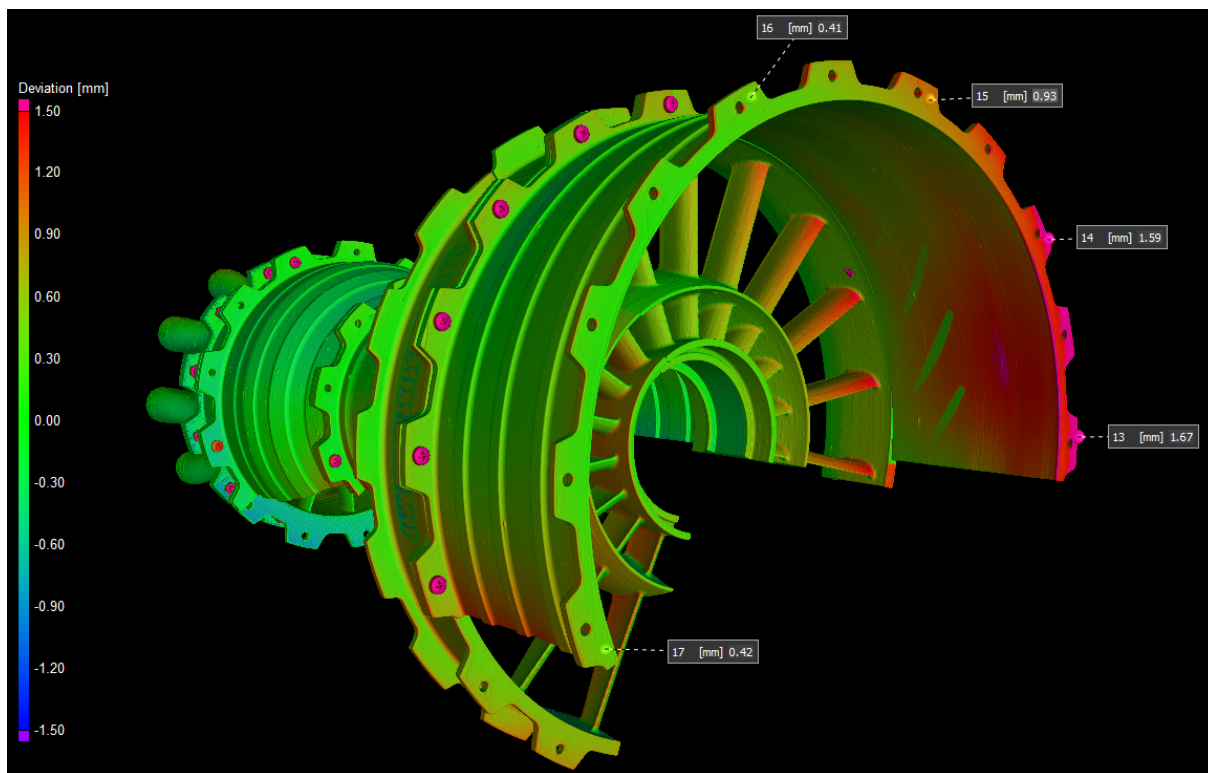
Obrázek 70 – Překrytí virtuálních modelů sestavy



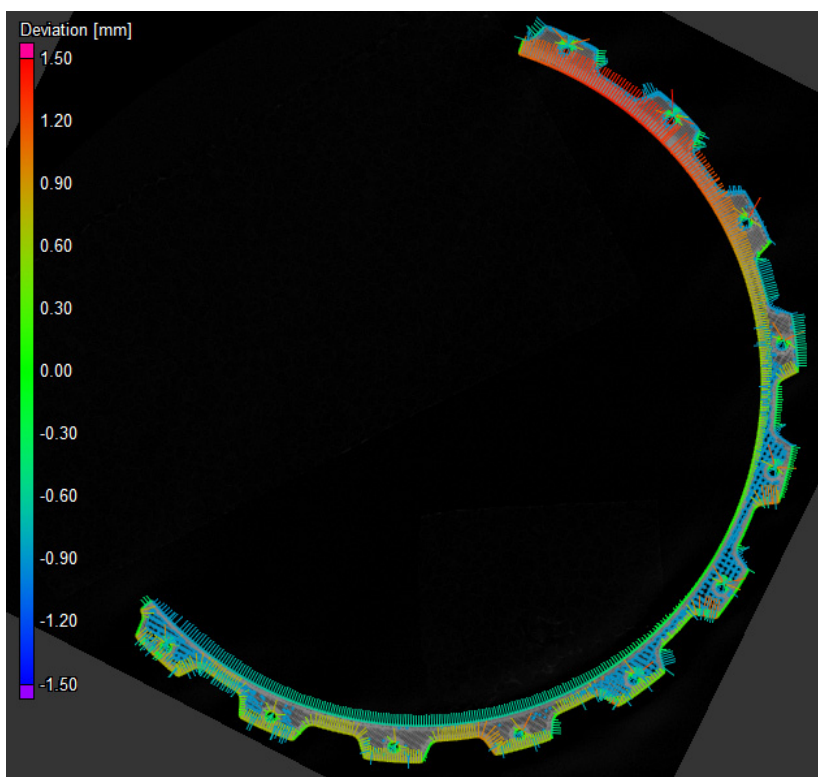
Obrázek 71 – Rozměrové odchylky vnitřní části sestavy



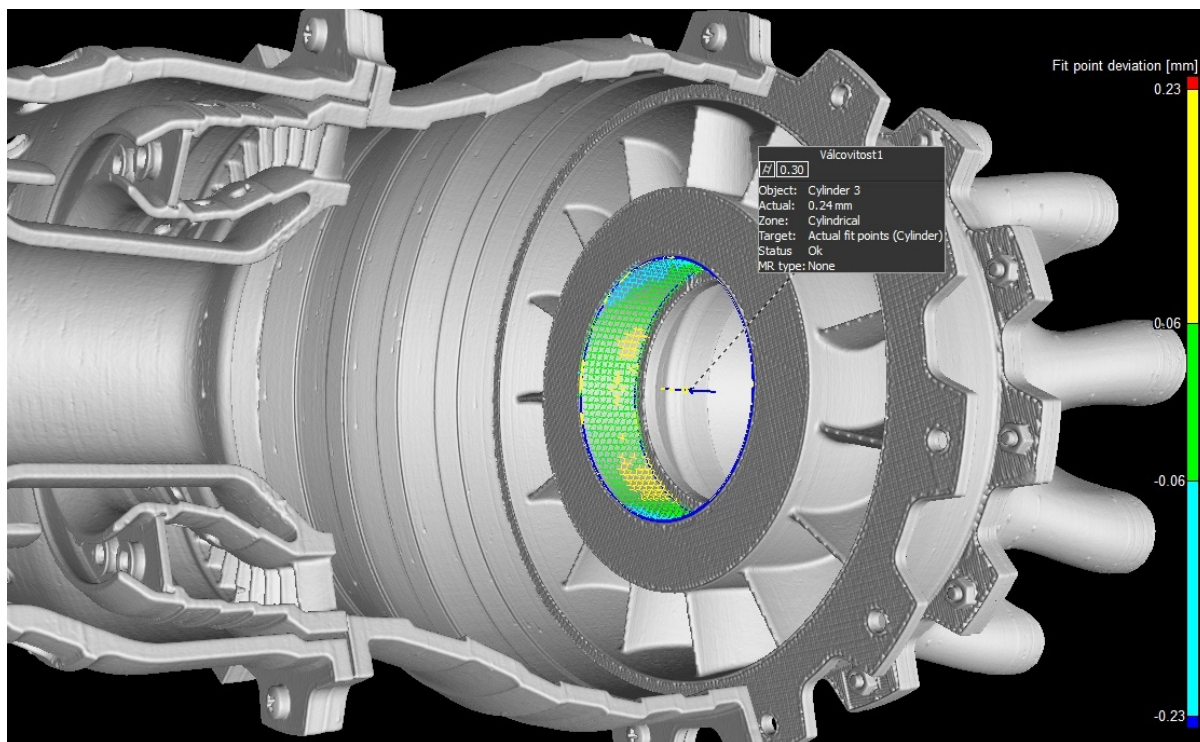
Obrázek 72 – Rozměrové odchylky vnější části sestavy



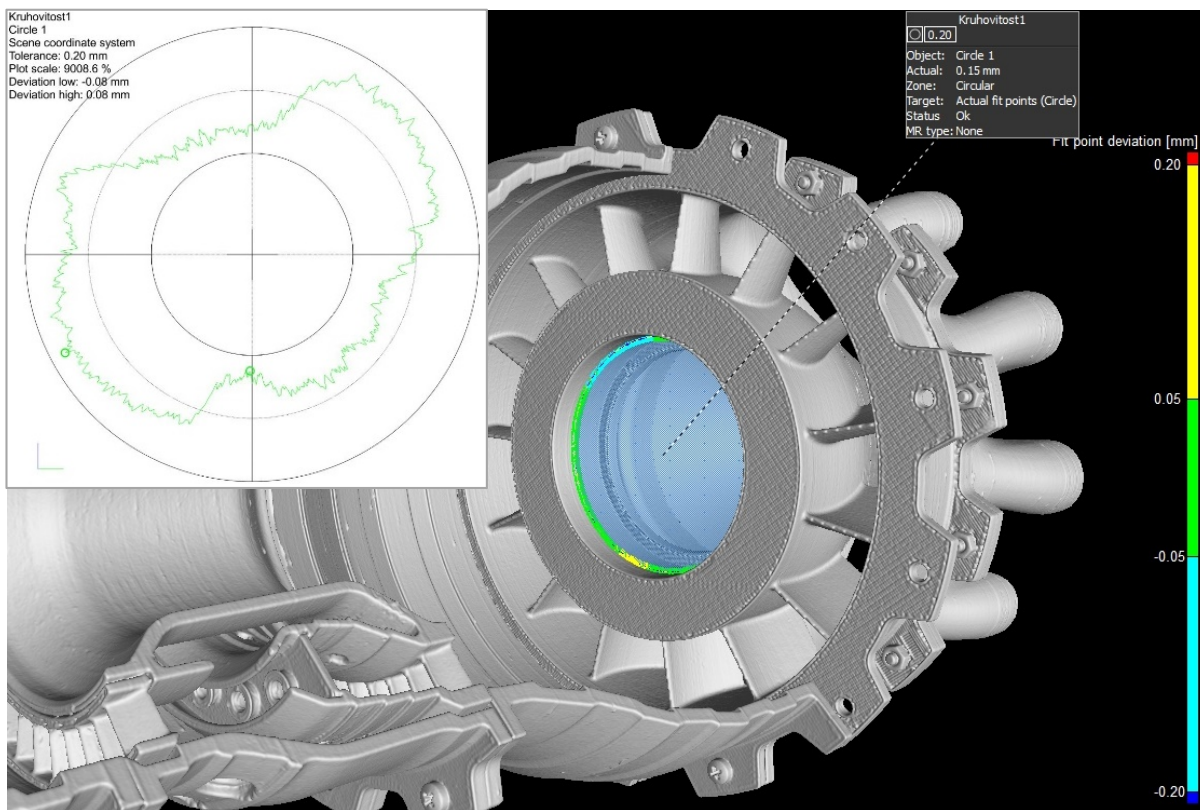
Obrázek 73 – Rozměrové odchylky přední části sestavy



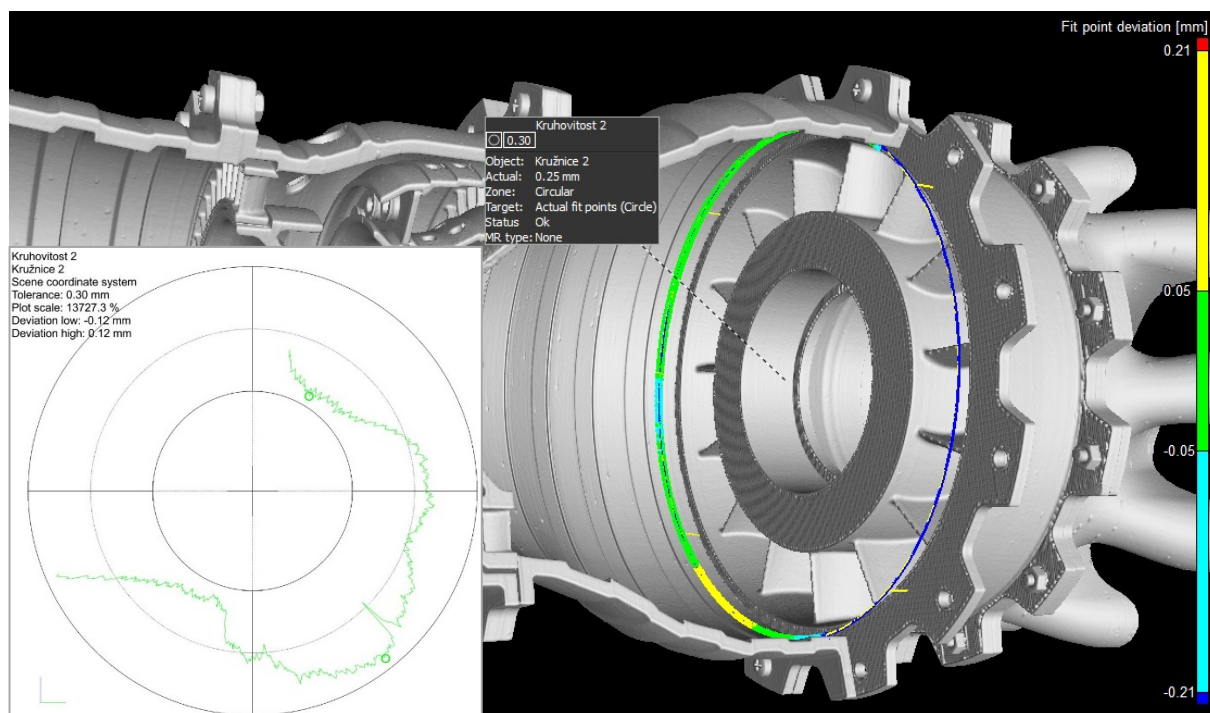
Obrázek 74 – Rozměrové odchylky řezu přední části sestavy



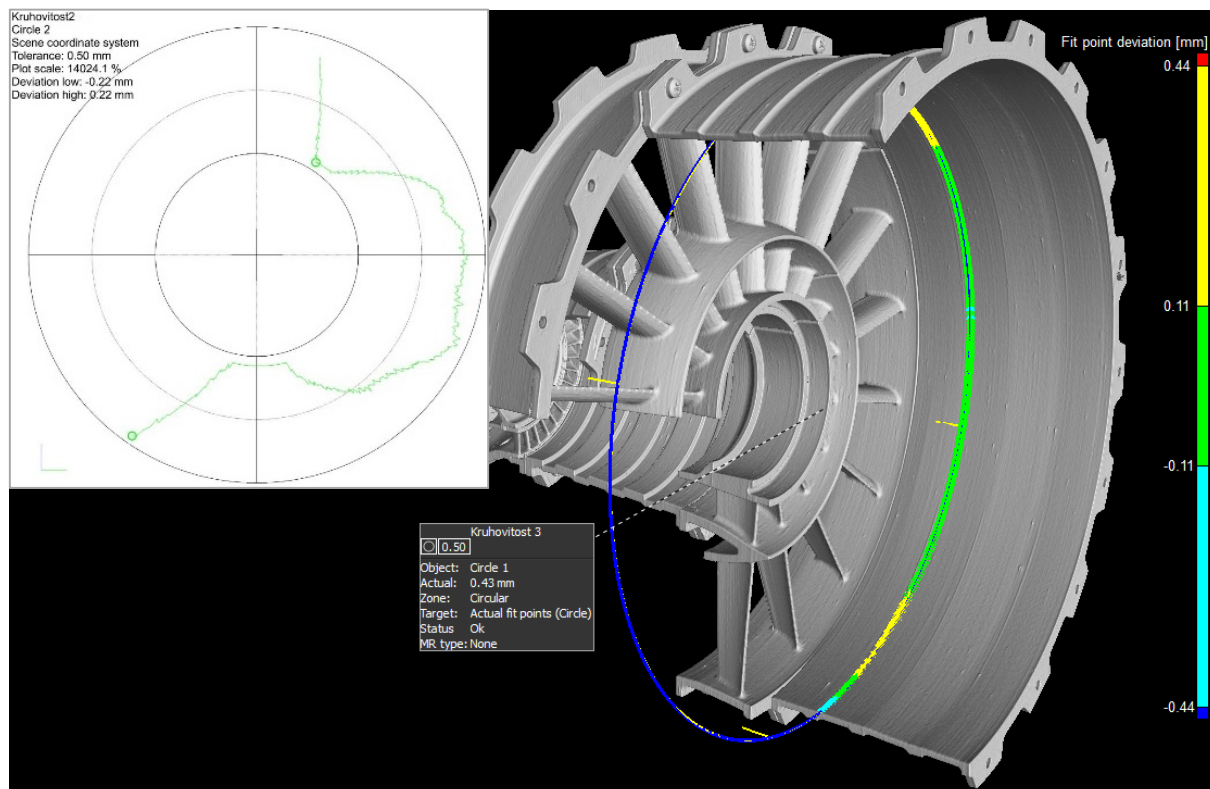
Obrázek 75 – Vyhodnocení válcovitosti náboje výstupní trysky



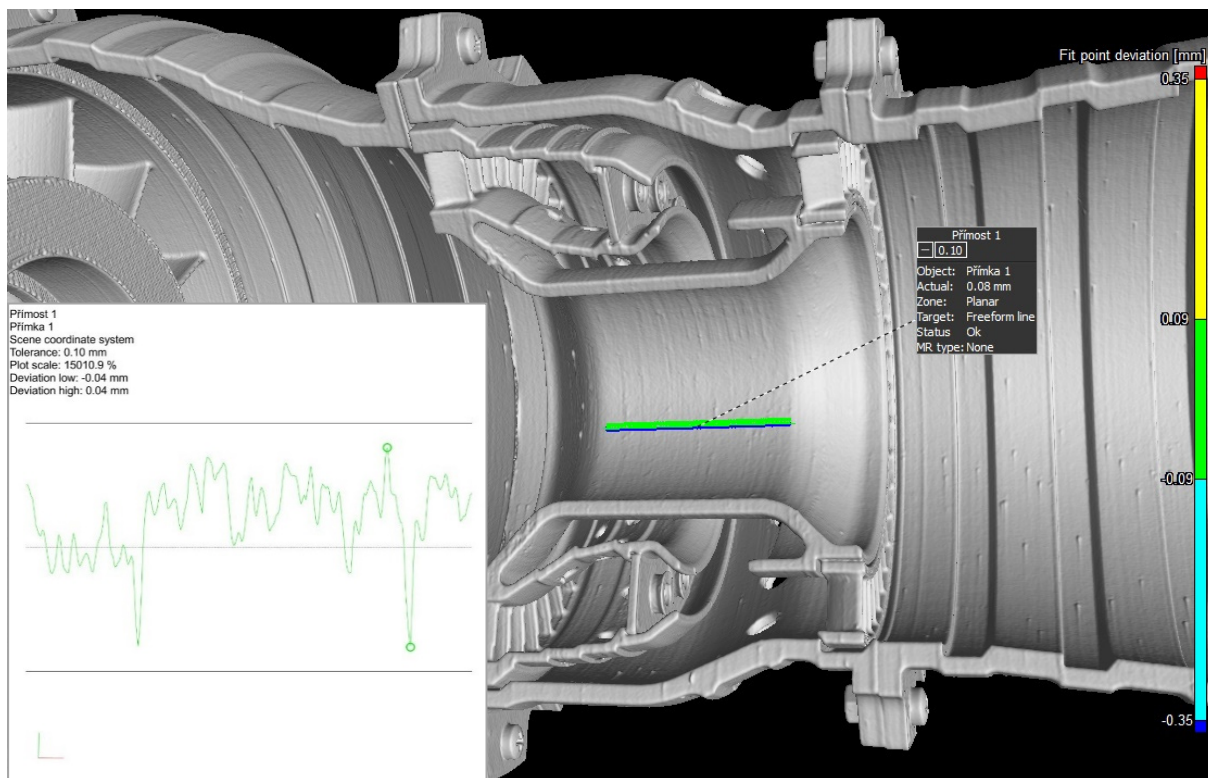
Obrázek 76 – Vyhodnocení kruhovitosti náboje výstupní trysky



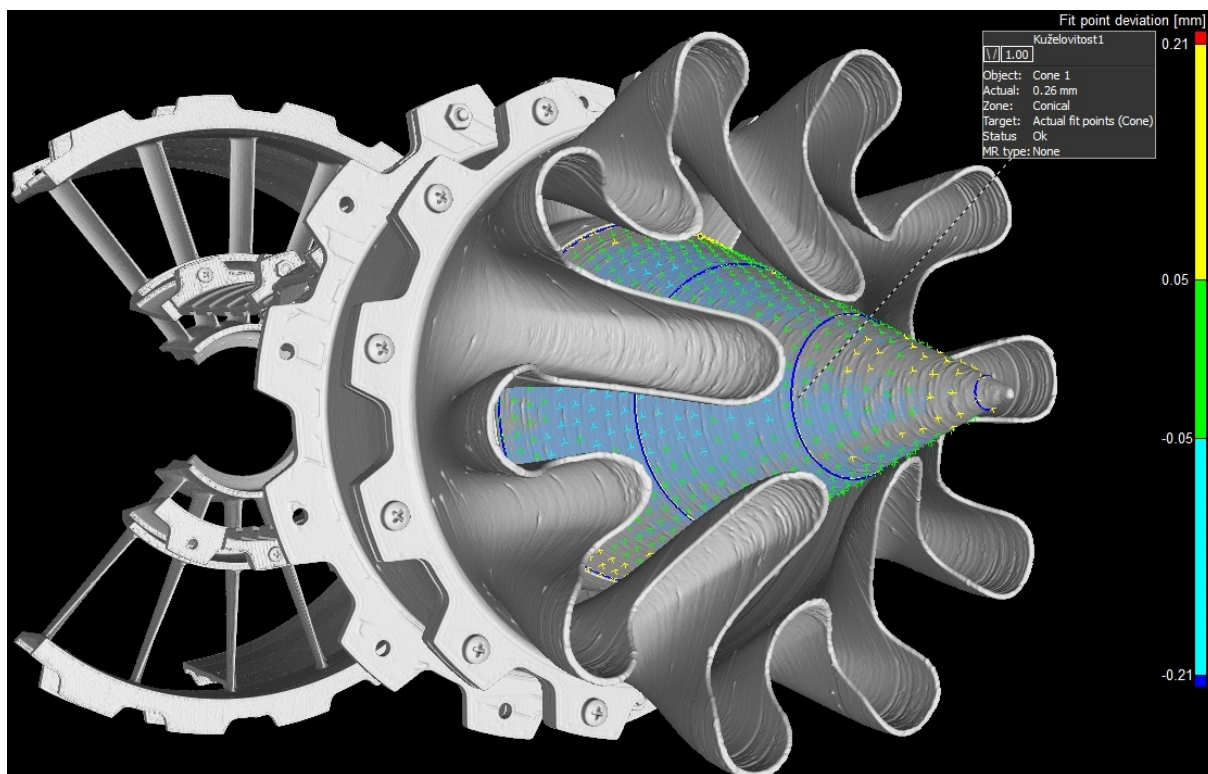
Obrázek 77 – Vyhodnocení kruhovitosti části krytu turbíny



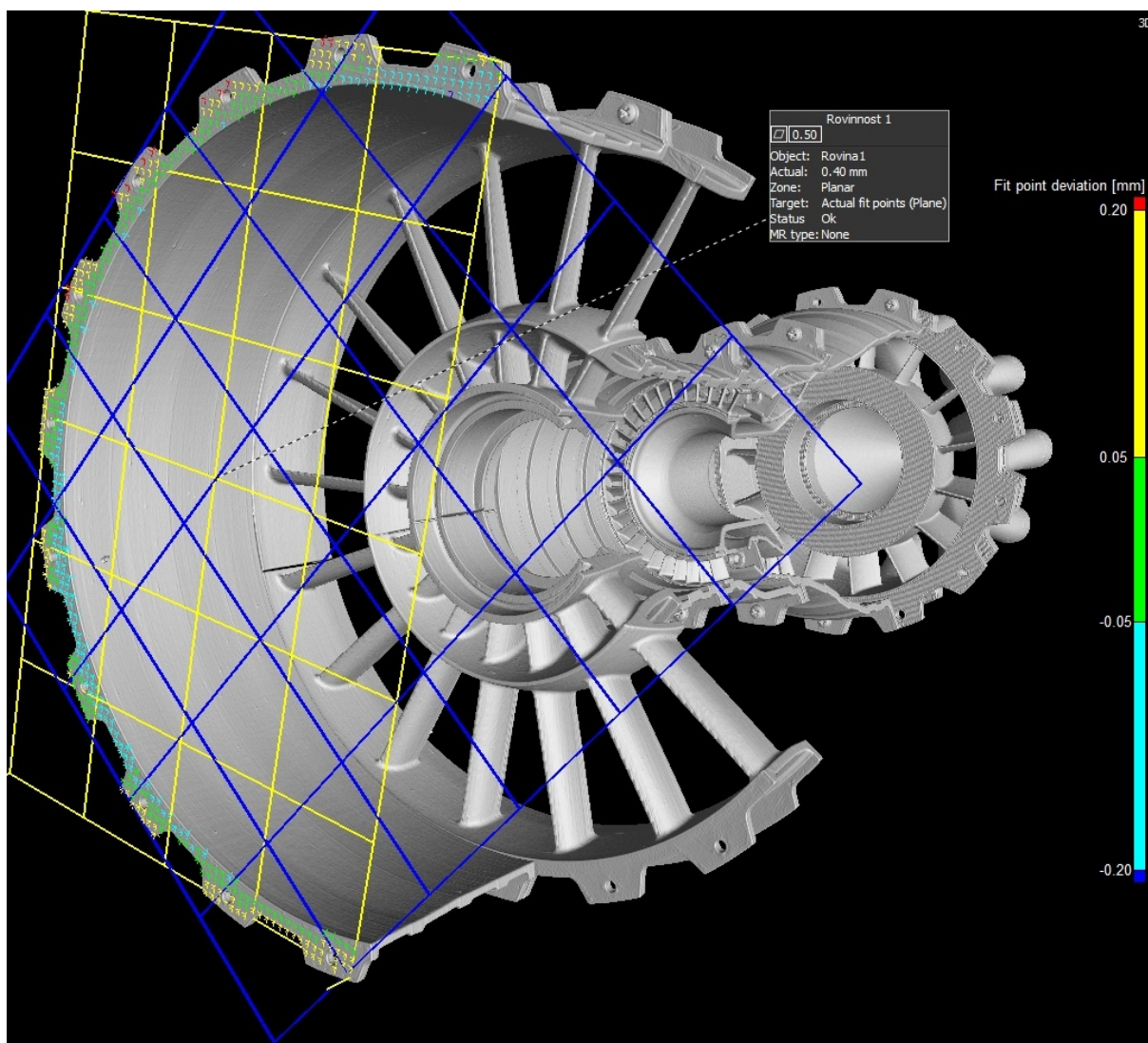
Obrázek 78 – Vyhodnocení kruhovitosti části krytu dmychadla



Obrázek 79 – Vyhodnocení přímosti části spalovací komory



Obrázek 80 – Vyhodnocení kuželovitosti části výstupní trysky



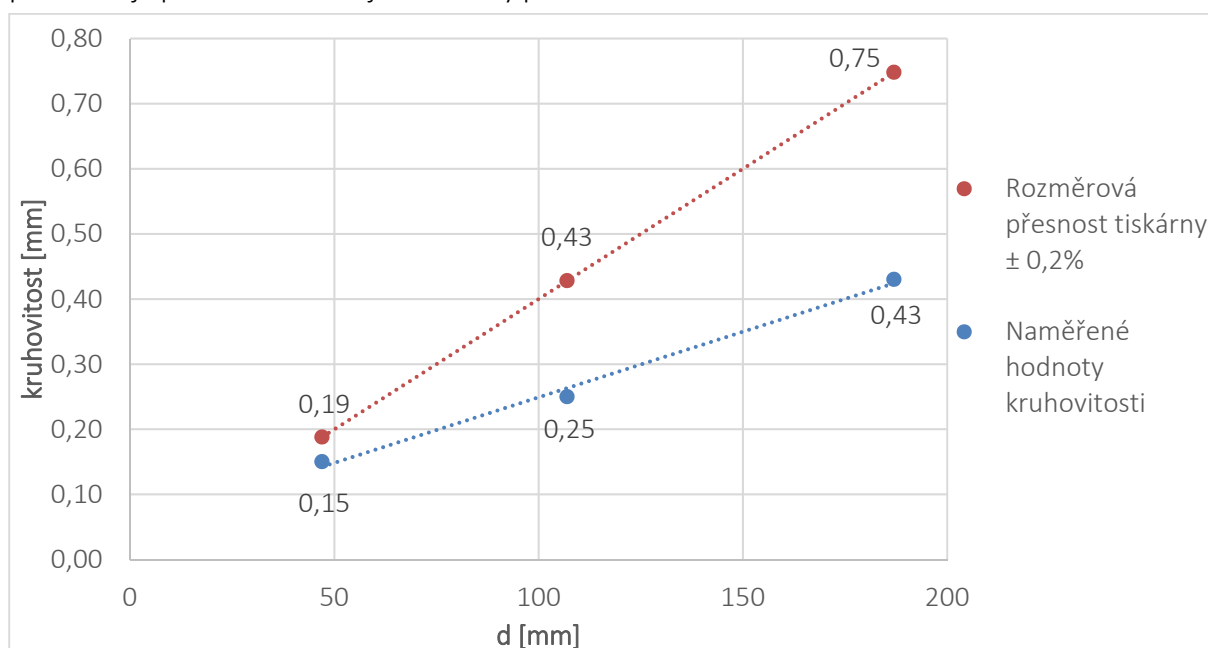
Obrázek 81 – Vyhodnocení rovinnosti části krytu dmyhadla

Výsledek rozměrového měření sestavy

Tabulka 27 – Výsledky rozměrového měření sestavy

Maximální rozměrová odchylka (viz obrázek 73)	1,67 mm
Hodnota válcovitosti náboje výstupní trysky (viz obrázek 75)	0,24 mm
Hodnota kruhovitosti náboje výstupní trysky (viz obrázek 76)	0,15 mm (\varnothing 47)
Hodnota kruhovitosti části krytu turbíny (viz obrázek 77)	0,25 mm (\varnothing 107)
Hodnota kruhovitosti části krytu dmyhadla (viz obrázek 78)	0,43 mm (\varnothing 187)
Hodnota přímosti části spalovací komory (viz obrázek 79)	0,08 mm
Hodnota kuželovitosti části výstupní trysky (viz obrázek 80)	0,26 mm
Hodnota rovinnosti části krytu dmyhadla (viz obrázek 81)	0,40 mm

Analýza rozměrů sestavy názorně ukazuje rostoucí rozměrovou odchylku směrem od počátečního dílu výstupní trysky. Pro tento díl jsou rozměrové odchylky ukazatelem přesnosti výroby. U ostatních součástí už je rozměrová analýza ovlivněna odchylkami navazujících součástí a nepřesností montáže. Dle očekávání se největší odchylky vůči CAD modelu nacházejí na nejdálčenější přední části krytu dmychadla. Důležitou roli při montáži hraje kvalita dosedacích ploch, ta je vzhledem k orientaci tisku nízká a způsobuje tak značné nepřesnosti při montáži. Na vybraných dílech sestavy byla dále zkoumána geometrická přesnost. Z naměřených hodnot je zřejmé, že hodnota kruhovitosti roste s rostoucím průměrem dílu lineárně (viz graf 5). Při porovnání s výrobcem udávanou rozměrovou a úhlovou přesností $\pm 0,2\%$ je evidentní, že naměřené hodnoty jsou v toleranci. Kruhovitost zde představuje přesnost kladení jedné vrstvy po kružnici.



Graf 5 – Závislost kruhovitosti na průměru součásti

Měření přímosti na části spalovací komory opět potvrdilo, že tiskárna nejlépe zvládá menší části dílů, které jsou tisknuty převážně pod úhlem sklonu 0° . Přímost, která v tomto případě představuje přesnost kladení jednotlivých vrstev na sebe, je 0,08 mm. Hodnota rovinnosti horní části krytu dmychadla stoupla oproti přecházejícím menším dílům až nad dvojnásobek tloušťky jedné vrstvy.

6 ZÁVĚR

Aditivní technologie jsou bezpochyby perspektivním moderním trendem v oblasti Rapid Prototypingu. Jejich rozvoj naznačuje, že v budoucnu by mohly proniknout téměř do všech odvětví průmyslu. Ve vývoji je např. metoda Contour Crafting, která by ve stavebním průmyslu mohla zajistit nízkonákladovou výrobu budov. Také v oblasti medicíny je snaha využít aditivních technologií k výrobě funkčních orgánů. Tyto technologie si své místo na trhu našly především díky jednoduché a rychlé přípravě procesu výroby, kdy v podstatě stačí vytvořit CAD model v požadovaném formátu a vložit do softwaru tiskárny.

Aditivní technologie jsou nejčastěji děleny podle skupenství použitého vstupního materiálu. Ten může být ve skupenství pevném, pak je převážně v podobě drátu nebo prášku. Vstupním materiálem, ve skupenství tekutém, je většinou fotopolymer. Metody využívající materiál v plynném skupenství jsou zatím ve fázi vývoje a měly by pracovat na principu Mondova procesu, který je znám již od roku 1899. Jednotlivých druhů je celá řada a já jsem se detailně zaměřil na ty nejpoužívanější, které jsem uvedl v kapitole 2. Často bývají stejné metody označovány pod jiným názvem, jen aby název nepodléhal patentu. Principem všech metod 3D tisku je vytvářet objekt po jednotlivých vrstvách. Tloušťka vrstev je pak jedním z rozhodujících parametrů pro výslednou kvalitu vytisknutého modelu.

Aditivní technologie nejsou zatím dostatečně normalizovány. Platných standardů je pouze 7, navíc se většinou jedná o základní terminologii a popis zařízení. Jeden ze zpracovaných standardů, který uvádím v kapitole 3, obsahuje hlavní charakteristiky a odpovídající zkušební metody pro výrobky vyráběné aditivními technologiemi. Ke každé charakteristice je přiřazen zkušební postup, který by měl být dodržen. Důležitá je volba zkušební kategorie, která je uplatněna pro kovové, plastové a keramické materiály. Zkušební kategorie jsou 3 a odvíjí se od požadovaného stupně bezpečnosti součásti vyrobené aditivní technologií. Jmenovitě pro součásti představující bezpečnostní riziko, pro součásti nepředstavující bezpečnostní riziko, pro designové součásti a prototypy. Jedním z nedostatků v oblasti zkoušení součástí zhotovených aditivními technologiemi je absence detailnějšího popisu zkušebních vzorků. Tento nedostatek bude řešit norma popisující zkušební vzorky, která je zatím ve fázi vývoje. Protože jsem provedl zkušební tisk modelu z plastového materiálu, zaměřil jsem se na zkušební metody pro plastové zkušební vzorky a uvedl jsem jejich postup.

Nejvhodnějším způsobem zhodnocení konkrétní metody aditivních technologií je, dle mého názoru, realizace zkušebního tisku. Na tom můžou být přesněji ukázány přednosti a nedostatky. Z tohoto důvodu jsem se v kapitole 4 zaměřil na zkušební tisk vybraného modelu proudového motoru z plastového materiálu. Tento model byl navržen tak, aby byl vyrobitelný metodou FDM. Již při

samotném tisku byly pozorovány nedostatky, které měly za následek snížení kvality jednotlivých součástí a výsledného modelu. Tyto vady byly popsány a uvedl jsem opatření pro jejich zamezení. Po vytisknutí všech 40 dílů modelu jsem zjistil, že přes 1/4 materiálu použitého k tisku představují rafty a podpory. Proto je důležité při tvorbě modelu uvážit nejen materiál potřebný pro samotný model, ale také materiál spotřebovaný na tyto podpůrné prvky. Celkový čas spojený s tvorbou tohoto modelu proudového motoru byl spočítán na 156 h a náklady na výrobu byly 13 753 Kč.

Po zhodnocení viditelných vad na jednotlivých součástkách modelu bylo provedeno rozměrové měření pomocí průmyslové výpočetní tomografie (viz kapitola 5). Cílem bylo zhodnotit problematiku rozměrové a tvarové přesnosti aditivní metody FDM. Výsledky rozměrové a tvarové přesnosti poukazují na značný problém s ohybem součástí, který nastává především u tenkých částí s velkou plochou. Pokud je tenká část navíc tisknuta pod úhlem vyšším než 45° stává se kritickým místem pro odchýlení od své původní polohy a pravděpodobně způsobí tvarovou nepřesnost. V takovém případě je vhodné zvážit použití podpor, které však značně zvýší dobu tisku, cenu a můžou způsobit snížení kvality dílu vlivem vad tisku. Naopak menší části dílů s větší tloušťkou stěn, které byly tisknuty s úhlem tisku převážně 0°, měly rozměrovou odchylku menší než je tloušťka jedné vrstvy. Před tiskem je tedy důležité zvážit kritická místa modelu, orientaci tisku a vlastnosti použitého plastového materiálu.

Na závěr byla provedena rozměrová kontrola sestavy modelu, na které bylo ukázáno, jak se jednotlivé nepřesnosti promítají do celkové sestavy. V případě tužších dílů by tyto nepřesnosti mohly vést až k nesmontovatelnosti celé sestavy. Naměřené rozměry součástí, na kterých nebyly patrné vady tisku, se nacházely v toleranci rozměrové přesnosti udávané výrobcem tiskárny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Cincinnati: Hanser Publications, 2016. ISBN 978-1-56990-582-1.
- [2] MATERIALPRO3D. *Historie 3D tisku* [online]. © 2018 [cit. 2018-02-19]. Dostupné online z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>.
- [3] KOŠTURIÁK, Ján, Jan MAŠEK, Martin TVARŮŽEK a Tomáš MICHÁLEK, MSC. *Inovace 2015, Téma 7: Role technologie 3D tisku v inovačním procesu* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2015 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/inovace-2015-tema-7-role-technologie-3d-tisku-v-inovacnim-procesu.html>.
- [4] MESKÓ, B. 12 Things We Can 3D Print in Medicine Right Now. *3D Printing In-dustry* [online]. 26. 2. 2015 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/12-things-we-can-3d-print-in-medicine-right-now-42867/>.
- [5] CHUA, Chee Kai., Kah Fai. LEONG a Chu Sing. LIM. *Rapid Prototyping: principles and applications*. New Jersey: World Scientific, 2003. ISBN 981-238-117-1.
- [6] LIN, Yuan, *Advanced Nano Deposition Methods*. China: Wiley-VCH: 2016. ISBN: 978-3-527-34025-5.
- [7] Thomas Grünberger & Robert Domröse. *Direct Metal Laser Sintering* [online]. 19.1. 2015 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z DOI: 10.1002/latj.201500007.
- [8] MEDFAB. *3D-Printing (3DP)* [online]. © 2018 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://medfab.de/3d-druck-verfahren/3d-printing-3dp/>.
- [9] CHUA, Chee Kai., Kah Fai. LEONG a Chu Sing. LIM. *Rapid Prototyping: principles and applications*. New Jersey: World Scientific, 2010. ISBN 978-981-277-897-0.
- [10] Stratasys. *PolyJet Technology* [online]. © 2018 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/polyjet-technology>.
- [11] CONCURRENT TECHNOLOGIES CORPORATION (CTC). *Additive Manufacturing Using Metals from the Gaseous State*. United States. Patent No.: US 9587309 B1. 2017-03-07.
- [12] ISO/ ASTM DIS 52901. *Additive manufacturing – General principles – Requirements for purchased AM parts*.

-
- [13] ISO 17296-3. *Additive manufacturing – General principles – Part 3 - Main characteristics and corresponding test methods.*
- [14] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [15] ČSN EN ISO 2039-2. *Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 2: Tvrdost dle Rockwella.* Praha: Český normalizační institut, 2000. 12 s.
- [16] ČSN EN ISO 868. *Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore).* Praha: Český normalizační institut, 2003. 12 s.
- [17] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II.* Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [18] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty – Stanovení tahových vlastností.* Praha: Český normalizační institut, 1997. 15 s.
- [19] ČSN EN ISO 178. *Plasty – Stanovení ohybových vlastností.* Praha: Český normalizační institut, 2000. 15 s.
- [20] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy.* Praha: Český normalizační institut, 2010. 24 s.
- [21] ČSN EN ISO 180. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Izod.* Praha: Český normalizační institut, 2001. 16 s.
- [22] ČSN EN ISO 8785. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Nedokonalosti povrchu – Termíny, definice a parametry.* Praha: Český normalizační institut, srpen 2000. 44 s.
- [23] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu.* Praha: Český normalizační institut, 1999. 16 s.
- [24] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu.* Praha: Český normalizační institut, 1999. 24 s.
- [25] ČSN EN ISO 3274. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů.* Praha: Český normalizační institut, 1999. 13 s.

SEZNAM ZDROJŮ OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

- [a] GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Cincinnati: Hanser Publications, 2016. ISBN 978-1-56990-582-1.
- [b] HODEK, Josef. *Aditivní technologie: Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍRENSTVÍ, o.s.* [online]. © 2018 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18792004-Aditivni-technologie-zprava-o-stavu-3d-tisku-pro-ceskou-technologickou-platformu-strojitenstvi-o-s-josef-hodek.html>.
- [c] KOŠTURIÁK, Ján, Jan MAŠEK, Martin TVARŮŽEK a Tomáš MICHÁLEK, MSC. *Inovace 2015, Téma 7: Role technologie 3D tisku v inovačním procesu* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2015 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/inovace-2015-tema-7-role-technologie-3d-tisku-v-inovacnim-procesu.html>.
- [d] Physic Instruemnte (PI) [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://www.physikinstrumente.com/en/applications/additive-manufacturing/>.
- [e] CEP [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.engineeringcivil.com/automated-construction-by-contour-crafting.html>.
- [f] Contour Crafting Corporation [online]. © 2017 [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <http://contourcrafting.com/>.
- [g] MESKÓ, B. 12 Things We Can 3D Print in Medicine Right Now. *3D Printing In-dustry* [online]. 26. 2. 2015 [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/12-things-we-can-3d-print-in-medicine-right-now-42867/>.
- [h] I.materialise [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://i.materialise.com>.
- [i] Avante Technology [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.avante-technology.com/emendo-stl-validation-repair-software/>.
- [j] LIESHOUT, Laurens [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:STL-file.jpg>
- [k] CUSTOMPART.NET [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com>.

- [l] Multi Jet Modeling: 3.imimg [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://3.imimg.com/data3/ST/AW/MY-5928640/multi-jet-modeling-500x500.jpg>.
- [m] MANUFACTURINGGUIDE. [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/solid-ground-curing-sgc>.
- [n] Dedignvetenskaper [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.design.lth.se/om-institutionen/forskningslaborationer/3dprintlab/extruderandetillverkning/>.
- [o] ISO 17296-3. *Additive manufacturing – General principles – Part 3 - Main characteristics and corresponding test methods*.
- [p] MatNet [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=531>.
- [q] ČSN EN ISO 2039-2. *Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 2: Tvrdost dle Rockwella*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 12 s.
- [r] ČSN EN ISO 868. *Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 12 s.
- [s] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [t] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty – Stanovení tahových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 1997. 15 s.
- [u] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. © 2016 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>.
- [v] ČSN EN ISO 178. *Plasty – Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 15 s.
- [w] PROSPECTOR [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://plastics.ulprospector.com/properties/ISO179>.
- [x] UMG ABS [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: https://www.umgabs.co.jp/jp/qanda/detail/q10_iso.html.
- [y] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*. Praha: Český normalizační institut, 2010. 24 s.
- [z] Chegg Study [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/pendulum-starts-horizontal-velocity-zero-the-pendulum-hammer-swings-stops-10-degress-past-t-q186747>.

- [aa] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 16 s.
- [bb] ČSN EN ISO 3274. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 13 s.
- [cc] Elektronická učebnice [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: www.eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1103.
- [dd] Zortrax [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://zortrax.com>.
- [ee] Thingiverse [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:1327093>.
- [ff] KATUCH, Peter. *Industrial Computed Tomography: by Zeiss* [online]. [cit. 2018-05-29]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68124/F2-BP-2016-Krejzek-Ladislav-BP_Krejzek_Ladislav.pdf?sequence=1.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Podskupiny technologie Rapid Prototyping a Manufacturing	9
Obrázek 2 – Schéma metody Freeformer	12
Obrázek 3 – Schéma metody Contour Crafting	13
Obrázek 4 – Vytisknutá zeď technologií Contour Crafting vlevo, vytisknutá budova vpravo	13
Obrázek 5 – Zubní náhrada vyrobená pomocí aditivní technologie vlevo, chlopeň vytištěná z kombinace kyseliny alginové, buněk hladkého svalstva a pojivové tkáně vpravo	14
Obrázek 6 – Vytištěné kolagenní ucho s vestavěnou komponentou pro nadlidské slyšení vlevo, na míru tištěný lebeční implantát vpravo.....	14
Obrázek 7 – Schéma procesu výroby aditivních technologií.....	15
Obrázek 8 – CAD model převedený do formátu STL vlevo, způsob převodu do STL vpravo.....	16
Obrázek 9 – Dělení aditivních technologií	17
Obrázek 10 – Schéma metody FDM	18
Obrázek 11 – Schéma metody MJM.....	19
Obrázek 12 – Schéma metody SLS.....	20
Obrázek 13 – Schéma metody DMLS.....	21
Obrázek 14 – Schéma metody 3DP.....	22
Obrázek 15 – Schéma metody LOM	23
Obrázek 16 – Schéma metody SLA	24
Obrázek 17 – Schéma metody SGC.....	25
Obrázek 18 – Schéma metody PJ.....	26
Obrázek 19 – Schéma Rockwellovy metody	31
Obrázek 20 – Schéma zápisu tvrdosti dle Rockwella	33
Obrázek 21 – Zkušební hrot tvrdoměru typu A a typu D.....	33
Obrázek 22 – Schéma zápisu tvrdosti dle Shore	34
Obrázek 23 – Mechanický univerzální zkušební stroj.....	35
Obrázek 24 – Tahový diagram plastových zkušebních těles	35
Obrázek 25 – Plastové zkušební těleso pro zkoušku tahem	36
Obrázek 26 – Zatěžování ohybem: a) tříbodový ohyb, b) čtyřbodový ohyb	37
Obrázek 27 – Přednostní zkušební vzorek pro zkoušku ohybem	37
Obrázek 28 – Ohybová zkouška plastových vzorků	38
Obrázek 29 – Zkušební vzorek s vrubem (dopad na bok) vlevo, přerážení vzorku uprostřed, vzorek bez vrubu (dopad naplocho) vpravo.....	39

Obrázek 30 – Ukázka středních vzorků pro Charpyho zkoušku rázem v ohybu a) zkušební těleso bez vrubu, b) zkušební těleso s V vrubem.....	40
Obrázek 31 – Kladivo pro zkoušku Izod vlevo, umístění vzorku vpravo	41
Obrázek 32 – Profil povrchu	42
Obrázek 33 – Schéma indukčního snímače	43
Obrázek 34 – 3D tiskárna Zortrax M200.....	45
Obrázek 35 – Prostředí softwaru Z-Suite.....	47
Obrázek 36 – Tenkostěnný díl (kryt turbíny)	48
Obrázek 37 – Ukázka dvou úrovní výplně (vlevo nízká, vpravo maximální).....	49
Obrázek 38 – Profil drsnosti pro rovinu XY nahoře a rovinu YZ dole	50
Obrázek 39 – Orientace tisku zkušebních vzorků pro výše uvedené zkušební metody.....	51
Obrázek 40 – Ukázka tvorby raftu a podpor (model, raft, podpory).....	52
Obrázek 41 – Model proudového motoru z webu	53
Obrázek 42 – Zkroucené součástky vlevo, poničená součást tryskou vpravo	56
Obrázek 43 – Náhodně rozmístěné počátky tvorby vrstev (kapky).....	56
Obrázek 44 – Vypružená vlákna na součástce	57
Obrázek 45 – Vytržený raft vlevo, raft spojený s modelem vpravo.....	58
Obrázek 46 – Stopy vláken z odstraněných podpor	58
Obrázek 47 – Vytržená vlákna z vrstev modelu	58
Obrázek 48 – Vlákuitost	59
Obrázek 49 – Vytisknutý model proudového motoru.....	60
Obrázek 50 – Schéma průmyslové výpočetní tomografie	61
Obrázek 51 – Dmychadlo.....	62
Obrázek 52 – Umístění dmychadla v tomografu	63
Obrázek 53 – Mrak bodů ze snímkování dmychadla a jeho filtrace.....	63
Obrázek 54 – Rozměrová analýza horní části dmychadla	64
Obrázek 55 – Rozměrová analýza spodní části dmychadla.....	65
Obrázek 56 – Odchyly horní a spodní části lopatek	65
Obrázek 57 – Vyhodnocení rovinnosti horní plochy náboje dmychadla.....	66
Obrázek 58 – Vyhodnocení válcovitosti horní části náboje dmychadla	66
Obrázek 59 – Lopatkové kolo vysokotlakého kompresoru stupně 5.....	67
Obrázek 60 – Umístění lopatkového kola.....	68
Obrázek 61 – Mrak bodů ze snímkování lopatkového kola a jeho filtrace	68
Obrázek 62 – Rozměrová analýza horní části lopatkového kola.....	69
Obrázek 63 – Rozměrová analýza spodní části lopatkového kola	70

Obrázek 64 – Řez součástí v kritické oblasti vady tisku.....	70
Obrázek 65 – Vyhodnocení rovinnosti horní plochy lopatkového kola.....	71
Obrázek 66 – Vyhodnocení válcovitosti otvoru lopatkového kola	71
Obrázek 67 – Sestava obalu proudového motoru	72
Obrázek 68 – Rozdělení snímkování sestavy	73
Obrázek 69 – Mrak bodů ze snímkování sestavy a jeho filtrace	73
Obrázek 70 – Překrytí virtuálních modelů sestavy.....	74
Obrázek 71 – Rozměrové odchytky vnitřní části sestavy	75
Obrázek 72 – Rozměrové odchytky vnější části sestavy	75
Obrázek 73 – Rozměrové odchytky přední části sestavy.....	76
Obrázek 74 – Rozměrové odchytky řezu přední části sestavy.....	76
Obrázek 75 – Vyhodnocení válcovitosti náboje výstupní trysky	77
Obrázek 76 – Vyhodnocení kruhovitosti náboje výstupní trysky	77
Obrázek 77 – Vyhodnocení kruhovitosti části krytu turbíny	78
Obrázek 78 – Vyhodnocení kruhovitosti části krytu dmyhadla.....	78
Obrázek 79 – Vyhodnocení přímosti části spalovací komory.....	79
Obrázek 80 – Vyhodnocení kuželovitosti části výstupní trysky.....	79
Obrázek 81 – Vyhodnocení rovinnosti části krytu dmyhadla	80

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Základní charakteristiky pro výrobky vyráběné aditivními technologiemi.....	28
Tabulka 2 – Základní charakteristiky pro výrobky vyráběné aditivními technologiemi pokračování	29
Tabulka 3 – Zkušební kategorie	30
Tabulka 4 – Průměry kuliček a odpovídající hodnoty zatížení.....	32
Tabulka 5 – Minimální požadované hodnoty na vzorek.....	34
Tabulka 6 – Rozměry zkušebních vzorků dle normy	36
Tabulka 7 – Poměr tloušťky a šířky pro ostatních zkušební tělesa.....	37
Tabulka 8 – Poměr tloušťky a šířky pro ostatních zkušební tělesa pokračování	38
Tabulka 9 – Normované rozměry zkušebních těles.....	39
Tabulka 10 – Profily	42
Tabulka 11 – Jmenovité hodnoty charakteristik profilometru.....	44
Tabulka 12 – Technické parametry 3D tiskárny Zortrax M200.....	46
Tabulka 13 – Doba tisku v závislosti na tiskových parametrech	49
Tabulka 14 – Změřené parametry drsnosti	50
Tabulka 15 – Charakteristika použitých materiálu pro 3D tisk.....	51
Tabulka 16 – Seznam vytisknutých součástí.....	54
Tabulka 17 – Seznam vytisknutých součástí pokračování	55
Tabulka 18 – Výrobní náklady na 3D tisk modelu	60
Tabulka 19 - Výpočet odpadového materiálu z raftů a podpor	60
Tabulka 20 – Technické parametry tomografu Zeiss Metrotom 1500.....	61
Tabulka 21 – Technické parametry tomografu Zeiss Metrotom pokračování	62
Tabulka 22 – Nastavené parametry generátoru záření a detektoru pro měření dmychadla.....	63
Tabulka 23 – Výsledky rozměrového měření dmychadla.....	67
Tabulka 24 – Nastavené parametry generátoru záření a detektoru pro měření lopatkového kola .	68
Tabulka 25 – Výsledky rozměrového měření lopatkového kola	72
Tabulka 26 – Nastavené parametry generátoru záření a detektoru pro měření sestavy.....	73
Tabulka 27 – Výsledky rozměrového měření sestavy.....	80

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Použití aditivních technologií	11
Graf 2 – Využití 3D tisku ve firmách	11
Graf 3 – Závislost doby tisku na tloušťce vrstvy a úrovni výplně pro model hrací kostky	47
Graf 4 – Závislost doby tisku na tloušťce vrstvy a úrovni výplně pro tenkostěnný model	48
Graf 5 – Závislost kruhovitosti na průměru součásti.....	81