



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ FAKULTA SO SÍDLOM V TRNAVE

Ing. Róbert Hrušecký

Autoreferát dizertačnej práce

Výskum aplikácie počítačovej tomografie v meraní

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Strojárske technológie a materiály

v študijnom odbore: 5.2.7 Strojárstvo

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Trnava, dňa 28.5.2020



Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre obrábania a tvárnenia na Ústave výrobných technológií Materiálovotechnologickej fakulty so sídlom v Trnave Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Róbert Hrušecký
Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Slovenská
technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Školiteľ: doc. Ing. Augustín Görög, PhD.
Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave Slovenská
technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Oponenti:
.....
.....

.....
.....
.....

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa **o****h.**
na

.....

OBSAH

ÚVOD	4
1 LITERÁRNY PREHĽAD	5
1.1 Zdroj röntgenového žiarenia.....	6
1.2 Detektor röntgenového žiarenia.....	8
1.3 Polohovací systém	9
2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	10
3 NÁVRH EXPERIMENTÁLNEJ ČASTI PRÁCE	12
3.1 Návrh a výroba experimentálnej súčiastky	13
3.2 Meranie na súradnicovom meracom stroji a počítačovom tomografe.....	14
3.3 Zariadenie na meranie teploty v prostredí CT zariadenia	15
3.4 Vytvorenie meracieho programu v softvéri CALYPSO	16
4 VYHODNOTENIE NAMERANÝCH ÚDAJOV	18
4.1 Vonkajšie rozmerové charakteristiky	18
4.2 Vyhodnotenie celkových vonkajších rozmerových charakteristík	22
4.3 Vnútorne rozmerové charakteristiky	23
4.4 Vyhodnotenie celkových vnútorných rozmerových charakteristík	27
4.5 Vyhodnotenie všetkých rozmerových charakteristík.....	28
5 PRÍNOSY	30
ZÁVER	31
ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	33
ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI	34

ÚVOD

Wilhem Conrad Röntgen (1845 – 1923) experimentoval s elektrickými výbojmi vo vákuových trubiciach a dňa 8. novembra 1895 objavil lúče, ktoré dokážu preniknúť cez predmety. Nasledovalo množstvo pokusov, na základe ktorých sa chcel dozvedieť čo najviac o lúčoch, ktoré objavil. Tieto lúče pomenoval ako „lúče X“, použijúc matematické označenie pre niečo neznáme. Rok po objavení „X lúčov“ sa konalo zasadanie Würzburgskej Spoločnosti pre fyziku a medicínu, kde bol prijatý návrh, aby sa lúče X pomenovali po svojom objaviteľovi. Za tento objav mu bola udelená v roku 1901 vôbec prvá Nobelova cena za fyziku. Prvou základnou metódou štruktúrnej analýzy sa stalo röntgenové zobrazovanie založené na zákone absorpcie röntgenového žiarenia. O niekoľko rokov neskôr ju doviedla k dokonalosti röntgenová počítačová tomografia. Počítačová tomografia je definovaná ako zobrazovacia metóda, pri ktorej je objekt ožarovaný röntgenovými lúčmi alebo gama lúčmi a matematické algoritmy sa používajú na vytvorenie obrazu objektu. Samotné slovo tomografia pochádza z gréckych slov „tomos“ čo znamená rez alebo sekcia a slovo „graphien“ znamená písať.

Röntgenová počítačová tomografia (CT) pôvodne našla svoje uplatnenie v lekárskej oblasti a po mnohých rokoch technologického pokroku sa rozšírila aj do priemyselných oblastí. Röntgenová CT technológia sa vo veľkej miere používa na neinvazívne skúmanie ľudského tela a nedeštruktívne analýzy priemyselných častí a materiálov. Najvýznamnejším rozdielom medzi súčasnými klinickými a priemyselnými CT systémami je v konštrukcii zariadenia. V prípade klinického CT sa detektor a zdroj otáčajú okolo objektu (pacienta), zatiaľ čo v prípade priemyselného CT sú detektor a zdroj vo väčšine prípadov stabilní a skúmaný objekt vykonáva rotačný pohyb.

Výhodou počítačovej tomografie je získanie informácií o geometrii a objeme danej súčiastky, ktorou je kontrola vnútornej geometrie bez porušenia súčiastky. V dnešnej dobe je veľká požiadavka na presné a rýchle meranie celej geometrie súčiastky v priemyselných odvetviach. Kvalitu nameraných výsledkov však ovplyvňuje viacero faktorov, ktorým je potrebné venovať pozornosť. Z toho dôvodu sa bude táto práca zaoberať meraním navrhutej súčiastky, vyrobenej pomocou aditívnej technológie a meraním pri zmene parametrov skenovania, ktoré ovplyvňujú výsledok merania. Výsledkom bude navrhnutie optimálnych parametrov na skenovanie rozmerových charakteristík na súčiastke tak, aby boli čo najbližšie k referenčnej hodnote, získanej pomocou súradnicovej meracej techniky, ktorá patrí k najpresnejším technológiám kontroly kvality. Skúmané parametre budú prekonzultované s odbornými pracovníkmi pracujúcimi s počítačovou tomografiou v oblasti metrológie.

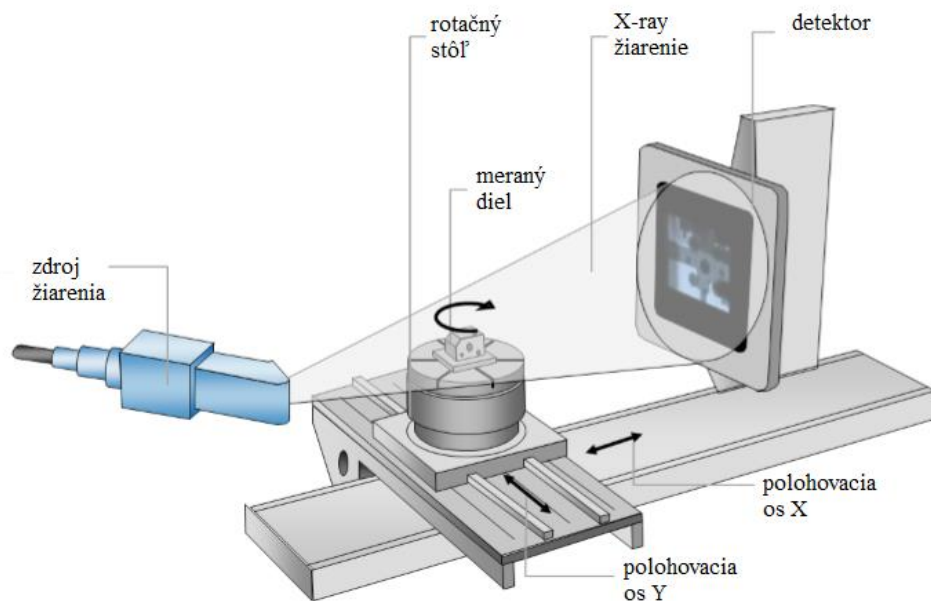
1 LITERÁRNY PREHĽAD

Röntgenová technika sa v lekárstve používa už dlhú dobu. Ako prvý sa röntgenovým žiarením v spojitosti s počítačovou tomografiou, zaoberal Johann Radon, kde vytvoril matematické postupy a výpočty na rekonštrukciu snímok vytvorených pomocou počítačového tomografu. Svoju teóriu nazval radónová transformácia. Koncepcia Radonovej transformácie je nesmierne dôležitá v teórii tomografie. Výstupom z tomografu totiž nie je priamo obrázok prierezu snímaného objektu, ale jeho zjednodušený Radonov obraz. V tomografickej praxi sa Radonovmu obrazu niekedy hovorí sinogram (Krejzek 2016).

V priemyselnom prostredí sa primárny cieľ CT zariadení výrazne líši od požiadaviek v oblasti medicíny. Priemyselné CT je preto schopné používať röntgenové zdroje s vyššou intenzitou a predlžovať časy skenovania, keď tým predĺžením dosiahneme vyššie presnosti skenovania. Ako už bolo uvedené, priemyselné CT sa väčšinou používajú na charakterizáciu materiálov, nedeštruktívne skúšanie a metrologické aplikácie, a preto sa dôraz zameriava viac na dosiahnutie maximálneho možného rozlíšenia skenovania a presnosti. Na rozdiel od lekárskeho zariadení, kde sa skenovacie zariadenie otáča okolo pacienta vysokou rýchlosťou, je skenovacie zariadenie vo väčšine priemyselných systémov fixné a vzorka sa otáča. Táto modifikácia umožňuje konštrukciu CT systémov s vyššou presnosťou a stabilitou skenovaného objektu (Kruth 2011). Ďalším zásadným rozdielom je pri skenovaní nastavenie vstupných parametrov, pretože sa líšia materiály ako aj požiadavky na výstup. Metrologické CT zariadenia sú konštruované na meranie s vysokou presnosťou. Dané zariadenia disponujú vysokým výkonom zdroja röntgenového žiarenia, vysokým rozlíšením detektora, presným nastavením polohovacieho systému, ako aj tepelnou stabilitou konštrukcie daného zariadenia (De Chiffre 2014).

Najbežnejšie zariadenia priemyselnej röntgenovej počítačovej tomografie (CT) využívajú generovanie röntgenového lúča kužeľového tvaru a tieto zariadenia sú zložené zo štyroch hlavných častí možného skenovania objektu (Ametova 2018):

- Zdroj žiarenia na generovanie röntgenových lúčov,
- detektor, kde sa menia röntgenové lúče na elektrický signál,
- polohovací systém (X-vodiaci kolík, krížové sane, rotačný stôl),
- počítač na získavanie, rekonštrukciu a následnú analýzu údajov.



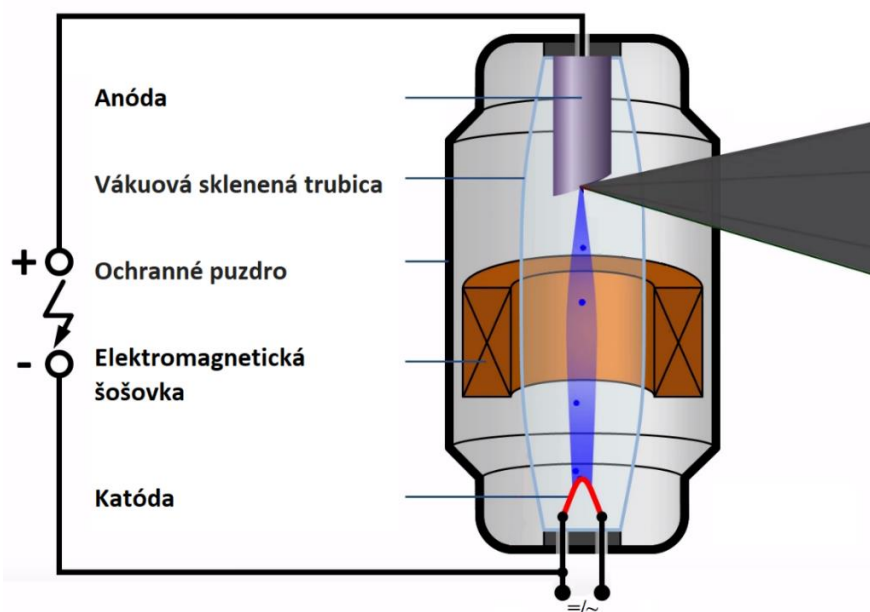
Obr. 1 Základná konštrukcia priemyselných tomografov

Výkonnosť prvých troch komponentov v podstate priamo ovplyvňuje kvalitu získaných údajov. Zdroj röntgenového žiarenia by mal mať dostatok energie na prenikanie vysoko absorpčných materiálov. Sú špeciálne zdroje röntgenového žiarenia, ktoré môžeme nastaviť na napätie až do 800 kV. Objem merania je obmedzený veľkosťou detektora a rozmerom zariadenia. Rozlíšenie detektorov sa pohybuje okolo 1024 x 1024 pixelov, predstavuje dátový súbor s informáciou o snímanom priestore cca 2GB dát. Pri tomografoch s detektormi s rozlíšením 2048 x 2048 pixelov je objem dát už takmer 16GB. V súčasnosti je na trhu aj detektor s rozlíšením 3008 x 2512 pixelov. Rýchlosť rotácie závisí tak od času expozície, ako aj od mechanickej stability rotačného stola (De Chiffre 2014, Katuch 2010).

1.1 Zdroj röntgenového žiarenia

Röntgenové lúče sa generujú pomocou rôznych zdrojov. Základný princíp fungovania väčšiny röntgenových trubíc používaných v CT systémoch spočíva na Coolidgeovej trubici, známej tiež ako röntgenka, ktorá bola vynájdená od roku 1913 (Hsieh 2009). Hlavnými komponentmi röntgenovej trubice sú katóda a anóda, ktoré sa nachádzajú vo vákuovej sklenenej trubici. Katóda sa obvykle skladá z tenkého volfrámového vlákna, z ktorého sú elektróny emitované. Katóda sa zahrieva pomocou Joulovho javu. Pri zvyšovaní teploty katódy sa zvyšuje kinetická energia elektrónov. Keď sa táto tepelne indukovaná kinetická energia stane dostatočne silnou na prekonanie väzbovej energie elektrónov z atómu volfrámového vlákna, tak tieto elektróny môžu emitovať. Vďaka príťažlivej sile medzi opačnými nábojmi zostávajú

voľné elektróny v blízkosti vlákna a vytvárajú elektrónový oblak. Teplota vlákna by mala byť dostatočne vysoká, aby kinetická energia elektrónov prekonala príťažlivé sily, ktoré ich držia v kove. Počas tohto priebehu volfrámové vlákno dosahuje teplotu okolo 2100°C. Preto je materiál katódy aj anódy navrhnutý z materiálu, ktorý odoláva vysokým teplotám tavenia. Teplota tavenia volfrámu je okolo 3400°C. Anóda pozostáva z kovovej časti (terč), volfrámu alebo molybdénu zapustenej do hrubšej časti, obvykle vyrobenej z medi, kvôli dobrej tepelnej vodivosti. Katóda je pripojené k zápornému a anóda ku kladnému pólu generátora vysokého napätia (Buzug 2008, Zajac 2010).



Obr. 2 Schéma konštrukcie röntgenky

Pri generovaní napätia medzi katódou a anódou, vyletia elektróny z katódy a dopadnú prudko na ohnisko anódy. Pri priemyselných röntgenových tomografoch sa oproti lekárskeym CT prístrojom využíva mikroohniskový zdroj žiarenia. V tomto zdroji je vzniknutý lúč tepelných elektrónov fokusovaný magnetickými šošovkami. Tým je možné voliť veľkosť stopy dopadajúcej na ohnisko. Ohnisko je zvyčajne pod uhlom 10° až 19° v smere letiacich elektrónov. Na základe dosiahnuteľnej veľkosti ohniska sa priemyselné počítačové tomografy dajú rozdeliť do niekoľkých skupín (De Chiffé 2014):

- Konvenčné alebo makro CT zariadenia s ohniskom väčšími ako 0,1 mm,
- zariadenia s mikrofokusom (μ -CT), veľkosťou ohniska v rozmedzí niekoľkých mikrometrov,
- zariadenie s nanofokusom s veľkosťou ohniska menej ako 1 μ m do 0,4 μ m,
- synchrotrón CT, pri ktorom môžu byť veľkosti ohniska menšie ako 0,2 μ m až 0,04 μ m.

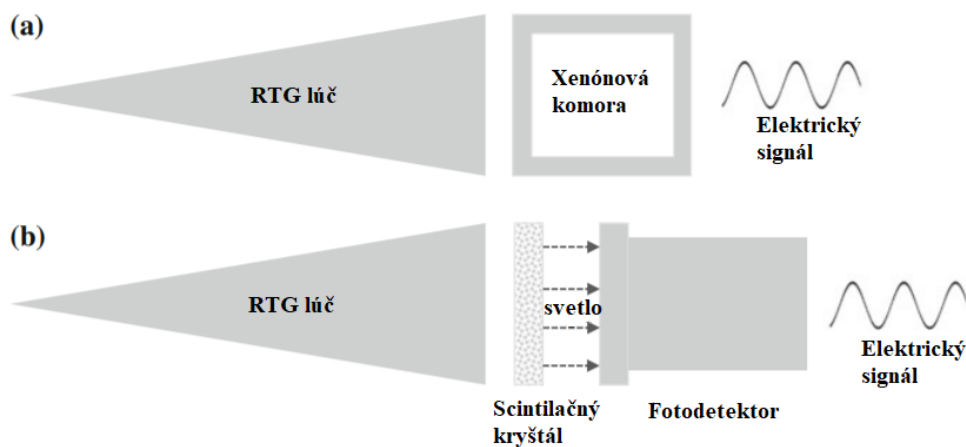
Pri dopade sa prevažná časť kinetickej energie elektrónov premení na teplo a malá časť sa premení na röntgenové žiarenie. Ďalším obmedzením je, že röntgenové lúče sú vyžarované vo všetkých smeroch a väčšina nikdy nedopadá na súčiastku. Röntgenové žiarenie vzniká z kolíznych aj z radiačných interakcií (Hsieh 2009; Buzug 2008). Väčšina súčasných priemyselných röntgenových zdrojov je s otvorenými trubicami, pretože sa vyžaduje pravidelná výmena vlákna alebo terča. Preto sa vákuum udržuje pomocou vákuových čerpadiel a po výmene terča alebo vlákna sa musí vákuum obnoviť (Krejzek 2016).

1.2 Detektor röntgenového žiarenia

Útlm sa meria zachytením zoslabených röntgenových lúčov pomocou röntgenového detektora. V priebehu rokov došlo k značnému zlepšeniu v detekčnej technológii. Je zaujímavé, že rôzne generácie CT systémov sa niekedy označujú odlišným typom / konfiguráciou detektorov. Detektor zachytáva röntgenový lúč a prevádza ho na elektrické signály. Táto premena energie röntgenového žiarenia na elektrický signál je primárne založená na dvoch princípoch (Panetta 2016):

- Detektory ionizácie plynu,
- „scintillation“ detektor.

Na Obr. 3 je znázornenie oboch detekčných princíпов. Detektory ionizácie plynu premieňajú röntgenovú energiu priamo na elektrický signál, zatiaľ čo „scintilačné“ detektory prevádzajú röntgenové lúče na viditeľné svetlo a potom sa svetlo premieňa na elektrický signál (Carmignato 2018).



Obr. 3 Schematické znázornenie snímania röntgenového lúča
a) detektorom ionizácie plynu, b) „Scintillation“ detektor.

Väčšina priemyselných CT zariadení používa detektory plochými panelmi (FPD) založené na štvorcovom poli v kombinácii s kuželovým zdrojom röntgenových lúčov. Alternatívnym usporiadaním detektorov s plochým panelom sú detektory s lineárnymi alebo čiarovým diódovým usporiadaním (LDA), ktoré sa pri snímaní röntgenových snímok spoliehajú na jediný riadok pixelov, a preto sa používajú v kombinácii s čiarovým zdrojom röntgenových lúčov. Detektory založené na scintilátoroch neumožňujú rozlišovanie medzi rôznymi fotónovými energiami, a preto poly chromatická povaha brzdného žiarenia vedie k artefaktom, ktoré vznikajú pri skenovaní multi materiálových komponentov (Taguchi 2013, Welkenhuyzen 2015).

1.3 Polohovací systém

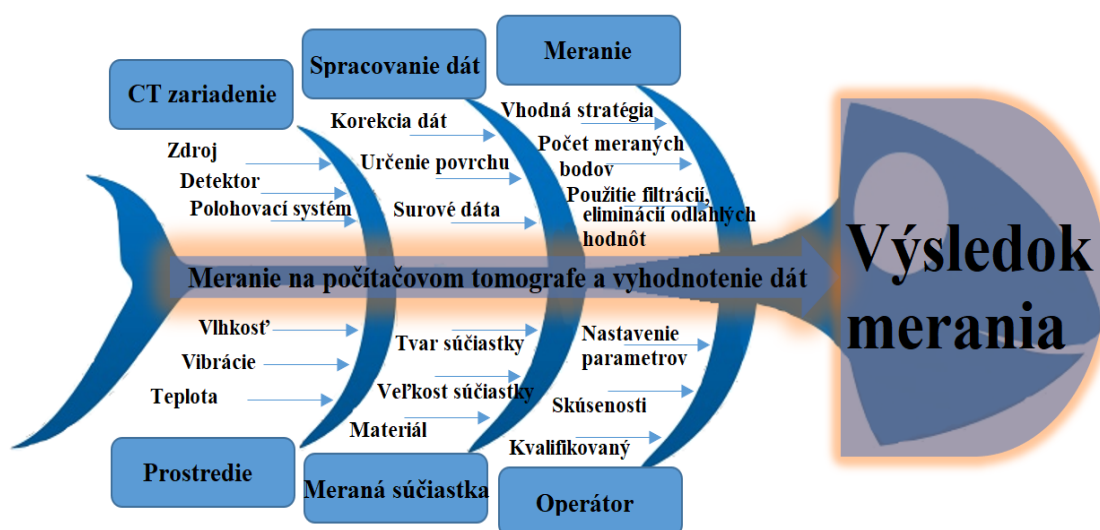
Počas úspešnej tradície súradnicových meracích prístrojov bol skonštruovaný polohovací systém, ktorý zabezpečuje počas röntgenového skenovania presnú polohu súčiastky (rádovo na mikrometre) pri prechode röntgenových lúčov. Navrhnutá konštrukcia kombinuje robustnú a osvedčenú mechanickú lineárnu technológiu s patentovanou technológiou vzduchových ložísk (Varga 2017). Tri osi pokrývajú karteziánsky súradnicový systém a plus os rotácie otočného stola (Obr. 1). Os zväčšenia (os X) je definovaná na priamke medzi zdrojom röntgenového žiarenia a detektorom. Os Z je rovnobežná s osou rotácie otočného stola. Os Y je kolmá na os X aj Z. Vzhľadom na vysoké požiadavky na presnosť merania priemyselných CT zariadení je geometrické usporiadanie a stabilita kinematického systému rozhodujúce pre celkový výkon systému. Nesprávne geometrické usporiadanie a stabilita zariadenia môže viesť k artefaktom pri skenovaní. Polohovací systém musí spĺňať niekoľko podmienok (Ferruci 2015):

- priesečník osi zväčšenia s detektorom sa nachádza v strede detektora,
- os zväčšenia je kolmá na detektor,
- os zväčšenia pretína os rotácie v uhle 90° .

Rám, ktorý nesie všetky komponenty, preto vyžaduje vysokú rozmerovú stabilitu, tlmiacu stabilitu a tuhosť. Vyžaduje sa tiež regulácia teploty zariadenia a aktívne chladenie zdroja. Dimenzionálna metrológia by sa mala vykonávať pri 20°C (toto je medzinárodne dohodnutá štandardná teplota). Odlišná teplota bude mať za následok zväčšenie alebo zmenšenie predmetu a možné tepelné narušenie štruktúry CT zariadenia (Ferruci 2015).

2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

V posledných rokoch sa počítačová tomografia začala presadzovať tiež v odvetví metrologie. Prvé pokusy vykonávať meranie rozmerov za pomoci CT skenerov sa uskutočnili v roku 1991. Presnosť bola ale iba v rádoch 0,1 mm. V dnešnej dobe sa kladú čoraz väčšie nároky na presnosť merania. Počítačová tomografia patrí k bezkontaktným technológiám zberu informácií o meranej súčiastke a presnosť merania je menšia, ako pri súradnicových meracích strojoch. Keďže počítačová tomografia v metrologii patrí medzi novšie technológie, tak v literárnej štúdii je zistených veľmi veľa vplyvov alebo parametrov, ktoré môžu ovplyvniť presnosť merania. Bol vytvorený Ishikawa diagram, kde boli prehodnotené a vložené vplyvy v konzultácií s odbornými pracovníkmi, ktoré ovplyvňujú výsledok merania (Obr. 4).



Obr. 4 Ishikawa diagram faktorov ovplyvňujúcich výsledok merania pri CT technológii

Touto analýzou sme chceli zhrnúť dôležité vplyvy a z nich vybrať tie, ktoré by mohli ovplyvniť a urýchliť meranie na počítačovom tomografe. Výsledok merania pri CT zariadení ovplyvňujú parametre ako je zdroj, detektor a polohovací systém. Pri zdroji je dôležitý výkon, materiál a tvar terča, ako aj veľkosť ohniska. Pri detektore je dôležité rozlíšenie, citlivosť, integračný čas, zosilnenie signálu ako aj samotný princíp detekcie röntgenového žiarenia. Pri polohovacom systéme je dôležitá stabilita celého rámu, tuhosť, odolnosť voči vibráciám, pojazdy a otočný stôl. Tiež aj kalibrácia zdroja, detektora a polohovacieho systému má vplyv na výsledok merania. Pri prostredí sa snažíme dodržať laboratórne podmienky pre meranie. Zariadenie sa nachádza v Centre Excelentnosti 5-osového obrábania (CE5AM), kde nie sú ideálne laboratórne podmienky na meranie ako je teplota a vlhkosť vzduchu. Materiál meranej

súčiastky je dôležitý ohľadom hustoty materiálu. Počítačová tomografia má určité prežarovacie limity, ktoré závisia od výkonu zariadenia. Pri materiáloch s vysokou hustotou potrebujeme zdroj röntgenového žiarenia s veľkým výkonom. Počítačová tomografia má určitý merací rozsah a nemôžeme merať príliš veľké súčiastky. Tvar meranej súčiastky, tiež môže ovplyvniť meranie. Boli merané súčiastky, ktoré mali jednoduchý prstencový tvar, ale v kombinácii s materiálom nebolo možné súčiastku zmerať. Pri spracovaní dát sú dôležité informácie, či boli použité korekcie, vznik artefaktov, alebo či používame surové dáta, filtre a 3D rekonštrukciu. Operátor CT zariadenia má veľký vplyv na výsledok merania. Pri operátoroch je potrebné, aby bol kvalifikovaný a zaškolený do oblasti počítačovej tomografie a metrologie. Počítačová tomografia je nová technológia a nie sú známe žiadne postupy aké parametre by mal operátor použiť na meranie súčiastok a akú polohu súčiastky nastaviť. Všetko závisí od skúsenosti operátorov. Samotné meranie alebo vyhodnotenie naskenovaných dát má tiež vplyv na výsledok merania. Nastavenie vhodných stratégií merania, alebo použitie dostatočného počtu bodov. Otázkou je či pri meracích programoch na CT sken je vhodné použiť filtrácie, alebo eliminácie odľahlých hodnôt. Tieto faktory ovplyvňujú výsledok merania a preto sa ich snažíme eliminovať alebo úplne odstrániť, aby meranie prebehlo bez hrubých a systematických chýb, ktoré sú známe a môžeme ich eliminovať.

Preto cieľom dizertačnej práce je **určenie vplyvu vybraných parametrov skenovania na presnosti vyhodnotenia navrhutej súčiastky, vyrobenej pomocou aditívnej technológie.**

Pre splnenie hlavného cieľa práce bude treba vykonať niekoľko čiastkových cieľov :

- Navrhnutie experimentálnej vzorky a vytvorenie meracieho programu na vyhodnotenie merania z počítačovej tomografie a súradnicovej meracej techniky.
- Získať závislosť medzi vybranými parametrami skenovania na navrhutej súčiastke.
- Určiť vhodné parametre skenovania na navrhutej súčiastke, aby výsledok merania z počítačovej tomografie bol podobný referenčnému meraniu zo súradnicovej meracej techniky.

3 NÁVRH EXPERIMENTÁLNEJ ČASTI PRÁCE

Metrológia je neodmysliteľnou súčasťou priemyslu a strojárstva a za posledné roky bol veľký vývoj v tomto odvetví. Prelomovým objavom bolo zostrojenie bezkontaktných meracích zariadení, ktoré majú širokú škálu použitia. Kontrole súčiastok sa kladie čoraz väčší význam, nakoľko je to podstatný parameter samotnej výroby. V súčasnosti sa vyskytujú tvarovo veľmi zložité diely a je potrebné merať rýchlo a s vysokou presnosťou. Preto sa v dizertačnej práci zameriavame na výber parametrov, ktoré majú vplyv na výsledok merania a zároveň ovplyvňujú aj rýchlosť merania na počítačovom tomografe. Vybrané parametre boli prekonzultované s ďalšími skúsenými operátormi. Bolo vybraných 5 parametrov, pri ktorých predpokladáme významný vplyv na výsledok merania.

Prvý parameter je v oblasti výkonu zdroja röntgenového žiarenia a je to napätie. Veľkosť napätia bola zvolená podľa interných odporúčaní ZEISS v dokumentácií o CT meraní na počítačovom tomografe. Kde sa udáva, že pre plastové diely s maximálnou hrúbkou steny 30 mm by ste mali použiť napätie 120 kV a pre 50 mm by malo byť 160 kV. Maximálna hrúbka steny v navrhnutej súčiastke, bola okolo 40 mm. Autori v článku (Angel 2014) sa zaoberali nastaveniami napätia a prúdu pre súčiastky z materiálov kovu a polyméru. Ďalším zvoleným parametrom bol integračný čas v nastavení detektora. Tretí a štvrtý parameter bolo zvolený v oblastiach polohovacieho systému zariadenia. Bola to vzdialenosť súčiastky od zdroja röntgenového žiarenia a tým sa zmenila veľkosť voxela. Štvrtým parametrom bolo nastavenie merania VAST CT alebo CT meranie. Rozdiel v tomto nastavení je otáčanie meranej súčiastky na otočnom stole. Pri meraní VAST CT sa súčiastka kontinuálne otáča okolo Z osi CT zariadenia. Pri meraní CT sa súčiastka prerušovane otáča okolo Z osi CT zariadenia, čiže meranie touto stratégiou je dlhšie, ako pri VAST CT meraní. Posledným piatym parametrom bol zvolený počet obrázkov na meranie. To znamená, že z daného počtu obrázkov vytvorí mrak bodov. Autori článkov (Gómez 2016, Weckenmann 2013) udávajú, že zvýšením obrázkov nad 800 sa odchýlky znížili okolo 5 až 10%. Ako pri každom meraní tak aj pri meraní pomocou počítačovej technológie vznikajú chyby merania. Tieto chyby sa snažíme eliminovať, aby výsledok merania na počítačovom tomografe bol čo najviac podobný referenčnému meraniu, ktoré bolo vykonané na súradnicovom meracom zariadení.

Pri vybraných parametroch sa využije metóda plánovaného experimentu DOE, analýza variantnosti ANOVA a analýza vhodnosti DFA. Keďže bolo vybraných 5 parametrov, ktoré by mohli ovplyvniť meranie, tak boli vybrané hodnoty pre každý parameter. Pri dvoch

parametroch predpokladáme nelineárny vplyv faktora, preto bol nastavený faktor na troch úrovniach. Pri troch parametroch sa predpokladá lineárny vplyv faktora a preto bol nastavený na dvoch úrovniach. V tabuľke 1 môžete vidieť vybrané parametre (faktory) a úrovne, v ktorých prebiehal experiment.

Tabuľka 1 Skúmané parametre (faktory) skenovania a ich úrovne

Faktor \ Počet úrovní	1.	2.	3.
Napätie [kV]	140	170	200
Integračný čas [ms]	400	667	1000
Nastavenie otočného stola [-]	VAST CT	CT	
Počet snímkov [-]	900	1300	
Voxel [μm]	151	199	

3.1 Návrh a výroba experimentálnej súčiastky

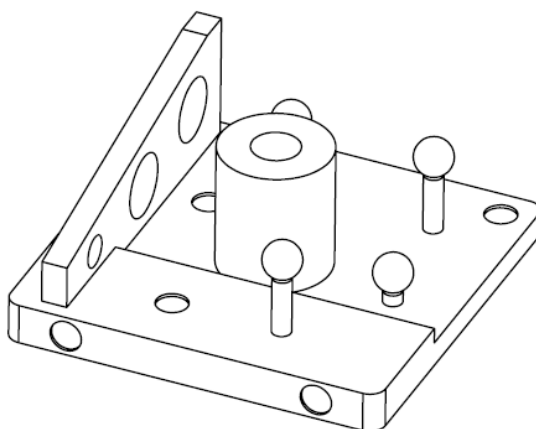
Experimentálna časť práce bude prebiehať na navrhutej súčiastke, ktorá sa skladá z jednoduchých tvarov, z ktorých bude vyhodnotenie základných rozmerových charakteristík ako je vonkajší priemer, vnútorný priemer a vzdialenosť. Pri návrhu súčiastky sme sa inšpirovali „KMG Check“ čo je súčiastka, ktorá sa používa na kontrolu súradnicových meracích strojov vo firme ZEISS podľa normy DIN EN ISO 10360 a VDI/VDE 2617. Na navrhnutie súčiastky bolo niekoľko požiadaviek:

- Obsahovať základné tvary,
- vyrobená z plného materiálu,
- materiál súčiastky z polyméru.

Súčiastka bola štvorcového tvaru s rozmerom 100 x 100 [mm], na ktorom boli štyri guľové piny rôznych priemerov a v rôznych výškach. V strede súčiastky sa nachádzal valec, v ktorom bol umiestnený základný súradnicový systém a súčiastka obsahovala plochu pod uhlom s tromi otvormi rôznych priemerov (Obr.5). Na súčiastke bolo vytvorených 36 charakteristík. Súčiastka obsahovala rozmerové charakteristiky, ako je priemer a vzdialenosť. Tvarové charakteristiky, ako je rovinnosť, valcovitosť, kruhovitosť, rovnobežnosť a charakteristiky polohy, ako je súosovosť a poloha.

Výroba súčiastky prebiehala pomocou aditívnej technológie MultiJet Printing (MJP), ktorý využíva technológiu piezo tlačovej hlavy na nanášanie vrstvy fotopolyméru alebo vytaviteľných voskových materiálov po vrstvách. UV lampa zabezpečuje vytvrdzovanie vstreknutého materiálu. Po vytvorení jednej vrstvy objektu sa pracovná doska posunie v Z osi

o hrúbku jednej vrstvy čo je 16 μm a proces sa zopakuje. MJP sa používa na vytváranie súčiastok s jemnými detailmi, ktoré sa zameriavajú na široké spektrum aplikácií. Veľkou výhodou je odstránenie podporného materiálu (3D systems 2019).



Obr. 5 Navrhnutá súčiastka

Súčiastka bola vyrobená na zariadení od firmy 3D Systems ProJet 2500, ktorého presnosť tlače je 0,025 – 0,050 mm. Materiál súčiastky je fotopolymér s označením VisiJet M2R-WT. Vlastnosti tohto materiálu sú uvedené v tabuľke 2.

Tabuľka 2 Vlastnosti fotopolyméru s označením VisiJet M2R-WT

Technické parametre	
Hustota	1,16 g/cm ³
Pevnosť v ťahu [MPa]	35 – 45 MPa
Pevnosť v ohybe [MPa]	50 – 60 MPa
Lineárna teplotná rozťažnosť materiálu	114,8x10 ⁻⁶ m/mK

3.2 Meranie na súradnicovom meracom stroji a počítačom tomografe

Súčiastka bola zmeraná na súradnicovom meracom stroji od firmy ZEISS. Toto zariadenie je ideálne pre úlohy v oblasti vývoja, výskumu, kalibrácie skúšobných telies, kalibrov a zabezpečenie kvality. Zariadenie ZEISS PRISMO ultra sa nachádza v klimatizovanom prostredí v laboratórnych podmienkach na pôde Materialovotechnologickej fakulty v Trnave s maximálnou dovolenou chybou 0,5+L/500 μm . Výsledky z merania na súradnicovom meracom zariadení považujeme za referenčné hodnoty a voči týmto výsledkom budú porovnávané výsledky získané z počítačovej tomografie.

Metrotom 1500 je priemyselný počítačový tomograf, ktorý má využitie pri zabezpečovaní kvality v meracích a kontrolných laboratóriách, aplikácia v reverznom inžinierstve a nedeštruktívna kontrola súčiastok. Výhodou tejto technológie je, že z jediného skenovania

dokážeme získať informácie o objeme a vonkajšej geometrii súčiastky a nedeštruktívnu kontrolu súčiastok. Nevýhodou je malý merací rozsah zariadenia a skenovanie súčiastok s väčšou hustotou materiálu. Metrotom 1500 je ideálny na skenovanie materiálov ako sú plasty a hliník, ale môžeme skenovať aj súčiastky z ocele a rôznych zliatin, ale len pri určitej hrúbke súčiastky. Zariadenie, na ktorom bola vykonaná experimentálna časť dizertačnej práce sa nachádza na pôde Materiálovotechnologickej fakulty v Trnave v Centrum excelentnosti 5-osevého obrábania (CE5AM). Maximálna dovolená chyba zariadenia je $9 + L/50 \mu\text{m}$.

Pred skenovaním bola súčiastka napolohovaná, aby zaberala v zornom poli čo najväčší obraz, kde sme sa dostali na veľkosť voxelu $151 \mu\text{m}$ pri polovičnom rozlíšení detektora (1024×1024 pixelov). Pri výbere parametrov, ktoré sú uvedené v tabuľke 1, bolo vychádzané z viacerých publikácií. Článok (Angel 2014) hovorí o nastavení parametrov zdroja pri použití súčiastok vyrobených z materiálov plast a kov. Autori článkov (Gómez 2016, Weckenmann 2013) píšú o vplyve počtu snímok na vyhodnotenie skenovanej súčiastky. Prebiehalo niekoľko pokusov skenovania, aby boli zvolené parametre integračného času detektora na zoskenovanie experimentálnej súčiastky. Minimálne parametre na zoskenovanie súčiastky, znamená že pri určení povrchu „surface determination“ a spracovaní dát nevznikli žiadne artefakty. Každá kombinácia parametrov bola skenovaná trikrát. Celkovo bolo urobených 216 skenov, kde najkratšie skenovanie trvalo 11 minút pri použití integračného času 400 ms, VAST technológie skenovania a počet snímok bolo 900. Najdlhšie skenovanie trvalo 54 minút a bolo to pri použití integračného času 1000 ms, CT technológie skenovania a počtu snímok 1300.

3.3 Zariadenie na meranie teploty v prostredí CT zariadenia

V metrologickej praxi, v závislosti od typu merania, je potrebné niekedy monitorovať okolitú teplotu. Ak merania neprebiehajú v laboratórnych podmienkach, teplota je tým vplyvom, ktorý môže prispieť k neistote výsledku merania. Keďže zariadenie ZEISS METROTOM sa nenachádza v klimatizovanom laboratóriu, tak bolo vytvorené zariadenie na meranie okolitej teploty. Zariadenie na meranie teploty je postavené na vývojovej doske s označením WEMOS LOLIN32 Lite ESP32. Na túto vývojovú dosku boli prispájkované dva teplomery s označením ds18B20, ktoré sa nachádzajú v prostredí zariadenia METROTOM 1500. Jeden teplomer s označením T2, sa nachádzal nad zdrojom röntgenového žiarenia a druhý teplomer s označením T1 je nad detektorom, ktorý zaznamenáva röntgenové žiarenie a premieňa ho na elektrický signál. Teplotný rozsah je od -55°C až po $+125^{\circ}\text{C}$, kde presnosť merania je $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Teplota prostredia sa merala z dôvodu, aby bolo minimalizované okolité prostredie, ktoré môže vplyvať na výsledok merania a zahrnúť ho do merania. Meranie teploty, prebiehalo pred každým

začatým skenovaním meraného objektu a bolo sledované v aplikácii BLYNK CC (Obr. 6), ktorá bola spárovaná s vývojovou doskou WEMOS LOLIN 32 Lite ESP32. Batéria na napájanie tohto zariadenia nám slúžila Power bank s kapacitou 2200 mAh.



Obr. 6 Aplikácia BLYNK CC

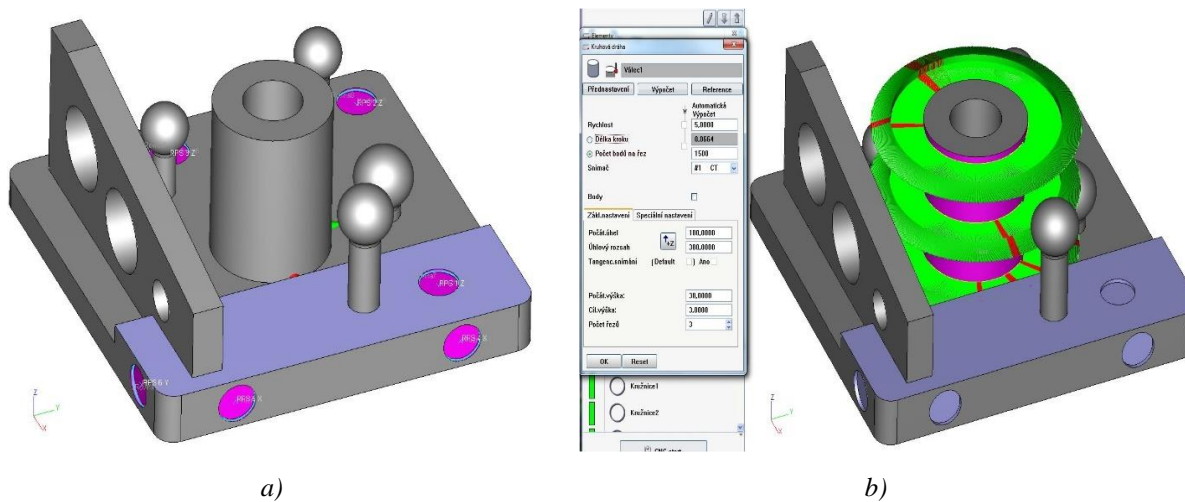
Zelenou farbou, bol označený teplomer T2, ktorý sa nachádzal nad zdrojom röntgenového žiarenia a červenou bol označený teplomer T1 nad detektorom.

3.4 Vytvorenie meracieho programu v softvéri CALYPSO

Na meranie súčiastky bolo potrebné vytvoriť merací program, ktorý bol použitý aj pre meranie na súradnicovej meracej technike a zároveň aj na počítačovom tomografe. Merací program bol vytvorený v softvéri CALYPSO, kde sme načítali CAD model a následne vytvorili základný súradnicový systém podľa výkresovej dokumentácie a to metódou RPS 3-2-1 (Obr. 7a). Na súčiastke bolo 6 kruhových vybratí, v strede ktorých sa nachádzal daný RPS bod. Ktorého hodnoty boli v osiach X, Y a Z voči nule na súčiastke. Základným súradnicovým systémom sme odobrali 6 stupňov voľnosti (3 rotačné a 3 translačné). Pracovali sme so surovými dátami, ktoré boli načítané do softvéru vo formáte uint16_scv.

Po vytvorení základného súradnicového systému, bol vytvorený bezpečnostný kváder z CAD modelu vo vzdialenosti 10 mm od okrajov súčiastky, ktorý zabezpečuje, aby neprišlo ku kolízií pri meraní. Vytvorenie stratégií merania a upravenie parametrov stratégie, bolo podľa knihy od firmy ZEISS „Cookbook for measurement“ (Kuchárka pre meranie), ktorá odporúča nastavenia od zvolenia veľkosti snímača až po počet bodov. Pri meraní vonkajšieho priemeru bol použitý rubínový snímač s priemerom 3 mm. Pri nastavení stratégie bolo meranie pomocou valca, kde boli zvolené 3 rezy (Obr. 7b). Prvý rez bol 3 mm pod hornou plochou až po cieľovú výšku 38 mm. Rýchlosť skenovania bola 5 mms^{-1} a počet bodov na jeden rez bol 1500 bodov.

Uhlový rozsah skenovania bol zvolený 380° , aby prvých 10° a posledných 10° bolo eliminovaným nájzdom a odjazdom snímača od súčiastky.



Obr. 7 Vytvorenie meracieho programu pre navrhnutú súčiastku v softvéri CALYPSO
 a) Vytvorenie základného súradnicového systému b) Stratégia merania valca pomocou kruhovej dráhy

Filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt boli tiež nastavené podľa odporúčaní knihy Cookbook for measurement, Pri priemere 30 mm, bol nastavený filter s veľkosťou 150 UPR Gaussov filter. Eliminácia odľahlých hodnôt bola nastavená $\pm 3s$, prefilter 10 – 5000 vln/ot, 5 susedných bodov. Nastavenia boli použité podľa výkresovej dokumentácie a to závisí od veľkosti daného elementu a použitia meracieho elementu. To znamená či element sa používa na geometrický tvar, na vyhodnotenie polohy, alebo na otvor pre 2D polohu. Meranie teploty pomocou skonštruovaného zariadenie na meranie teploty a lineárnej teplotnej rozťažnosti materiálu, bolo použité pre všetkých 216 vyhodnotení naskenovaných dát v softvéri CALYPSO (Obr. 8). Rovnaký program bol použitý pre meranie na CMM zariadení aj CT zariadení.

<input checked="" type="checkbox"/>	Tepl.kompensace zapnout/vypnout	
<input type="checkbox"/>	Použití/nepoužití tepl.senzor	
Teplota součásti ze senzoru ...		
1+2		
Teplota	Koeficient	Kor.f. <μ/m>
Součást		
26,000	114,80	-688,800000
Měřitko X		
20,000	7,80	0,0000000
Měřitko Y		
20,000	7,80	0,0000000
Měřitko Z		
20,000	7,80	0,0000000

Obr. 8 Teplotná kompenzácia v softvéri CALYPSO

4 VYHODNOTENIE NAMERANÝCH ÚDAJOV

Súčiastka bola zmeraná na dotykovom aj bezkontaktnom zariadení, kde boli získané informácie o rozmerových charakteristikách súčiastky, tak aj informácie tvaru a polohy. Výsledky z dotykovej technológie považujeme za referenčné hodnoty a voči týmto hodnotám budeme porovnávať hodnoty z bezkontaktného technológie z počítačovej tomografie. V danej práci sa budeme zaoberať rozmerovými charakteristikami, ako je priemer a vzdialenosť. Rozmerové charakteristiky sme rozdelili na vnútorné a vonkajšie. Namerané a vyhodnotené dáta boli spracované pomocou štatistického softvéru Minitab a pomocou MS Excel.

4.1 Vonkajšie rozmerové charakteristiky

Vonkajšie rozmerové charakteristiky, ako je priemer s označením „D“ sú také, kde vektor nameraných bodov smeruje kolmo od osi daného elementu a sú na povrchu súčiastky. Bolo vyhodnotených 5 rozmerových charakteristík pre vonkajšie elementy. Valec s priemerom 30 mm, guľový pin s priemerom 15 mm a 12 mm, vzdialenosť $Y=100$ mm a $Y1=100$ mm. Vonkajší valec s priemerom 30 mm, bude podrobne opísaný a podobným spôsobom boli vyhodnotené aj ostatné vonkajšie rozmerové charakteristiky.

Vonkajší Valec s priemerom 30mm

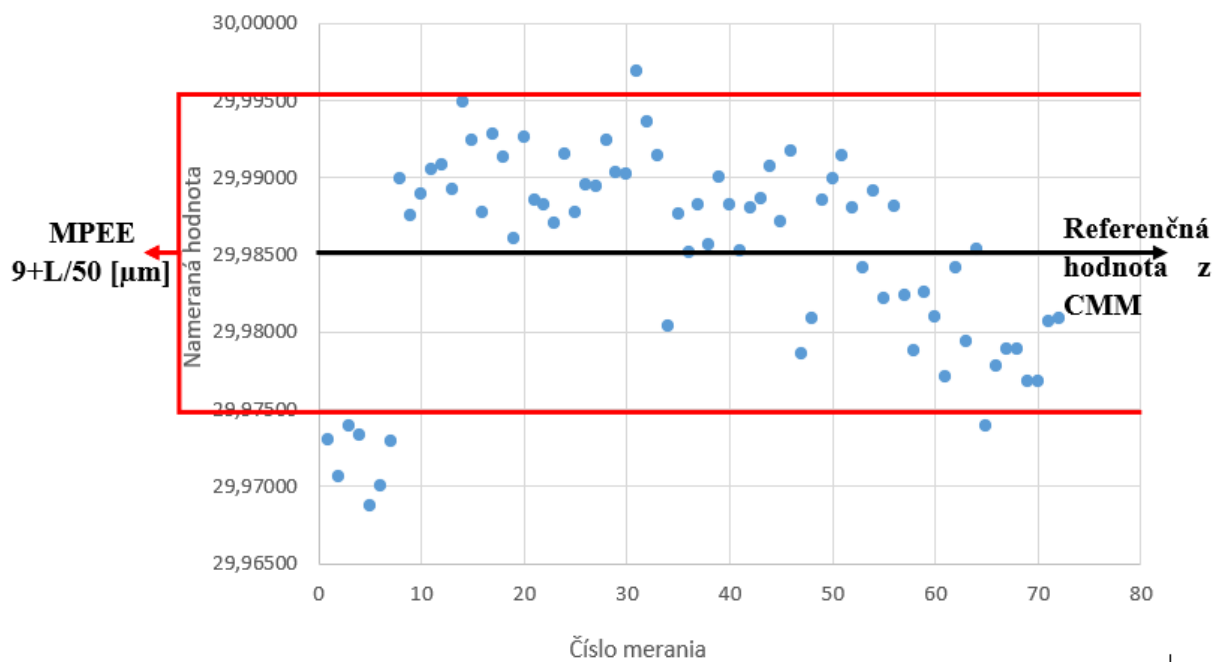
Meranie na súradnicovej meracej technike prebiehalo v laboratórnych podmienkach pri 20°C na zariadení ZEISS PRISMO ultra a bolo urobených 5 po sebe opakovaných meraní. Tieto hodnoty považujeme za referenčné a voči týmto hodnotám boli porovnávané namerané hodnoty z počítačovej tomografie na zariadení ZEISS METROTOM 1500. Na CT zariadení bolo navrhnutých 72 kombinácií parametrov skenovania a každá kombinácia bola naskenovaná 3 krát po sebe v čo najkratšom časovom úseku pri splnení podmienok opakovateľnosti. V tabuľke 3 sú výsledky merania z oboch technológií pre Valec s priemerom 30 mm.

Tabuľka 3 Namerané dáta pre vonkajší Valec s priemerom 30 mm

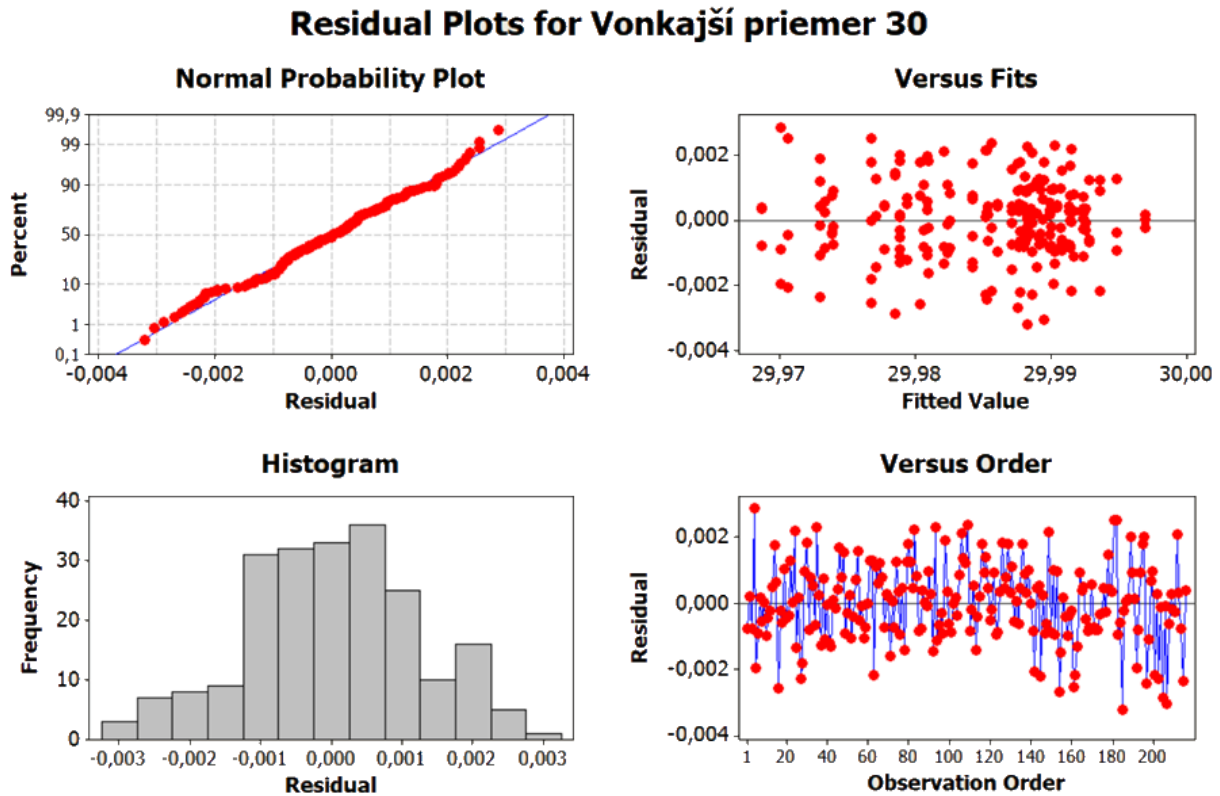
Valec s priemerom 30 mm		
ZEISS PRISMO ultra	Stredná hodnota [mm]	29,98528
	Smerodajná odchýlka [mm]	0,00063
ZEISS METROTOM 1500	Stredná hodnota [mm]	29,98504
	Smerodajná odchýlka [mm]	0,00660
	Maximum [mm]	29,99629
	Minimum [mm]	29,96871
	Rozptyl [mm]	0,02758

Pri vyhodnotení dát z počítačovej tomografie bolo zistené, že prvých 7 meraní vykazovalo najväčší rozdiel od referenčného merania (Obr. 9). Bolo to zapríčinené kombináciou parametrov, kde boli nastavené najnižšie parametre, ako je napätie 140 kV a integračný čas 400 ms. Tieto parametre najviac ovplyvňujú výsledok merania. Pri zvýšení integračného času, sa na meranie obrazu použije viac fotónov a to spôsobí jasnejší obrazový signál a lepšiu rekonštrukciu dát. Do grafu bol vložený aritmetický priemer z referenčného merania na CMM a hranice maximálnej dovolenej chyby počítačového tomografu. Najbližšie k referenčnej hodnote bola kombinácia parametrov 41 (Napätie – 170 kV, Integračný čas – 1000 ms, VAST technológia, Počet snímok – 900, Voxel – 151 μm), kde bol rozdiel od referenčného merania + 0,0003 mm.

Na Obr. 10 sú grafické vyjadrenia, ktoré boli sledované pri parametre Valca s priemerom 30 mm. Grafy opisujú vlastnosti procesu, kde všetky výsledky z merania sú premietnuté do štatistického vyjadrenia daného sledovaného parametra. Výsledky z merania sa vzťahujú na hladinu významnosti $\alpha=0,05$. Prvý graf zobrazuje normálny graf pravdepodobnosti, kde sa porovnávajú rozloženie nameraných dát s teoreticky dokonalým rozdelením. Ak P-hodnota (P-value) je viac, ako hodnota $\alpha=0,05$, vtedy ide o normálne rozdelenie. Pri ďalšom grafickom znázornení je histogram, ktorého namerané údaje nie sú výrazne zošikmené. Pri grafickom znázornení reziduí, je línia 0, kde na oboch stranách sú hodnoty a kde nie je rozpoznateľný výrazný charakter reziduí.



Obr. 9 Aritmetický priemer výsledkov z CT pre rôzne kombinácie pre vyhodnotenie vonkajšieho Valca s priemerom 30 mm



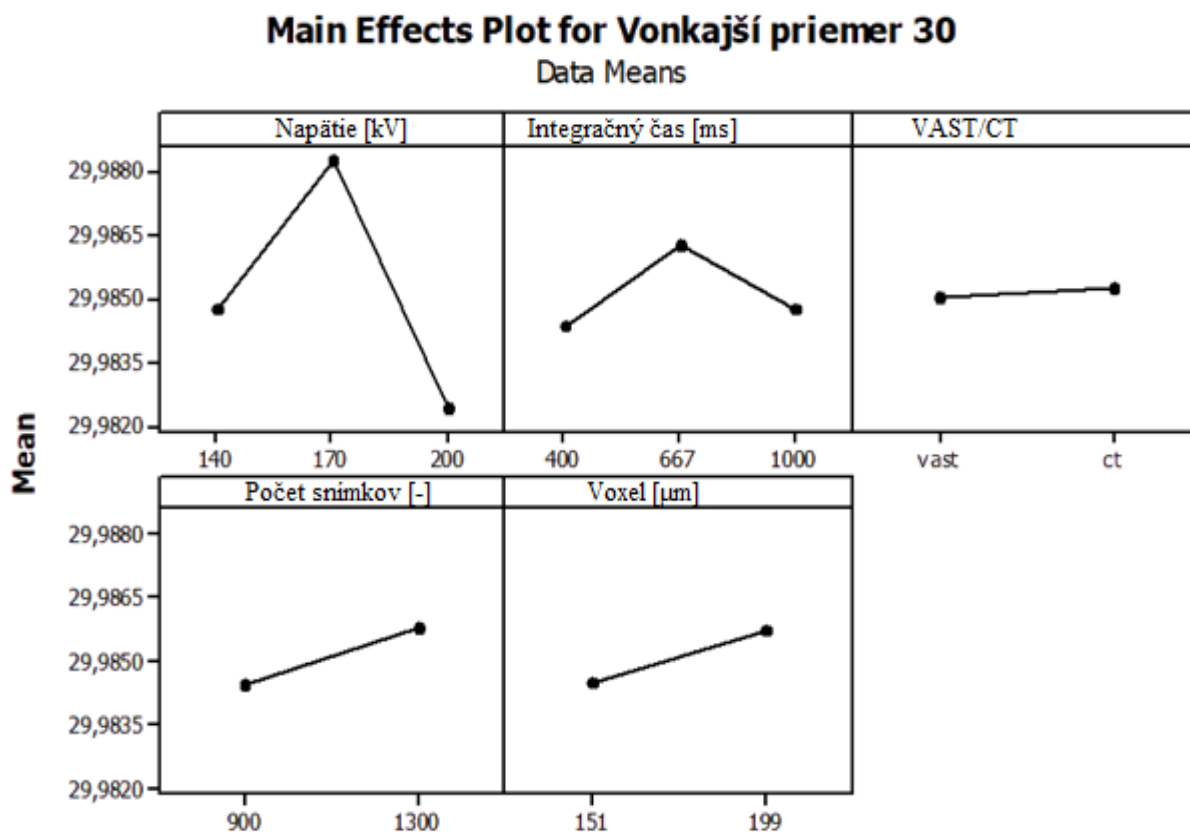
Obr.10 Grafy rezidií pre vonkajší Valec s priemerom 30 mm

V tabuľke 4 je významnosť faktorov, ktoré vplyvajú na vonkajší Valec s priemerom 30 mm. P – hodnota (P – value) $< \alpha = 0,05$ znamená, že daný efekt je štatisticky významný a má vplyv na výsledok merania. Takže pri vyhodnotení vonkajšieho Valca s priemerom 30 mm majú okrem nastavenia otočného stola (VAST/CT), všetky vplyv na výsledok merania. F – hodnota (F – value) $\geq F.INV.RT$ (funkcia v exceli) znamená, že daný efekt je štatisticky významný. R – Sq je koeficient determinácie, čiže ukazovateľ, ktorý vyjadruje kvalitu modelu, alebo spoľahlivosť. Zvyšné % predstavujú parametre, ktoré sa nezahrnuli do ANOVY. R – Sq (adj) je upravený koeficient determinácie, čiže nakoľko model popisuje ten reálny.

Tabuľka 4 Výsledok analýzy ANOVA pre Valec s priemerom 30 mm

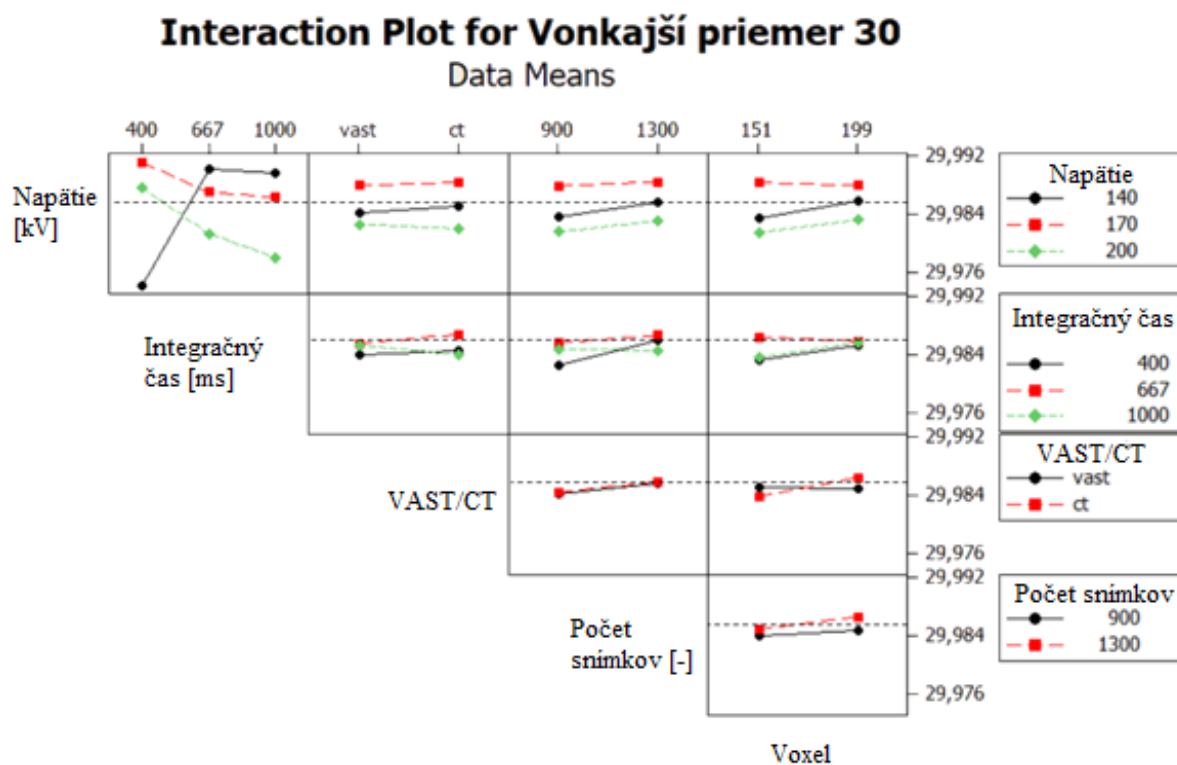
	DF	F - value	P - value
Napätie [kV]	2	295,16	0,000
Integračný čas [ms]	2	33,69	0,000
VAST/CT [-]	1	1,21	0,274
Počet snímkov [-]	1	47,65	0,000
Voxel [μm]	1	37,15	0,000
S = 0,00146		R-Sq = 96,82%	R-Sq(adj) = 95,25%

Na Obr. 11 je znázornený graf hlavných efektov, kde najvýraznejší vplyv na výsledok merania malo napätie. Ako sme predpokladali nelineárny vplyv faktoru, tak pri napätí 170 kV bol najväčší priemer a pri napätí 200 kV bol vonkajší priemer najmenší. Ďalšie výrazné vplyvy, sú pri Integrovanom čase, nastavení počtu snímok a veľkosti voxelu. Menší počet snímok a menšia veľkosť voxelu nám dáva menšie hodnoty priemeru. Nastavenie otočného stola technológiou VAST alebo CT nemalo výrazný vplyv na hodnotu vonkajšieho priemeru.



Obr. 11 Graf hlavných efektov pre vonkajší Valec s priemerom 30 mm

Obr. 12 je grafické znázornenie vzájomných interakcií parametrov, ukazuje vplyv jedného faktoru, kde druhý faktor je zafixovaný na niektorej z nastavenej úrovni faktora. Pri nastavení napätia na hodnotu 140 kV a integrovaného času 400 ms, boli získané najnižšie hodnoty priemeru pri vonkajšom Valci s priemerom 30 mm. Nastavenie napätia na 170 kV a 200 kV malo pri integrovanom čase rovnaký klesajúci priebeh, kde pri najnižšom nastavení integrovaného času pri týchto napätiach boli najväčšie priemery, ako pri zvyšujúcom sa integrovanom čase.



Obr. 12 Graf vzájomných interakcií pre vonkajší Valec s priemerom 30 mm

4.2 Vyhodnotenie celkových vonkajších rozmerových charakteristík

Pri vonkajších rozmerových vyhodnoteniach sme zistili, ktoré parametre skenovania boli najbližšie k referenčnej hodnote a veľkosť rozdielu. Boli poukázané aj vplyvy pre rôzne vonkajšie rozmerové charakteristiky a štatisticky významné faktory, ktoré ovplyvňujú dané vyhodnotenie. V tejto kapitole bude pomocou analýzy vhodnosti DFA (Desirability Function Analysis) určené poradie faktorov, ktoré ovplyvňuje vonkajšie rozmerové charakteristiky na navrhnutej súčiastke vyrobenej pomocou aditívnej technológie.

Bola vytvorená tabuľka, ktorá sa nachádza v prílohách a obsahuje 5 čiastkových indexov vhodnosti. Sú to vonkajšie rozmerové charakteristiky a 72 riadkov pre všetky kombinácie parametrov skenovania. Po vypočítaní čiastkových indexov vhodnosti pre každú charakteristiku, bol vypočítaný komplexný index vhodnosti. V tabuľke 5 sú uvedené vhodné parametre nastavenia skenovania pre vyhodnotenie vonkajších rozmerových charakteristík. Podľa strednej hodnoty indexu vhodnosti boli vybrané optimálne parametre skenovania pre vonkajšie rozmerové charakteristiky, ktoré boli najbližšie k referenčnej hodnote zo súradnicovej meracej techniky a taktiež poradie vplyvu zvolených parametrov skenovania. Pre vonkajšie rozmerové charakteristiky je vhodné použiť parametre skenovania (Napätie – 170 kV, integračný čas – 667 ms, VAST technológia, Počet snímkov – 1300, Voxel – 199 μm).

Tabuľka 5 Indexy vhodnosti pre jednotlivé úrovne parametrov skenovania pre vonkajšie rozmerové charakteristiky

Parametre skenovania	Stredná hodnota indexov vhodnosti			[Min - Max]	Poradie vhodnosti
	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3		
Napätie [kV]	0,591677	0,785679	0,7198	0,194003	1.
Integračný čas [ms]	0,627879	0,73664	0,732637	0,108761	2.
VAST/CT [-]	0,713999	0,684105	0,7198	0,029894	4.
Počet snímok [-]	0,6877	0,710405	0,732637	0,022705	5.
Voxel [μm]	0,682469	0,715635	0,785679	0,033165	3.

Tieto parametre je vhodné použiť pri navrhutej súčiastke z materiálu fotopolyméru s označením VisiJet M2R-WT a pri vonkajších rozmerových charakteristikách. Pri parametroch skenovania VAST/CT počet snímok a voxelov nemal výrazný vplyv, ako pri napätí a integračnom čase.

4.3 Vnútorne rozmerové charakteristiky

Vnútorne rozmerové charakteristiky, ako sú priemery s označením „d“ môžeme zdefinovať tak, kde vektor nameraných bodov smeruje kolmo k osi daného elementu. Pri skenovaní a vyhodnotení vnútorných rozmerových charakteristík, musí röntgenový lúč prechádzať cez určitú vrstvu materiálu, aby sme mohli vyhodnotiť danú rozmerovú charakteristiku. Boli vyhodnotené 3 vnútorné rozmerové charakteristiky. Bola to diera s priemerom 20 mm, vnútorný valec s priemerom 15 mm a diera s priemerom 10 mm. Podrobne bude opísaná diera s priemerom 20 mm a podobným spôsobom boli vyhodnotené aj ostatné vnútorné rozmerové charakteristiky.

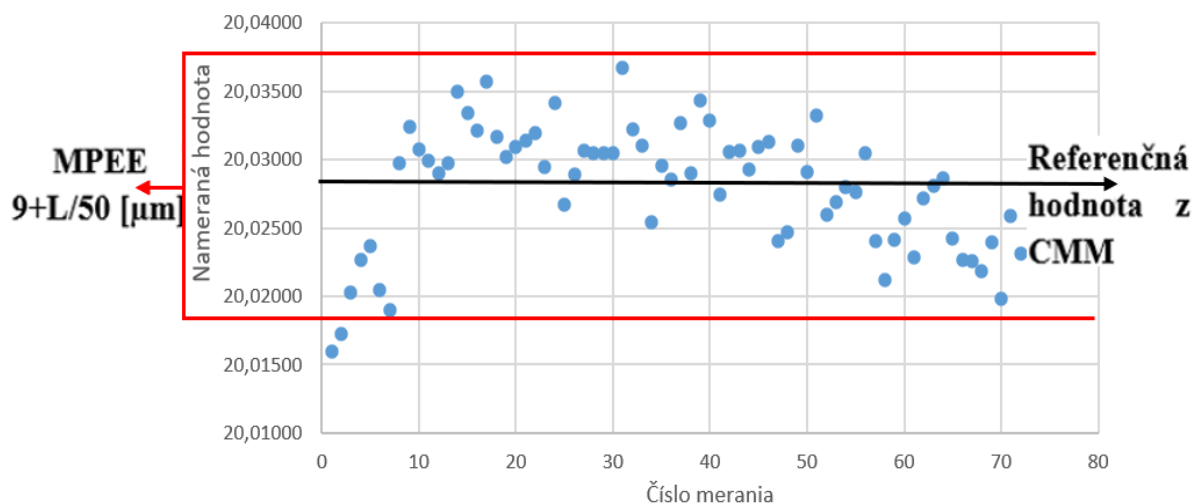
Diera s priemerom 20 mm

Meranie na súradnicovej meracej technike prebiehalo v laboratórnych podmienkach pri 20°C na zariadení ZEISS PRISMO ultra a bolo urobených 5 po sebe opakovaných meraní. Tieto hodnoty považujeme za referenčné a voči týmto hodnotám boli porovnávané namerané hodnoty z počítačovej tomografie na zariadení ZEISS METROTOM 1500. Na CT zariadení bolo navrhnutých 72 kombinácií parametrov skenovania a každá kombinácia bola naskenovaná 3 krát po sebe v čo najkratšom časovom úseku pri splnení podmienok opakovateľnosti. V tabuľke 6 sú výsledky merania z oboch technológií pre dieru s priemerom 20 mm.

Tabuľka 6 Namerané dáta pre diery s priemerom 20 mm

Diera s priemerom 20 mm		
ZEISS PRISMO ultra	Stredná hodnota [mm]	20,02827
	Smerodajná odchýlka [mm]	0,00081
ZEISS METROTOM 1500	Stredná hodnota [mm]	20,02795
	Smerodajná odchýlka [mm]	0,00450
	Maximum [mm]	20,03668
	Minimum [mm]	20,01595
	Rozptyl [mm]	0,02073

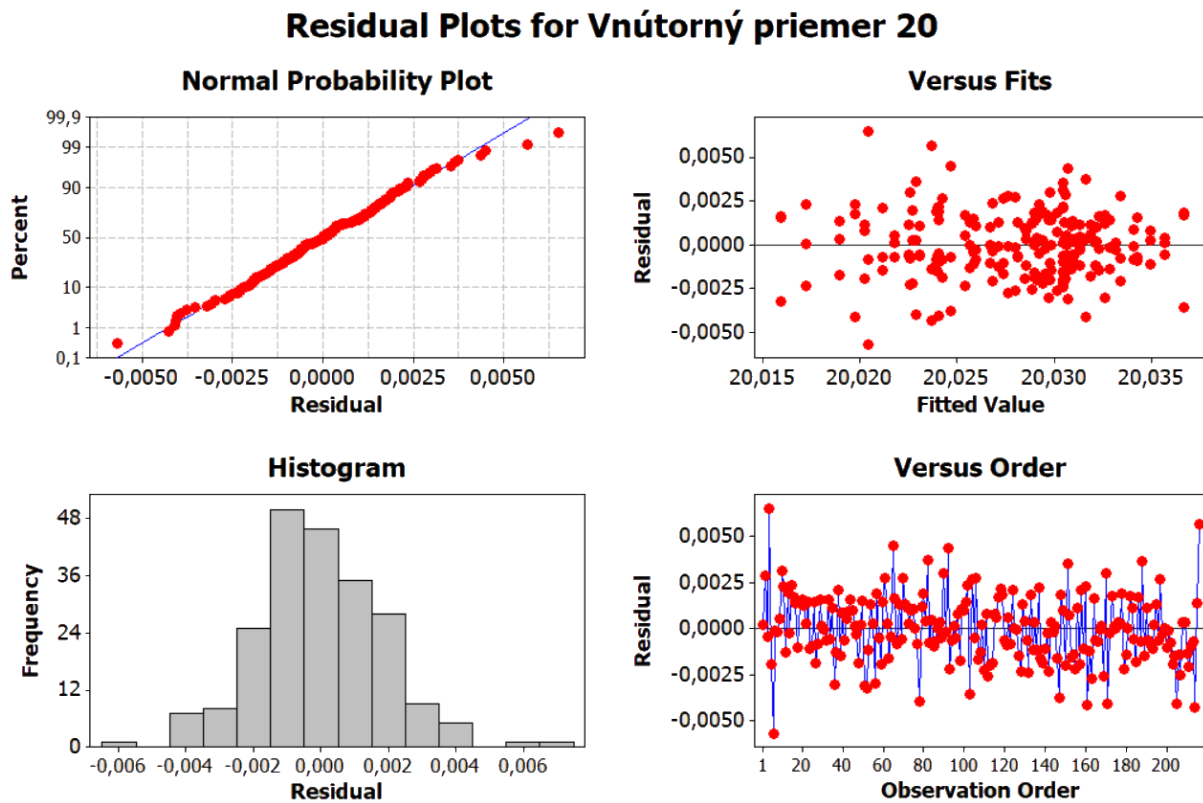
Pri vyhodnotení diery s priemerom 20 mm (Obr. 13), boli dve merania mimo hranice maximálnej dovolenej chyby zariadenia. Pri týchto meraniach bolo nastavené napätie – 140 kV a integračný čas – 400 ms, VAST technológia a počet snímok - 900. Tieto merania vykazovali najväčší rozdiel od referenčnej hodnoty. Pri najnižších parametroch skenovania a len pri zvýšení počtu snímok, sa rekonštrukciou dát zväčšil priemer a výsledok bol v hraniciach MPEe. Do grafu bol vložený aritmetický priemer z referenčného merania na CMM a hranice maximálnej dovolenej chyby počítačového tomografu. Najbližšie k referenčnej hodnote bola kombinácia parametrov 63 (Napätie – 200 kV, Integračný čas – 667 ms, CT technológia, Počet snímok – 1300, Voxel – 151 μm), kde bol rozdiel od referenčného merania + 0,0002 mm.



Obr. 13 Aritmetický priemer výsledkov z CT pre rôzne kombinácie pre vyhodnotenie diery s priemerom 20 mm

Na Obr. 14 sú grafické vyjadrenia, ktoré boli sledované pri vyhodnotení diery s priemerom 20 mm. Grafy opisujú vlastnosti procesu, kde všetky výsledky z merania sú premietnuté do štatistického vyjadrenia daného sledovaného parametra. Výsledky z merania sa vzťahujú na hladinu významnosti $\alpha=0,05$. Prvý graf zobrazuje normálny graf pravdepodobnosti, kde sa

porovnávajú rozloženia nameraných dát s teoreticky dokonalým rozdelením. Ak P-hodnota (P-value) je viac, ako hodnota $\alpha=0,05$, vtedy ide o normálne rozdelenie. Pri ďalšom grafickom znázornení je histogram, ktorého namerané údaje nie sú výrazne zošikmené. Pri grafickom znázornení reziduí, je línia 0, kde na oboch stranách sú hodnoty a kde nie je rozpoznateľný výrazný charakter reziduí.



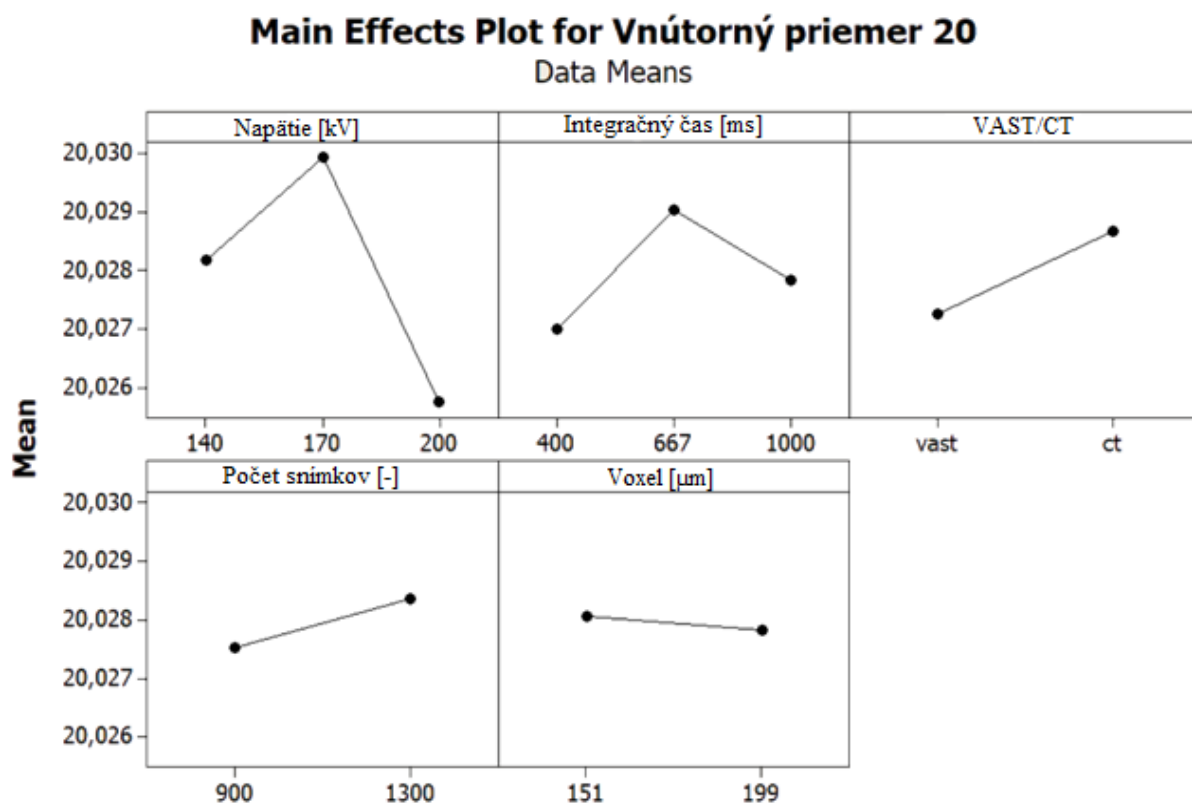
Obr. 14 Grafy reziduí pre diery s priemerom 20 mm

V tabuľke 7 je významnosť faktorov, ktoré vplyvajú na diery s priemerom 20 mm. P – hodnota (P – value) $< \alpha = 0,05$ znamená, že daný efekt je štatisticky významný a má vplyv na výsledok merania. Takže pri vyhodnotení diery s priemerom 20 mm majú okrem veľkosti voxelu všetky nastavenia vplyv na výsledok merania. F – hodnota (F – value) $\geq F.INV.RT$ (funkcia v exceli) znamená, že daný efekt je štatisticky významný. Je to potvrdenie či daný faktor má štatistický vplyv. S – je variabilita náhodných chýb. R – Sq je koeficient determinácie, čiže ukazovateľ, ktorý vyjadruje kvalitu modelu, alebo spoľahlivosť. Zvyšné % predstavujú parametre, ktoré sa nezahrnuli do ANOVy. R – Sq (adj) je upravený koeficient determinácie, čiže nakoľko model popisuje ten reálny.

Tabuľka 7 Výsledok analýzy ANOVA pre diery s priemerom 20 mm

	DF	F - value	P - value
Napätie [kV]	2	62,77	0,000
Integračný čas [ms]	2	15,18	0,000
VAST/CT [-]	1	21,23	0,000
Počet snímkov [-]	1	7,47	0,007
Voxel [μm]	1	0,53	0,468
S = 0,00225		R-Sq = 85,64%	R-Sq(adj) = 78,56%

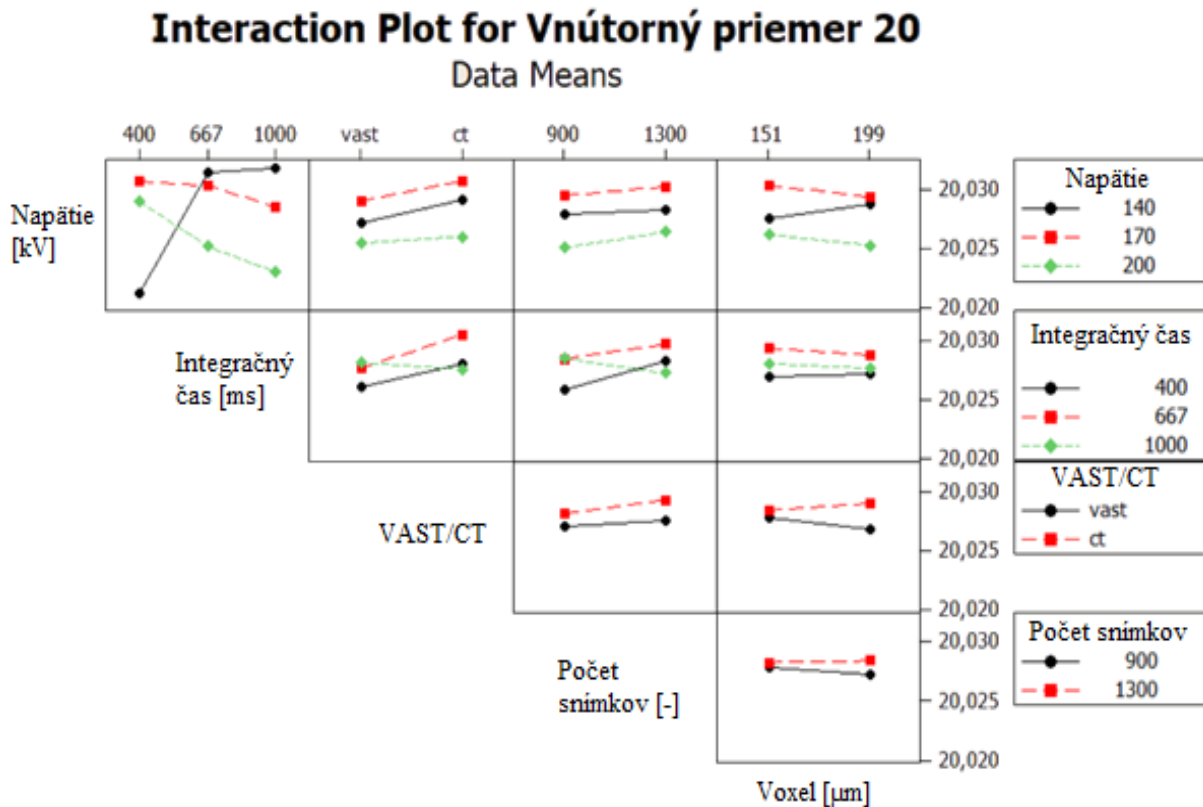
Na Obr. 15 je znázornený graf hlavných efektov, kde najvýraznejší vplyv na výsledok merania malo napätie. Pri nastavení napätia na hodnotu 200 kV vykazoval priemer najnižšiu hodnotu. Pri integračnom čase zasa najmenší priemer otvoru bol pri nastavení 400 ms. Veľký vplyv na výsledok merania pri skenovaní bolo pri nastavení skenovania otočného stola technológiou VAST alebo CT. Hodnoty priemeru 20 mm sa pri znázornenom grafe hlavných efektov pohybovali len v rozptyle 5 μm .



Obr. 15 Graf hlavných efektov pre diery s priemerom 20 mm

Obr. 16 je grafické znázornenie vzájomných interakcií parametrov, ukazuje vplyv jedného faktoru, kde druhý faktor je zafixovaný na niektorej z nastavenej úrovni faktora. Pri nastavení napätia na hodnotu 140 kV a integračného času 400 ms, boli získané najnižšie hodnoty diery s

priemerom 20 mm. Nastavenie napätia na 170 kV a 200 kV malo pri integračnom čase podobný klesajúci priebeh. Zaujímavosťou je integračný čas nastavený na hodnotu 1000 ms pri druhom faktore s nastavením otočného stola a počtom snímkov mal opačný priebeh ako pri nastavení na hodnotu 400 ms a 667 ms.



Obr. 16 Graf vzájomných interakcií pre dieru s priemerom 20 mm

4.4 Vyhodnotenie celkových vnútorných rozmerových charakteristík

Po vypočítaní čiastkových indexov vhodnosti pre každú charakteristiku, bol vypočítaný komplexný index vhodnosti. V tabuľke 8 sú uvedené vhodné parametre nastavenia skenovania pre vyhodnotenie vonkajších rozmerových charakteristík. Podľa strednej hodnoty indexu vhodnosti boli vybrané optimálne parametre skenovania pre vnútorné rozmerové charakteristiky, ktoré boli najbližšie k referenčnej hodnote zo súradnicovej meracej techniky a taktiež poradie vplyvu zvolených parametrov skenovania. Pre vnútorné rozmerové charakteristiky je vhodné použiť parametre skenovania (Napätie – 170 kV, integračný čas – 667 ms, VAST technológia, Počet snímkov – 1300, Voxel – 199 μm).

Tabuľka 8 Indexy vhodnosti pre jednotlivé úrovne parametrov skenovania pre vnútorné rozmerové charakteristiky

Parametre skenovania	Stredná hodnota indexov vhodnosti			[Min - Max]	Poradie vhodnosti
	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3		
Napätie [kV]	0,62164	0,77099	0,69643	0,14935	2.
Integračný čas [ms]	0,59944	0,78413	0,70551	0,18468	1.
VAST/CT [-]	0,70682	0,68590		0,02092	5.
Počet snímok [-]	0,667206	0,725518		0,05831	3.
Voxel [μm]	0,67081	0,72191		0,05109	4.

Poradie parametrov pri vyhodnotení vnútorných rozmerových charakteristík je nasledovné. Najdôležitejší parameter je integračný čas, nasleduje napätie, počet snímok, veľkosť voxela a posledný parameter je nastavenie otočného stola.


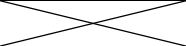
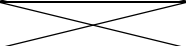
4.5 Vyhodnotenie všetkých rozmerových charakteristík

Na navrhnutú súčiastku vyrobenú pomocou aditívnej technológie MultiJet Printing, boli vyhodnotené vnútorné a vonkajšie rozmerové charakteristiky, ktoré boli zamerané na súradnicovej meracej technike a vyhodnotené v počítačovej tomografii. Pri počítačovej tomografii bolo zvolených 5 parametrov skenovania, ktoré môžu ovplyvniť výsledok merania. Pri dvoch parametroch boli zvolené 3 úrovne, pretože sme predpokladali nelineárny vplyv parametrov na výsledok merania. Pri troch parametroch boli zvolené 2 úrovne nastavenia skenovania. Bol urobený úplný experiment so 72 kombináciami skenovania a každá kombinácia, bola opakovane meraná 3-krát. Spolu sme mali 216 meraní na počítačovom tomografe. Program na vyhodnotenie bol rovnaký pre obe technológie merania. Výsledky z oboch technológií, boli spracované v MS Excel a štatistickom softvéri Minitab. Pre vhodné zvolenie parametrov skenovania bola použitá analýza vhodnosti DFA (Desirability Function Analysis).

Bola vytvorená tabuľka, ktorá sa nachádza v prílohách a obsahuje 8 čiastkových indexov vhodnosti. Sú to celkové rozmerové charakteristiky a 72 riadkov pre všetky kombinácie parametrov skenovania. Výpočtom strednej hodnoty indexov vhodnosti sme zistili, na ktorej úrovni sú hodnoty z merania na počítačovom tomografe najbližšie k referenčnej hodnote získanej zo súradnicovej meracej techniky. Pri vyhodnotení vonkajších aj vnútorných rozmerových charakteristík sme zistili, že pri navrhnutú súčiastke sú optimálne parametre skenovania (Napätie – 170 kV, Integračný čas – 400 ms, VAST technológia, Počet snímok –

1300, Voxel - 199 μm). Poradie vhodnosti parametrov bolo uvedené v tabuľke 9. Pri meraní súčiastky je najdôležitejšie nastavenie napätia zdroja a integračného času detektora. Pri veľkosti voxela, nastavení otočného stola a počtu snímok nebol výrazný vplyv faktora na výsledok merania. Pretože pri jednotlivých vnútorných rozmerových charakteristikách, bolo optimálne nastavenie veľkosti voxela na hodnotu 151 μm , ale pri celkovom vypočítaní indexu vhodnosti bolo optimálne nastavenie veľkosti voxela na hodnotu 199 μm . Pretože väčšie odchýlky od referenčného merania vznikli pri nastavení voxela 151 μm s kombináciou iných parametrov skenovania.

Tabuľka 9 Indexy vhodnosti pre jednotlivé úrovne parametrov skenovania pre celú súčiastku

Parametre skenovania	Stredná hodnota indexov vhodnosti			[Min - Max]	Poradie vhodnosti
	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3		
Napätie [kV]	0,57931	0,81931	0,40470	0,41460	1.
Integračný čas [ms]	0,73411	0,70392	0,50891	0,22519	2.
VAST/CT [-]	0,70290	0,67745		0,02545	5.
Počet snímok [-]	0,67160	0,70874		0,03713	4.
Voxel [μm]	0,66236	0,71798		0,05562	3.

Tieto parametre skenovania je vhodné použiť pre súčiastky podobného tvaru a materiálu, ako je uvedená súčiastka. Stredná hodnota indexov vhodnosti pri použitej súčiastke je najväčšia pri použitom napätí 170 kV ako pri veľmi vysokých napätiach. Pri integračnom čase je lepšie použiť menšie nastavenia ako je 400 ms pri napätí 170 kV ako keď použijeme príliš veľký integračný čas až 1000 ms. Nastavenie veľkosti voxela nemal výrazný vplyv ako napätie a integračný čas pri daných rozmerových charakteristikách, čo sme si potvrdili aj článkom od autorky (Kritikos 2019). Veľkosť voxela by sa mala nastaviť čo najnižšia, pri hodnotení vnútorných defektov ako sú póry, inklúzie alebo rôzne defekty v súčiastke, kde by mal tento parameter výraznejší vplyv, ako pri rozmerových charakteristikách. Mohlo by to byť ďalším predmetom skúmania určenia vplyvu voxela pri hodnotení vnútorných defektov ako sú póry a inklúzie. Pri nastavení počtu snímok je lepšie použiť väčší počet snímok, ale čas sa predlžuje pri skenovaní súčiastky. Nastavenie otočného stola technológiou VAST a CT, (rozdiel medzi technológiami v kapitole 4) mal najmenší vplyv na vyhodnotenie presnosti. Preto je vhodné používať VAST technológiu, pretože sa urýchli čas skenovania.

5 PRÍNOSY

V tejto kapitole sú uvedené prínosy, ktoré boli získané počas vypracovania experimentálnej časti dizertačnej práce pre technickú prax, vedný odbor aj pedagogickú oblasť.

1. Študijný odbor: 5.2.51 Výrobné technológie

- a. Študijný program: Počítačová podpora výrobných technológií – 1 stupeň
 - i. **Úvod do počítačovej podpory výrobných technológií** (1. ročník / II. semester).
 - ii. **CAQ** (3. ročník / V. semester).

2. Študijný odbor: 5.2.51 Výrobné technológie

- a. Študijný program: Výrobné technológie – 1 stupeň
 - i. **Metrológia a kvalita technologických procesov** (3. ročník / VI. semester).

3. Študijný odbor: 5.2.51 Výrobné technológie

- a. Študijný program: Obrábanie a tvárnenie – 2 stupeň
 - i. **Meranie a kontrola parametrov výrobkov** (1. ročník / II. semester),

4. Študijný odbor: 5.2.51 Výrobné technológie

- a. Študijný program: Počítačová podpora návrhu a výroby – 2 stupeň
 - i. **Ateliér počítačovej podpory návrhu a výroby I** (1. ročník / I. semester).

- Výber a zdôvodnenie výberu vhodných kombinácií parametrov skenovania pre dosahovanie verných a presných výsledkov má praktický prínos.
- Poradie vhodnosti vybraných parametrov pri skenovaní vonkajších a vnútorných rozmerových charakteristík.
- Návrh vhodných parametrov skenovania na počítačovom tomografe na súčiastke z polyméru: Vhodné parametre pre vnútorne rozmerové charakteristiky, vhodné parametre pre vonkajšie rozmerové charakteristiky a celkové vhodné parametre pre skenovanie a meranie navrhutej súčiastky na počítačovom tomografe.
- Závislosti vybraných parametrov skenovania a výsledkom meraní na navrhutej súčiastke a grafické znázornenie závislosti pomocou štatistického softvéru Minitab.
- Navrhnutá súčiastka, ktorá môže slúžiť aj na vyhodnotenie tvarových charakteristík na počítačovom tomografe.

ZÁVER

Ciele a požiadavky dizertačnej práce boli splnené v plnom rozsahu, ktorého zadaním bolo výskum aplikácie počítačovej tomografie v meraní. Práca obsahuje:

Literárna štúdia – podrobný prehľad o vlastnostiach röntgenového žiarenia a vzniku röntgenového žiarenia, ktoré väčšinou pochádza z radiačných interakcií. Röntgenové lúče sa šíria a prechádzajú cez materiál objektu, kde sa znižuje intenzita žiarenia. Bola opísaná interakcia röntgenového žiarenia s meraným objektom a detekcia röntgenového žiarenia. Ďalšia časť literárnej štúdie je venovaná priemyselnej počítačovej tomografii, kde sú opísané základné časti priemyselných počítačových tomografov. Základnými časťami sú zdroj generovania röntgenového žiarenia, detektor a polohovací systém zariadenia. Ďalšou významnou časťou je zariadenie na spracovanie dát získanej pomocou počítačovej tomografie. Pri meraní na CT zariadení vznikajú artefakty, čo sú systematické nezrovnalosti, ktoré sa nenachádzajú v pôvodnom skenovanom objekte. Rôzne podmienky nastavenia merania, však môžu vyvolať artefakty pri rekonštrukcii nameraných dát. Táto časť predstavuje najvýznamnejšie obrazové artefakty vyskytujúce sa v počítačovej tomografii a podmienky, pri ktorých tieto artefakty vznikajú. Poslednou časťou je použitie počítačovej tomografie.

Stanovenie cieľov dizertačnej práce – keďže sa počítačová tomografia začala presadzovať aj v oblasti priemyselnej metrológie, kde sa kladie čoraz väčší dôraz na presnosť merania a rýchlosť merania. Boli stanovené ciele práce na základe literárnej štúdie a prieskumu v oblasti priemyselnej počítačovej tomografie, keďže patrí medzi novšie technológie, tak v literárnej štúdie je zistených veľmi veľa vplyvov alebo parametrov, ktoré môžu ovplyvniť presnosť merania. Bol vytvorený Ishikawa diagram, kde boli prehodnotené a vložené vplyvy v konzultácií s odbornými pracovníkmi, ktoré ovplyvňujú výsledok merania. Cieľom dizertačnej práce je určenie vplyvu vybraných parametrov skenovania na presnosti vyhodnotenia navrhutej súčiastky, vyrobenej pomocou aditívnej technológie. Pre splnenie hlavného cieľa bolo potrebné splniť aj čiastkové ciele dizertačnej práce.

Návrh experimentálnej časti práce – bolo vybraných 5 parametrov skenovania, ktoré ovplyvňujú výsledok merania z vytvoreného Ishikawa diagramu. Pomocou metódy plánovania experimentu DOE, bol navrhnutý úplný experiment. Dva faktory boli navrhnuté na 3 úrovniach, pretože sme nepredpokladali lineárny vplyv faktora na výsledok merania. Pri troch faktoroch bol navrhnutý experiment na dvoch úrovniach, pretože sa predpokladal lineárny vplyv faktora. Bol vytvorený experiment so 72 kombináciami parametrov skenovania. Ďalšou časťou bolo

navrhnutie experimentálnej súčiastky a jej vyrobenie pomocou aditívnej technológie. Inšpirácia pri navrhnutých súčiastke bola zo súčiastky pre kontrolu súradnicových zariadení a vytvorenie rovnakého meracieho programu pre použitie na súradnicovej meracej technike a počítačovej tomografií.

Výsledky analýz experimentálnej práce – sú uvedené v každej prislúchajúcej kapitole. Výsledky z počítačovej tomografie sú porovnané voči referenčným hodnotám zo súradnicovej meracej techniky a interpretované pomocou analýz DFA a ANOVA. Vplyv parametrov bol zisťovaný na rozmerových charakteristikách na navrhnutých súčiastke. Rozmerové charakteristiky boli hodnotené na vonkajších a vnútorných elementoch súčiastky. Pre každú rozmerovú charakteristiku boli zistené optimálne parametre, ktoré sú najbližšie k referenčnej hodnote a vplyv faktora pomocou štatistického softvéru Minitab. Pre vonkajšie rozmerové charakteristiky je vhodné použiť parametre skenovania (Napätie – 170 kV, integračný čas – 667 ms, VAST technológia, Počet snímok – 1300, Voxel – 199 μm). Pri vonkajších charakteristikách je najdôležitejšie nastaviť vhodné parametre napätia potom integračného času, veľkosti voxela, nastavenie otočného stola a nakoniec počet snímok, pri nami navrhnutých veľkostiach parametrov skenovania. Pre vnútorné rozmerové charakteristiky je vhodné použiť parametre skenovania (Napätie – 170 kV, integračný čas – 667 ms, VAST technológia, Počet snímok – 1300, Voxel – 199 μm). Pri vnútorných charakteristikách je najdôležitejšie nastaviť vhodné parametre integračného času potom napätia, počtu snímok, veľkosti voxela a nakoniec nastavenie otočného stola pri nami navrhnutých veľkostiach parametrov skenovania. Pri vyhodnotení vonkajších aj vnútorných rozmerových charakteristík, sme zistili, že pri navrhnutých súčiastke sú optimálne parametre skenovania (Napätie – 170 kV, Integračný čas – 400 ms, VAST technológia, Počet snímok – 1300, Voxel - 199 μm). Poradie vhodnosti parametrov je napätie, integračný čas, veľkosť voxela, počet snímok a nastavenie otočného stola. Danými parametrami sme chceli poukázať vplyv a poradie vhodnosti pri vyhodnotení rôznych rozmerových charakteristík pri vonkajších a vnútorných elementoch na súčiastke.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

Ametova E., Probst G., Dewulf W., 2018. X-ray Computed Tomography Devices and Their Components. Springer ISBN 978-3-319-59571-9

Buzug T., 2008. Computed tomography: from photon statistics to modern cone-beam CT. Springer, Berlin

Carmignato S., Dewulf W., 2018. Industrial X-Ray Computed Tomography. Springer ISBN 978-3-319-59571-9

De Chiffre L., Carmignato S., Kruth J-P., Schmitt R., Weckenmann A. 2014. Industrial applications of computed tomography. Ann CIRP 63(2):655–677. doi:10.1016/j.cirp. 2014.05.011

Hsieh J., 2009. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. SPIE, Bellingham

Kat'uch P., Živčák J., 2010. Priemysel'ná tomografia. Nový rozmer v metrológii. [cit 201-11-20]. Dostupné na internete: <http://web.tuke.sk/smetrologia/podklady/metro2010.pdf>

Krejzek L., 2016. Využití počítačové tomografie v rámci kontroly kvality ve strojírenském průmyslu [cit. 2020-03-04]. Dostupné na internete: <https://dspace.cvut.cz>

Kruth J-P., Bartscher M., Carmignato S., Schmitt R., De Chiffre L., Weckenmann A. 2011. Computed tomography for dimensional metrology. Ann CIRP 60(2):821–842. doi:10.1016/j.cirp.2011.05.006

Panetta D., 2016. Advances in X-ray detectors for clinical and preclinical computed tomography. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A 809:2–12

Zajac J., 2010. Rontgenová rádiografia [cit. 2020-03-04]. Dostupné na internete: https://is.muni.cz/th/d3ei5/Bakalarska_praca.pdf

Ferrucci M., Leach R., Giusca C., Carmignato S., Dewulf W., 2015. Towards geometrical calibration of X-ray computed tomography systems. Meas Sci Technol 26(August):92003. doi:10.1088/0957-0233/26/9/092003

Villarraga-Gómez H., Clark D., Smith S. 2016. Effect of the number of radiographs taken in CT for dimensional metrology. In: Proceedings of euspen's 16th International

Weckenmann A., Krämer P. 2013. Predetermination of measurement uncertainty in the application of computed tomography. Prod Lifecycle Manag: Geom Var 317–330

Kritikos M. 2020. Effect of the Voxel Size on the Final Scan Accuracy in Computed Tomography. In book: Proceedings of the International Symposium for Production Research 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-31343-2_37

ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI**ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch**

ADC01 KRITIKOS, Michaela [Samardžiová, Michaela,] - CONCEPCIÓN MAURE, Lissette - LEYVA CÉSPEDES, Alfredo Alejandro - DELGADO SOBRINO, Daynier Rolando - HRUŠECKÝ, Róbert. A Random Factorial Design of Experiments Study on the Influence of Key Factors and Their Interactions on the Measurement Uncertainty: A Case Study Using the ZEISS CenterMax. In *Applied Sciences*. Vol. 10, iss. 1 (2020), s. 1-14. ISSN 2076-3417 (2018: 2.217 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.379 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/app10010037 ; SCOPUS: 2-s2.0-85078938102 ; WOS: 000509398900037 ; CC: 000509398900037.

ADF Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

ADF01 URMINSKÝ, Ján - HRUŠECKÝ, Róbert. Vplyv technologických pohybov elektrónového lúča na vlastnosti zvarových spojov zliatiny hliníka AW2099. In *Zvárač - profesionál*. Roč. 16, č. 4 (2019), s. 11-14. ISSN 1336-5045.

AEC Vedecké práce v zahraničných recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

AEC01 LECKÝ, Šimon - VÁCLAV, Štefan - MICHAL, Dávid - HRUŠECKÝ, Róbert - KOŠTÁL, Peter - MOLNÁR, Ivan. Assembly tool manufacturing and optimization for polylactic acid additive manufacturing. In *Novel Trends in Production Devices and Systems V (NTPDS V) : Special topic volume with invited peer reviewed papers only*. 1. vyd. Zurich : Trans Tech Publications, 2019, S. 152-162. ISSN 0255-5476. ISBN 978-3-0357-1515-6. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85066279572.

AEC02 MICHAL, Dávid - HRUŠECKÝ, Róbert - KOŠTÁL, Peter - MOLNÁR, Ivan. Analysis of shape and dimensional deformation of the model with a precision circular hole produced by digital light processing (DLP) additive technology. In *Materials Science Forum*. Vol. 994, (2020), s. 213-220. ISSN 0255-5476 (2018: 0.173 - SJR, Q3 - SJR Best Q).

AEC03 MICHAL, Dávid - HRUŠECKÝ, Róbert - GÖRÖG, Augustín - MILDE, Ján - ŠIMON, Štefan. Analysis of shape and dimensional deformation of the gear made by digital light processing (DLP) additive technology and measured by industrial tomography. In *Materials Science Forum*. Vol. 994, (2020), s. 205-212. ISSN 0255-5476 (2018: 0.173 - SJR, Q3 - SJR Best Q).

AEC04 MOLNÁR, Ivan - HRUŠECKÝ, Róbert - MOROVIČ, Ladislav - GÖRÖG, Augustín. Observation of shape and dimensional accuracy changing of parts in time intervals manufactured by additive method fused deposition modeling. In *Novel Trends in Production Devices and Systems IV (NTPDS IV) : Special topic volume with invited peer reviewed papers only*. 1. vyd. Zurich : Trans Tech Publications, 2018, S. 182-189. ISSN 0255-5476. ISBN 978-3-0357-1265-0. V databáze: DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.919.182 ; SCOPUS: 2-s2.0-85045434772.

AEC05 URMINSKÝ, Ján - MARÔNEK, Milan - BÁRTA, Jozef - LOPATKOVÁ, Michaela - HRUŠECKÝ, Róbert. Influence of electron beam technological movements on aluminium alloy AW2099 welded joints properties. In *Materials Science Forum*. Vol. 994, (2020), s. 36-43. ISSN 0255-5476 (2018: 0.173 - SJR, Q3 - SJR Best Q).

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC01 HRUŠECKÝ, Róbert - MOLNÁR, Ivan - GÖRÖG, Augustín - MICHAL, Dávid. The influence of computed tomography detector resolution on measured values of shape and dimensional accuracy of component produced by material jetting process. In *Annals of DAAAM International Symposium 2019 [USB] : Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 20. - 27. 10. 2019, Zadar, Croatia*. 1. vyd. Viedeň : DAAAM International, 2019, S. 1-7. ISSN 2304-1382. ISBN 978-3-902734-23-5. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85077861255.

AFC02 KURUC, Marcel - VOZÁR, Marek - ŠIMNA, Vladimír - VOPÁT, Tomáš - HRUŠECKÝ, Róbert - MILDE, Ján - BURANSKÝ, Ivan - NECPAL, Martin - PETERKA, Jozef. Comparison of high feed machining with conventional milling in terms of dimension accuracy and productivity. In *Annals of DAAAM 2018 [elektronický zdroj] : Volume 29, No. 1. The 29th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Zadar, Croatia, 21. - 28. 10. 2018*. 1. vyd. Vienna : DAAAM International, 2018, USB, s. 1-9. ISSN 2304-1382. ISBN 978-3-902734-21-1. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85060074962.

AFC03 MILDE, Ján - HRUŠECKÝ, Róbert - ZAUJEC, Rudolf - MOROVIČ, Ladislav - GÖRÖG, Augustín. Research of ABS and PLA materials in the process of fused deposition modeling method. In *Annals of DAAAM for 2017 [elektronický zdroj] : Volume 28, No.1. The 28th DAAAM International Symposium. Zadar, Croatia, 08-11th November 2017*. 1. vyd. Vienna : DAAAM International, 2017, CD-ROM, [9] s. ISSN 2304-1382. ISBN 978-3-902734-14-3. V databáze: SCOPUS: DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.114.

Štatistika: kategória publikačnej činnosti

ADC	Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch	1
ADF	Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch	1
AEC	Vedecké práce v zahraničných recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách	5
AFC	Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách	3
Súčet		10