
Analýza merania optickým 3D skenerom a výsledky merania bezšvíkových ocelových rúr ťahaných za studena

Ladislav Morovič, doc. Ing., PhD.

Katedra obrábania a počítačovej podpory technológií, Ústav výrobných technológií,
Materiálovotechnologická fakulta v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava, Slovenská republika.
E-mail: ladislav.morovic@stuba.sk, Tel.: +421 918 600 176

Jozef Bílik, doc. Ing., PhD.*

Katedra tvárnenia kovov a plastov, Ústav výrobných technológií,
Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava, Slovenská republika.
E-mail: jozef.bilik@stuba.sk, Tel.: +421 915 761 406

Filip Havran, Ing.

Katedra obrábania a počítačovej podpory technológií, Ústav výrobných technológií,
Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave,
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava, Slovenská republika.

The Analysis of Measurement Using Optical 3D Scanner and the Results of Measuring Cold-Drawn Seamless Steel Tubes

Abstract: The paper explores the application of a non-contact measurement technique - optical 3D digitization (active triangulation/structured light method) - for determining the dimensions (outer and inner diameters) of seamless cold-drawn steel tubes. The paper focuses on three areas of steel tube measurement by 3D digitization: (1) evaluation of the measured values using two different measuring volumes, (2) evaluation of the measured values with different 3D digitization parameter settings, (3) *Computer Aided Design (CAD) comparison*. The outcomes of the measurements and insights gained provide valuable guidance in selecting the appropriate 3D digitization method for seamless steel tube measurement.

Keywords: 3D digitization, optical 3D scanning, cold-drawn seamless steel tubes, measuring volume, exposure time, CAD comparison

1 ÚVOD

Tento článok nadväzuje a zároveň je pokračovaním publikácie [1], ktorá podobne, ako aj tento článok, sa venuje zisteniam a využitiu optickej 3D digitalizácie pri meraní rozmerov bezšvíkových ocelových rúr ťahaných za studena. Článok [1] sa zameriava na 3 oblasti pri 3D digitalizácii ocelových rúr, a to: 1 - vyhodnotenie nameraných hodnôt v jednotlivých rezoch, 2 - vyhodnotenie nameraných hodnôt pri znečistenej vzorke rúry, 3 - vyhodnotenie nameraných hodnôt z hľadiska rôznych nastavení polygonizácie. Tento článok sa zameriava na ďalšie tri oblasti pri 3D digitalizácii ocelových rúr, menovite: 1 - vyhodnotenie nameraných hodnôt pri použití dvoch rôznych meracích objemov (kapitola 2.1), 2 -

vyhodnotenie nameraných hodnôt pri rôznych nastaveniach parametrov 3D digitalizácie (kapitola 2.2), 3 - CAD porovnanie (CAD Comparison) (kapitola 2.3).

Článok sa zameriava na meranie rúr bezkontaktnou metódou merania, konkrétne optickým 3D skenerom GOM ATOS II TripleScan SO (obr. 1), ktorý využíva metódu aktívnej triangulácie (premietanie štruktúrovaného svetla).

V článku uvedené merané bezšvíkové ocelové rúry boli vyrobené prievlačným ťahaním za studena. Technológia ťahania rúr za studena [1-6] sa používa pri výrobe presných bezšvíkových ocelových rúr.

Vzájomná poloha sensorovej jednotky 3D skenera a meranej rúry je znázornená v článku [1].

Výsledkom 3D digitalizácie (t.j. 3D skenovania) je mrak bodov. Trojuholníkový model rúry (.stl súbor) bol vytvorený polygonizáciou v softvéri *GOM ATOS Professional v7.5 SR2*. Meranie priemerov rúr sa uskutočnilo pomocou bezplatného softvéru *GOM Inspect Suite 2020*. V ďalšom je v krátkosti uvedený postup merania priemerov (podrobnejšie je to vysvetlené v práci [7] a v článku [1]).

Meranie sa vykonávalo prevažne pomocou best-fit prvkov vytvorených na povrchu naskenovaného modelu rúry alebo na obrysoch získaných rezmi. Na vonkajšiu plochu polygónového .stl modelu rúry bol aplikovaný *best-fit valec*. Vo vzdialenosti 3 mm od konca rúry bola vytvorená rovina kolmá na os tohto *best-fit valca*, ktorá zároveň vytvorila rez cez .stl model rúry. Z rezu boli určené *best-fit kružnice* z obrysov vonkajšieho a vnútorného priemeru. Po ich vytvorení sa priemery merali pomocou funkcie *Inspect* a možnosti *Check*.

V prípade optického 3D skenovania, konkrétne pri zariadeniach *GOM ATOS TripleScan*, výraz *merací objem* (*measuring volume (MV)*) (obr. 1, obr. 2) označuje priestor, ktorý 3D skener dokáže zmerať („zachytiť“) v rámci jednej snímky. Tento priestor je určený veľkosťou zorného poľa (*field of view (FOV)*) 3D skenera a vzdialenosťou medzi ním a objektom, ktorý sa meria (rozmer *meracia vzdialenosť*, obr. 2).

Pri voľbe optimálneho meracieho objemu pre dané meranie je potrebné zohľadniť: 1 - rozmery skenovaného (meraného) objektu, 2 - požadovanú presnosť výsledkov, 3 - rozlíšenie detailov potrebných pre konkrétnu aplikáciu (napr. pre kontrolu kvality alebo pre účely reverzného inžinierstva). Merací objem je teda kľúčový parameter, ktorý ovplyvňuje použitie 3D skenera, presnosť a kvalitu získaných dát 3D meraním.

Významné atribúty *meracieho objemu* v prípade optického 3D skenovania sú:

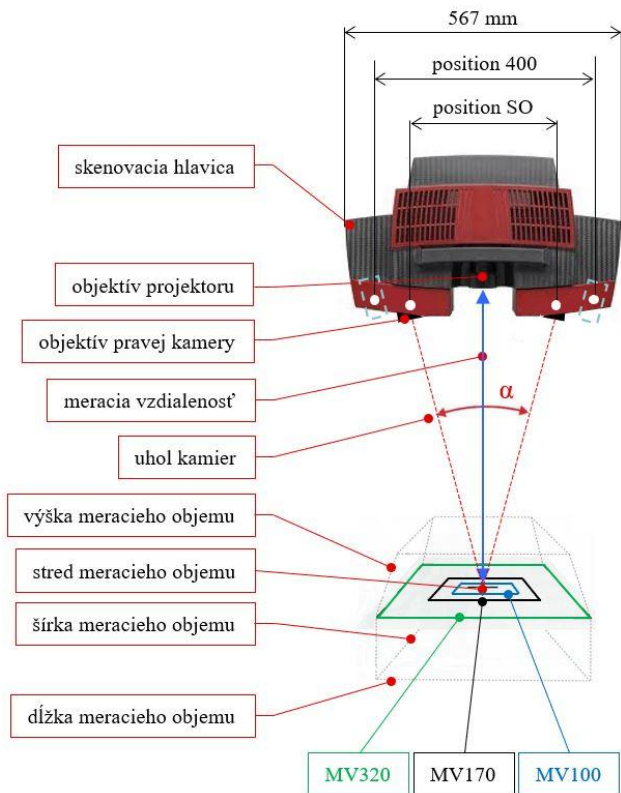
- *rozmery meracieho objemu*: Uvedené sú v podobe troch rozmerov (dĺžka × šírka × výška) a sú definované v mm. Rozmery meracieho objemu závisia od použitej konfigurácie skenera, vrátane: 1 - použitých šošoviek, 2 - nastavenia vzdialenosti medzi kamerami a projekčnou jednotkou (obr. 1, tab. 1);
- *presnosť a rozlíšenie*: Presnosť skenovania je vyššia v menších meracích objemoch, pretože skener sníma detaily na menšej ploche s vyšším rozlíšením (obr. 2). Naopak, väčšie meracie objemy umožňujú zachytiť väčšie objekty, ale môžu mať nižšie detaily;
- *modularita*: 3D skener *GOM ATOS TripleScan* umožňuje vymieňať šošovky (pre pravú a ľavú kameru resp. pre projektor je potrebné vymeniť šošovky súčasne) a upravovať konfiguráciu kamier, čo znamená, že je možné nastaviť rôzne meracie objemy pre rôzne aplikácie, napr. *malý merací objem* (v prípade *GOM ATOS II TripleScan SO*, napr. *MV38, MV60*) pre vysoko detailné skenovanie malých objektov (napr. diely hodínok, mince a pod.), *veľký merací objem* (v prípade *GOM ATOS II TripleScan 400* napr. *MV1400, MV1000*) pre skenovanie rozmernejších objektov (napr. karosérie áut, sochy).

Optický 3D skener *GOM ATOS II TripleScan* pozíciou kamier *SO (Small Objects (malé objekty))* ponúka 5 meracích objemov (viď tab. 1), pozíciou kamier „400“ ponúka meracie objemy *MV1400, MV1000, MV700, MV560, MV320, MV170* a pozíciou kamier „800“ *GOM ATOS II TripleScan 800* meracie objemy *MV2000, MV1400, MV1000, MV560* [8].

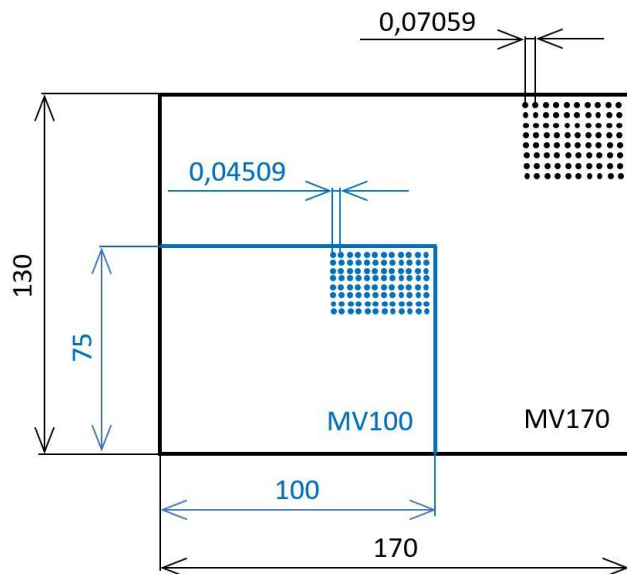
Rozdiel medzi pozíciami kamier *SO, 400* a *800* je vo vzájomnej vzdialenosti ľavej a pravej kamery (obr. 1). Expozičný čas je doba, počas ktorej kamerový čip v senzore nahráva dáta, zatiaľ čo meraný objekt je skenovaný.

Tab. 1. Technické parametre sensorovej jednotky optického 3D skenera *GOM ATOS II TripleScan SO* [8] (uhol kamier je pre všetky meracie objemy $\alpha = 28^\circ$)

Merací objem ($d \times \check{s} \times v$) [mm]	Rozlíšenie senzora kamery [mm]	Vzdialenosť nameraných bodov [mm]	Ohnisková vzdialenosť kamery [mm]	Ohnisková vzdialenosť projektora [mm]	Referenčné body [mm]	Meracia vzdialenosť [mm]
<i>MV320</i> (320 × 240 × 240)	5 000 000	0,124	12	30	Ø 1,5	490
<i>MV170</i> (170 × 130 × 130)	5 000 000	0,071	23	60	Ø 0,8	490
<i>MV100</i> (100 × 75 × 70)	5 000 000	0,045	35	80	Ø 0,8	490
<i>MV60</i> (60 × 45 × 35)	5 000 000	0,023	35	120	Ø 0,4	490
<i>MV38</i> (38 × 29 × 15)	5 000 000	0,015	80	150	Ø 0,4	490



Obr. 1. Skenovacia hlavica optického 3D skenera GOM ATOS II TripleScan SO a schematicky znázornené 3 rôzne meracie objemy (measuring volume - MV320, MV170 a MV100) (upravený na základe [8])

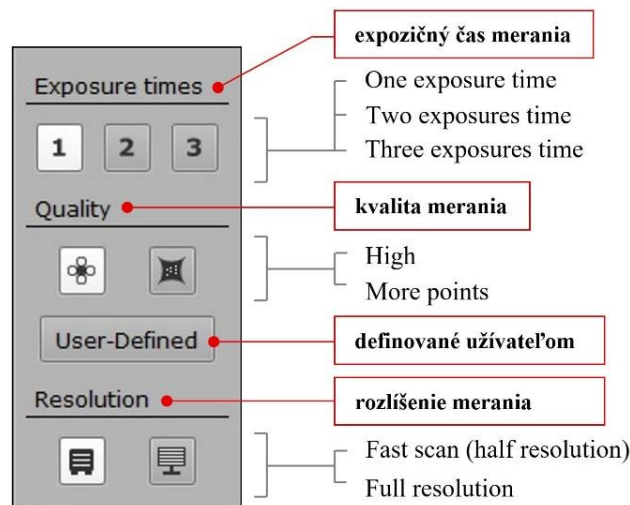


Obr. 2. Znázornenie dĺžky a šírky meracieho objemu (measuring volume) MV100 a MV170 so schematickým zobrazením vzdialenosti nameraných bodov (podľa [8])

Aby bolo možné skenovať ťažko digitalizovateľné povrchy alebo povrchy rôznych farieb, softvér GOM ATOS Professional v7.5 SR2 ponúka možnosť skenovania (t.j. merania) s rôznymi *expozičnými časmi* (1, 2 alebo 3) (obr. 3). Koeficient medzi časmi expozičie je fixný a odvodzuje sa od prvého expozičného času. Každý ďalší expozičný čas je násobkom prvého expozičného času. Čím dlhší expozičný čas sa použije, tým dlhšie trvá skenovanie

(meranie). Pri skenovaní sa treba snažiť o použitie najkratšieho expozičného času [9].

Problematikou expozičného času pri 3D skenovaní sa zaoberá literatúra [10-12].



Obr. 3. Parametre merania v softvéri GOM ATOS Professional v7.5 SR2 (upravený na základe [9])

V softvéri je možné nastaviť aj *kvalitu merania povrchu* objektu (obr. 3). Doporučuje sa nastavenie *High (Vysoké)*, aby boli získané čo najkvalitnejšie dáta. Na kvalitu dát môže mať vplyv napr. aj zníženie kontrastu premietaného rastra (t. j. štrukturovaného svetla). Môžu sa vyskytnúť oblasti na skenovanom povrchu, na ktorých zníženie kvality má zmysel, pretože vysoká kvalita nie je dôležitá. V tom prípade je možné zvoliť nastavenie *More points (Viac bodov)*. Je možné aj užívateľské nastavenie (*User-Defined*) [9].

Nastavenie *rozlíšenia merania (Resolution)* v softvéri GOM ATOS Professional v7.5 SR2 (obr. 3) ovplyvňuje hustotu bodov, ktoré sa zbierajú počas skenovania, tým pádom aj objem dát. Na výber sú 2 možnosti: (1) *Fast scan (half resolution) (Rýchle skenovanie (polovičné rozlíšenie))* a (2) *Full resolution (Plné rozlíšenie)*. V prípade *polovičného rozlíšenia* sa zníži hustota bodov, ktoré sa zbierajú počas merania, čo vedie k modelu s menším počtom bodov. Výhodou *polovičného rozlíšenia* je rýchlejšie skenovanie a spracovanie dát a menšie nároky na úložný priestor dát a výpočtový výkon. Nevýhodou je skenovanie detailov. Voľba *polovičného rozlíšenia* sa doporučuje, keď je potrebné rýchlo získať menej detailné dáta (zvyčajne pri skenovaní rozmerovo veľkých objektov, kde jemné detaily nie sú kľúčové). Pri *plnom rozlíšení* sa sníma maximálny možný počet bodov, ktorý 3D skener podporuje (v našom prípade 5 Mpx, tab. 1). Výsledkom je podrobný model s vysokým počtom nameraných bodov a detailov. Nevýhodou *plného rozlíšenia* je väčšia veľkosť dátových údajov, dlhší čas spracovania a väčšie nároky na výpočtovú techniku. Voľba *plného rozlíšenia* sa doporučuje, keď je dôležité zachytiť jemné detaily objektu.

2 VYHODNOTENIE NAMERANÝCH HODNÔT

Merané hodnoty boli teda vonkajší a vnútorný priemer vzorky rúry, ktoré boli merané pred aj po procese ťahania. Z hodnôt priemerov sa následne vypočítali hodnoty hrúbky stien a hodnota redukcie, ktorá vznikla ťahaním príslušných vstupných priemerov rúr na priemer po ťahaní [1, 7].

Hrúbka steny sa vypočítala ako rozdiel vonkajšieho a vnútorného priemeru, a to ako pred ťahaním, tak aj po ťahaní. Výpočet pre hrúbku steny bol realizovaný podľa rovnice (1):

$$T = D1(pred; po) - D2(pred; po), \quad (1)$$

kde T - hrúbka steny,

$D1\ pred$ - vonkajší priemer pred ťahaním,

$D2\ pred$ - vnútorný priemer pred ťahaním,

$D1\ po$ - vonkajší priemer po ťahaní,

$D2\ po$ - vnútorný priemer po ťahaní.

Redukcia pri ťahaní sa vypočítala podľa rovnice (2):

$$R = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100 \% , \quad (2)$$

kde R - redukcia,

S_0 - plocha prierezu rúry pred ťahaním,

S - plocha prierezu rúry po ťahaní.

2.1 Vyhodnotenie nameraných hodnôt pri použití dvoch rôznych meracích objemov

Cieľom tohto experimentálneho vyhodnotenia bolo porovnanie nameraných hodnôt pri použití dvoch rozličných meracích objemov 3D optického skenera *GOM ATOS II TripleScan SO*. Konkrétne išlo o meracie objemy *MV100* a *MV170*, ktoré sa odlišovali aj vzdialenosťou jednotlivých nameraných bodov. Pri *MV100* bola táto hodnota 0,04509 mm, zatiaľ čo pri *MV170* výrobca udáva hodnotu 0,07059 mm (obr. 2). Z vyššie uvedených číselných hodnôt je evidentné, že merací objem *MV100* je vhodný pre skenovanie rozmerovo menších objektov, kedy je požiadavka na meranie jemných detailov [7].

Keďže merací objem *MV170* bol použitý iba na digitalizáciu vzoriek rúr, ktoré neboli podrobené procesu ťahania, v tabuľkách (tab. 2 až tab. 5) sú uvedené len namerané hodnoty pred ťahaním. Experiment bol vykonaný na dvojici rúr s priemerom Ø18 mm a dvoma rôznymi hodnotami hrúbky steny, t. j. 1 mm a 2 mm. Výsledky merania ukázali, že priemerné hodnoty vonkajšieho priemeru namerané pomocou *MV170* boli pri oboch hrúbkach steny vzoriek väčšie ako pri vzorkách meraných pomocou *MV100*, a to o približne stotinu milimetra. Podobný rozdiel bol zaznamenaný aj pri priemerných hodnotách hrúbky steny rúrok [7].

Tab. 2. Merací objem *MV170* - vzorka rúry Ø18 mm s hrúbkou steny 1 mm [7]

Č.	D1 [mm]		D2 [mm]		Hrúbka steny [mm]	
	pred	po	pred	po	pred	po
1	17,978	-	16,016	-	0,981	-
2	17,977	-	16,017	-	0,980	-
3	17,982	-	16,009	-	0,986	-

Tab. 3. Merací objem *MV170* - vzorka rúry Ø18 mm s hrúbkou steny 2 mm [7]

Č.	D1 [mm]		D2 [mm]		Hrúbka steny [mm]	
	pred	po	pred	po	pred	po
1	18,013	-	13,942	-	2,036	-
2	18,042	-	13,970	-	2,036	-
3	18,038	-	13,966	-	2,036	-

Tab. 4. Merací objem *MV100* - vzorka rúry Ø18 mm s hrúbkou steny 1 mm [7]

Č.	D1 [mm]		D2 [mm]		Hrúbka steny [mm]	
	pred	po	pred	po	pred	po
1	17,962	12,028	16,029	9,911	0,967	1,059
2	17,967	12,034	16,029	9,842	0,969	1,096
3	17,965	12,033	16,023	9,873	0,971	1,080

Tab. 5. Merací objem *MV100* - vzorka rúry Ø18 mm s hrúbkou steny 2 mm [7]

Č.	D1 [mm]		D2 [mm]		Hrúbka steny [mm]	
	pred	po	pred	po	pred	po
1	18,002	11,988	13,949	7,832	2,027	2,078
2	18,033	12,007	13,977	7,682	2,028	2,163
3	18,028	11,986	13,971	7,831	2,029	2,078

Pri priemerných hodnotách vnútorného priemeru sa výsledky správali opačne, t. j. hodnoty namerané pomocou objemu *MV170* boli o stotinu milimetra menšie ako tie, ktoré boli získané pomocou objemu *MV100* [7].

2.2 Vyhodnotenie nameraných hodnôt pri rôznych nastaveniach parametrov 3D digitalizácie

Povrch digitalizovaných rúr bol lesklý, čo spôsobilo, že ich skenovanie bolo náročnejšie než obvykle. Počas optického 3D skenovania nebol aplikovaný zmatňovací sprej, a preto bolo potrebné prispôsobiť parametre digitalizácie:

- expozičný čas 3,

- *High Quality*,
- *Full Resolution* [7].

V rámci tohto experimentálneho vyhodnotenia sa skúmal vplyv zmeny parametrov na výsledné hodnoty. Z tohto dôvodu boli pre optický 3D skener zvolené nasledujúce nastavenia:

- expozičný čas 2,
- *More Points*,
- *Half Resolution* [7].

Tab. 6. Porovnanie nameraných hodnôt pri rôznych parametroch 3D digitalizácie [7]

Č.	D1 [mm]		D2 [mm]		Hrúbka steny [mm]		R [%]
	pred	po	pred	po	pred	po	
16	13,998	12,005	10,000	7,900	1,999	2,053	14,836
16'	13,998	12,004	10,000	7,900	1,999	2,052	14,861

pokračovanie Tab. 6.

Č.	Kruhovitosť				Sústrednosť	
	pred		po		pred	po
	D1	D2	D1	D2		
1	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02
1'	0,02	0,02	0,01	0,07	0,02	0,01

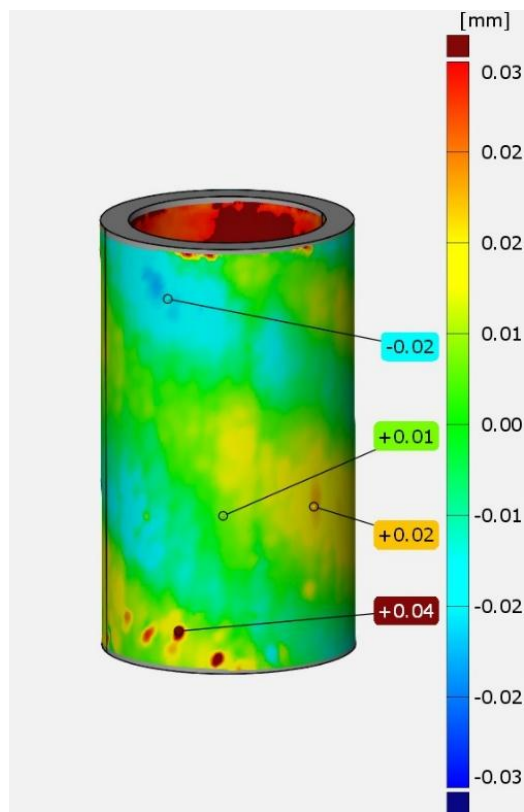
Experimentálne hodnotenie vplyvu zmeny parametrov bolo realizované na vzorke rúry s priemerom $\varnothing 14$ mm a hrúbkou steny 2 mm. Hodnoty získané zo skenovania rúry s pôvodnými parametrami (16) boli porovnané s hodnotami získanými pri použití upravených parametrov (16'). Na základe údajov z tab. 6 možno konštatovať, že zmena týchto parametrov nemá významný vplyv na merané hodnoty vzoriek rúr, keďže rozdiely sú minimálne alebo zanedbateľné [7].

2.3 CAD porovnanie (CAD Comparison)

Experimentálne vyhodnotenie nazývané CAD Comparison zahŕňa vytvorenie referenčného modelu vzorky rúry pomocou CAD softvéru a jeho následné porovnanie s modelom rúry získaným prostredníctvom 3D digitalizácie [13]. Výsledkom tohto procesu je farebná mapa odchýlok (obr. 4), ktorá zobrazuje oblasti na naskenovanom modeli, kde sa rozmerovo alebo tvarovo líši od referenčného modelu vzorky rúry [7].

Experimentálne vyhodnotenie bolo uskutočnené na vzorke rúry s priemerom $\varnothing 18$ mm a hrúbkou steny 1 mm, ktorá nebola vystavená procesu ťahania. V CAD softvéri bol vytvorený presný referenčný model, na základe ktorého vznikla farebná mapa odchýlok. Tá obsahuje farebnú škálu, umožňujúcu určiť veľkosť odchýlky podľa farebného odtieňa. Okrem toho je možné presne zistiť odchýlku v konkrétnych bodoch

výberom požadovaných miest na modeli (obr. 4). Na vonkajšom povrchu vzorky rúry je viditeľná zmena farebného odtieňa v špirálovom vzore (po skrutkovici), čo odráža proces výroby rúry, ktorý zahŕňa ťahanie [7].



Obr. 4. Farebná mapa odchýlok pre vzorku rúry [7]

ZÁVER

Vzorky bezšvíkových ocelových rúr boli úspešne digitalizované pomocou 3D optického skenovania. Táto metóda sa ukázala ako veľmi efektívna, pretože umožnila vytvorenie detailného digitálneho modelu rúry, ktorý bolo možné opakovane analyzovať bez nutnosti ďalšieho skenovania. Medzi hlavné výhody patrí možnosť získať presné údaje o geometrii rúr bez opakovaných meraní, čo šetrí čas aj náklady.

Aj napriek lesklému povrchu skúmaných vzoriek nebolo nutné použiť zmatňujúci kriedový sprej. Tento krok bol zvolený kvôli potenciálnemu skresleniu meraní, keďže kriedový sprej vytvorí vrstvu na povrchu skenovanej rúry, čo môže viesť k nesprávnemu odhadu hrúbky nanesej vrstvy. Okrem toho eliminácia tohto kroku znížila celkové finančné náklady a zrýchliť celý proces digitalizácie.

Rozšírenie tejto metódy na ďalšie aplikácie v priemysle môže priniesť ešte väčší prínos, predovšetkým tam, kde sú potrebné rýchle a presné výsledky bez potreby priamych zásahov do skúmaného objektu. V budúcnosti by bolo vhodné skúmať aj možnosti automatizácie procesu skenovania, aby sa dosiahla vyššia efektivita a eliminovali sa možné chyby spôsobené ľudským

faktorom. Taktiež by sa mohla detailne analyzovať schopnosť tejto technológie spracovať ešte komplexnejšie geometrie rúr (napr. profilových rúr) a trňov na výrobu profilových rúr [14] a iných kovových nástrojov a výrobkov, čo by otvorilo nové možnosti využitia v rôznych odvetviach priemyslu.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-18-0418 (Výskum príčin vzniku geometrických odchýlok pri výrobe bezšvíkových rúr a ich technologická dedičnosť s dôrazom na tvarovú stabilitu presných rúr ťahaných za studena s využitím metrologických systémov).

LITERATÚRA

- [1] MOROVIČ, L. - BÍLIK, J. - HAVRAN, F. (2024): *Využitie optickej 3D digitalizácie pri meraní rozmerov bezšvíkových ocelových rúr ťahaných za studena*. In: Technológ, Žilinská univerzita v Žiline v EDIS - vydavateľstve UNIZA, Roč. 16, č. 4, pp. 62-67, ISSN 1337-8996.
- [2] BÍLIK, J. - SOBOTA, R. - NECPAL, M. (2023): *Výroba bezšvových rúr. Teoretickotechnologické aspekty výroby*. 1. vyd. Bratislava: Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve SPEKTRUM, 71 p., ISBN 978-80-227-5308-1.
- [3] BÍLIK, J. - SOBOTA, R. - KAPUSTOVÁ, M. - KRITIKOS, M. (2021): *Vplyv veľkosti pretvorenia na presnosť rúr pri prievlačnom ťahaní jedno a dvojtáhovou technológiou*. In: Technológ, Žilinská univerzita v Žiline v EDIS - vydavateľstve UNIZA, Roč. 13, č. 3, pp. 20-24, ISSN 1337-8996.
- [4] MOROVIČ, L. - KRITIKOS, M. - DELGADO SOBRINO, D. R. - BÍLIK, J. - SOBOTA, R. - KAPUSTOVÁ, M. (2022): *A statistical approach in the analysis of geometrical product specification during the cold tube drawing process*. In: Applied Sciences (MDPI). Vol. 12, iss. 2, pp. 1-22, ISSN 2076-3417, <https://doi.org/10.3390/app12020676>
- [5] GÖRÖG, A. - MOROVIČ, L. - KRITIKOS, M. (2023): *Measurement of Dimensional and Geometric Accuracy of Tubes*. 1. vyd. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 114 p., ISBN 978-80-7380-919-5.

[6] GROSS, L. (2022): *Získavanie dát 3D digitalizáciou a vyhodnotenie geometrických tolerancií ocelových bezšvíkových rúr ťahaných za studena* [Diplomová práca]. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave; Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. 76 s. Vedúci práce: doc. Ing. Ladislav Morovič, PhD.

[7] HAVRAN, F. (2021): *Vyhodnotenie presnosti vybraných rozmerov bezšvíkových ocelových rúr pomocou 3D digitalizácie* [Diplomová práca]. Trnava: Slovenská technická univerzita v Bratislave; Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. 71 s. Vedúci práce: doc. Ing. Ladislav Morovič, PhD.

[8] GOM (2011): *GOM ATOS TripleScan. User Manual - Hardware*. Braunschweig: GOM mbH.

[9] GOM. (2010): *GOM ATOS Professional. Příručka V7. Základní školení*.

[10] OJAL, N. - CAVINESS, A. - BLUM, A. - AU B. - JAYCOX, W. A. - GIERA, B. (2024): *Optimizing exposure times of structured light metrology systems using a digital twin*. In: Measurement, Vol. 224, 113816, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113816>

[11] EKSTRAND, L. - ZHANG, S. (2011): *Auto-exposure for three-dimensional shape measurement using a digital-light-processing projector*. In: Optical Engineering, Vol. 50, iss. 12, 123603, ISSN 1560-2303, <https://doi.org/10.1117/1.3662387>.

[12] ALEXANDROV, V. S. - PRANKL, J. - ZILLICH, M. - VINCZE, M. (2017): *High Dynamic Range SLAM with Map-Aware Exposure Time Control*. In: 2017 International Conference on 3D Vision (3DV), pp. 48-56, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.07427>.

[13] MOROVIČ, L. (2016): *Non-Contact Measurement of Free-Form Surfaces*. 1. vyd. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 90 p., ISBN 978-80-7380-628-6.

[14] BURANSKÝ, I. - MOROVIČ, L. (2015): *Využitie 3D optického merania nástrojov a rúr*. In: Zborník príspevkov: Odborná konferencia ŽP VVC 2015 konaná pri príležitosti 175. výročia Železiarni Podbrezová a.s., 21.-23.09., Hotel Stupka, Tále.