

Využitie optickej 3D digitalizácie pri meraní rozmerov bezšvíkových oceľových 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 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 v Trnave, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Jána Bottu 2781/25, 917 24 Trnava, Slovenská republika.

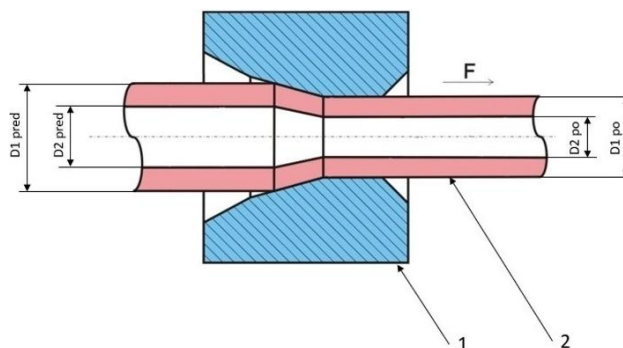
Utilization of Optical 3D Digitization in Measuring Dimensions of Cold-Drawn Seamless Steel Tubes

Abstract: The paper deals with the use of a non-contact measurement method - optical 3D digitization (*active triangulation/structured light method*) - in measuring the dimensions (outer and inner diameter) of seamless cold-drawn steel tubes. The paper focuses on three areas of tube measurement by 3D digitization: (1) measurement of dimensions at different tube sections, (2) measurement of dirty tube surface, (3) evaluation of measured values in terms of different settings of polygonization. The results of the measured values and findings serve as useful information when deciding on the choice of 3D digitization method for measuring seamless steel tubes.

Keywords: 3D digitization, optical 3D scanning, polygonization, cold-drawn seamless steel tubes

ÚVOD

Na meranie vonkajšieho a vnútorného priemeru rúr okrem kontaktných metód merania (napr. pomocou súradnicových meračích strojov) [1, 2] sa využívajú aj bezkontaktné metódy merania, ako napr. optická 3D digitalizácia [3, 4] a počítačová tomografia [2, 5]. Článok sa zameriava na meranie rúr bezkontaktnou metódou merania, konkrétne optickým 3D skenerom *GOM ATOS TripleScan* (obr. 2, obr. 3), ktorý využíva metódu aktívnej triangulácie (premietanie štruktúrovaného svetla). V článku sú predstavené tri významné faktory, ktoré je potrebné brať do úvahy pri optickom 3D skenovaní rúr. V článku uvedené merané bezšvíkové oceľové rúry boli vyrobené ťahaním za studena (obr. 1). Technológia ťahaní rúr za studena [6, 7] sa používa pri výrobe presných bezšvíkových oceľových rúr.



Obr. 1. Schéma prievlačného ťahania [3]: *D1 pred* - vonkajší priemer pred ťahaním, *D2 pred* - vnútorný priemer pred ťahaním, *D1 po* - vonkajší priemer po ťahaní, *D2 po* - vnútorný priemer po ťahaní, *F* - ťažná sila, 1 - prievlak, 2 - ťahaná rúra

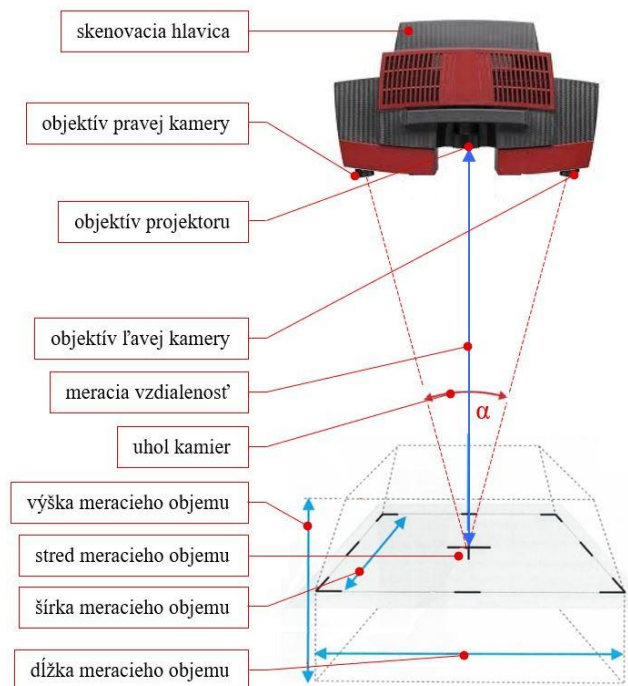
Optický 3D skener *GOM ATOS TripleScan* (obr. 2) možno charakterizovať nasledovným opisom:

- *projekcia štruktúrovaného svetla*: na meraný objekt (t.j. na povrch rúry) sa pomocou projektora 3D skenera premietajú séria svetelných vzorov (nazýva sa tiež ako „štruktúrované svetlo“). Väčšinou ide o pruhy alebo iné geometrické vzory, ktoré 3D skener premietajú na povrch objektu v rôznych uhloch. Vďaka tomu dochádza k rôznemu „deformovaniu“ týchto vzorov na povrchu objektu v závislosti od jeho geometrie (t.j. tvaru),
- *snímanie kamerami*: 3D skener GOM ATOS TripleScan je vybavený dvoma kamerami (pravá a ľavá kamera), ktoré snímajú premietané vzory na povrch objektu. Kamery voči projektoru sú pevne umiestnené pod určitým uhlom ($\alpha = 28^\circ$) v trojuholníkovom usporiadaní,
- *výpočet súradníc snímaných bodov pomocou triangulácie*: na základe deformácie vzorov zachytených kamerami sa určuje vzdialenosť jednotlivých bodov tvoriacich povrch objektu. Merací systém využíva trianguláciu - na základe známych vzdialeností medzi projektorom a kamerami a uhla projekcie je možné vypočítať presné priestorové súradnice bodov tvoriacich povrch meraného objektu,
- *získanie priestorových súradníc*: vďaka výpočtu triangulácie každého pixelu obrazu sa získava hustý 3D mrak bodov, ktorý reprezentuje povrch objektu. Tento proces sa opakuje pre každé premietané vzorové pole (t.j. pre každý *individuálny sken*). Jednotlivé individuálne skeny sú spájajú do jedného celku.

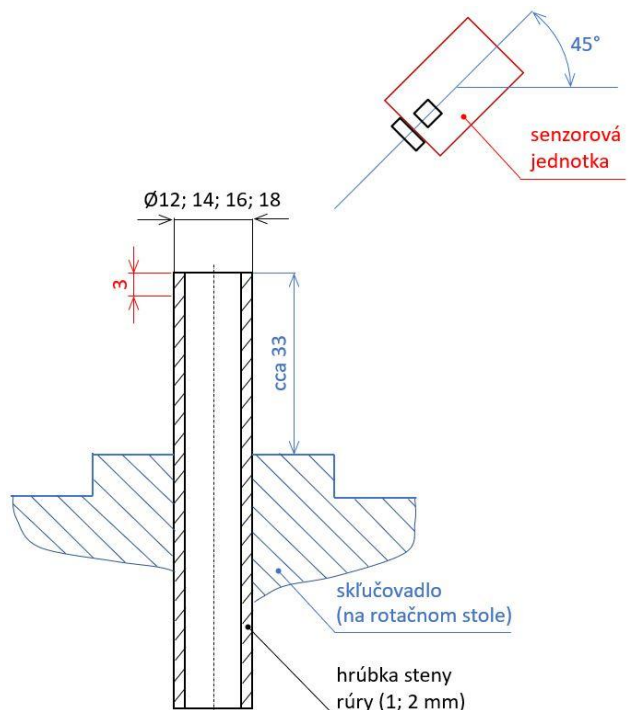
Kľúčové vlastnosti optického 3D skenera GOM ATOS TripleScan:

- *hustý mrak bodov*: pre 3D digitalizáciu metódou štruktúrovaného svetla všeobecne je charakteristická relatívne vysoká hustota získaného mraku bodov. V prípade získaných výsledkov uvedených v tomto článku, použitý bol optický 3D skener GOM ATOS II TripleScan SO MV100, čo znamená, že rozlíšenie kamier je 5 MPa a rozmery meracieho objemu (dĺžka \times šírka \times výška, obr. 2) sú 100 mm \times 75 mm \times 70 mm. Pri vyššie uvedených parametroch, vzdialenosť dvoch bodov v mraku bodov je 0,04509 mm,
- *rýchlosť 3D digitalizácie*: metóda štruktúrovaného svetla umožňuje rýchle, presné a nedeštruktívne meranie povrchov, čo robí optický 3D skener vhodným pre priemernú metrológiu [9] (t.j. aj pre 3D digitalizáciu rúr), kontrolu kvality, reverzné inžinierstvo a pod.,
- *nevýhodou* optického 3D skenovania je napr. relatívne obtiažne 3D skenovanie tmavých, lesklých a priesvitných povrchov. Riešenie

ponúka zmatnenie povrchu (napr. kriedovým sprejom). Ďalšou nevýhodou merania štruktúrovaným svetlom je obmedzená možnosť premietania a následného snímania vzorov v prípade zložitých vnútorných resp. hlbokých a úzkych geometrií (podkapitola 1.1).



Obr. 2. Skenovacia hlavica 3D skenera GOM ATOS TripleScan [8]



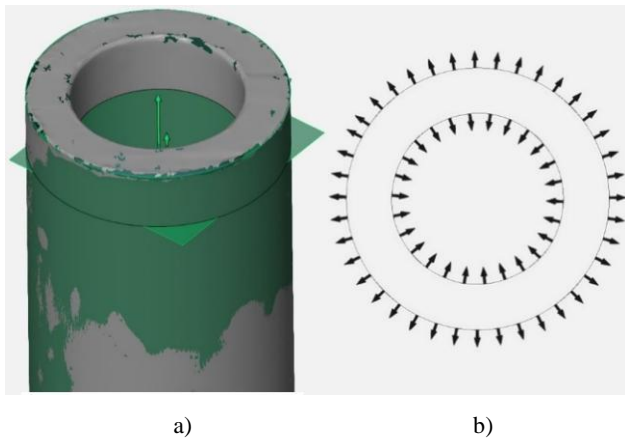
Obr. 3. Schéma vzájomnej polohy senzornej jednotky 3D skenera GOM ATOS II TripleScan SO MV100 a rúry pri 3D skenovaní [3]

Na obr. 3 je znázornená vzájomná poloha senzornej jednotky 3D skenera a meranej rúry. Výsledkom 3D digitalizácie je mrak bodov. Sieťový model rúry

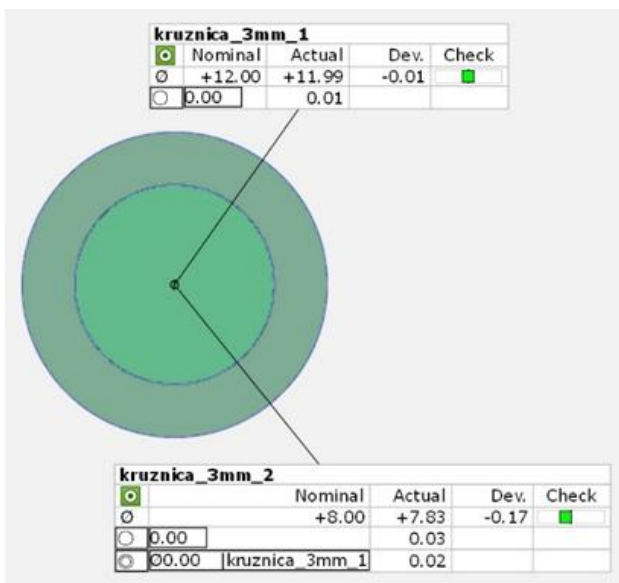
(polygónový .stl model) bol vytvorený polygonizáciou v softvéri *GOM ATOS Professional v7.5 SR2*. Meranie priemerov rúr bolo zrealizované vo voľne dostupnom softvéri *GOM Inspect Suite 2020*.

Meranie bolo väčšinou realizované pomocou best-fit elementov, ktoré boli vytvorené na povrchu naskenovaného modelu rúry alebo na obrysy vytvorené pomocou rezov. Vytvorený bol best-fit valec (t. j. digitálne „napasovaný“ valec na vonkajšiu plochu polygónového .stl modelu rúry) (obr. 4a). Vo vzdialenosti 3 mm od konca rúry, bola vytvorená rovina kolmá na os best-fit valca vytvoreného v predchádzajúcom kroku (obr. 4a). Táto rovina vytvorila rez cez .stl model rúry (obr. 4b) [3].

Po vytvorení rezu boli vytvorené best-fit kružnice (obr. 5), ktoré boli vytvorené pomocou obrysov vonkajšieho a vnútorného priemeru, ktoré sme získali rezom. Keď boli best-fit kružnice vytvorené, nasledovalo meranie ich priemerov (obr. 5) pomocou funkcie *Inspect* a zvolením možnosti *Check* pre zmeranie priemeru [3].



Obr. 4. Vytvorenie rezu cez polygónový .stl model [3]:
a) rez rúrou pomocou roviny vzdialenej 3 mm od konca rúry,
b) pohľad na vzniknutý rez rúrou



Obr. 5. Meranie vonkajšieho a vnútorného priemeru, kruhovitosti a sústrednosti [3]

Ďalším krokom bolo vyhodnotenie kruhovitosti a sústrednosti (obr. 5), ktoré sa takisto vzťahovali na vytvorené *best-fit* kružnice. Ich meranie sa takisto vykonávalo pomocou funkcie *Inspect*, kde namiesto možnosti *Check* bola zvolená možnosť *GD&T*. Ako prvá bola odmeraná hodnota kruhovitosti. Pri kruhovitosti nie je potrebné udávať základňu, ku ktorej by sa hodnota kruhovitosti vzťahovala. Pri sústrednosti je už základňa potrebná, preto bol tento geometrický tvar odmeraný pre kružnicu č. 2, ktorá reprezentovala vnútorný priemer. Ako základňa, na ktorú sa vzťahovala hodnota sústrednosti pre túto kružnicu, bola zvolená práve kružnica č. 1, ktorá reprezentovala vonkajší priemer [3].

1 VYHODNOTENIE NAMERANÝCH HODNÔT

Merané hodnoty boli teda vonkajší a vnútorný priemer vzorky rúry, ktoré boli merané pred aj po procese ťahaní. Z hodnôt priemerov sa následne vypočítali hodnoty hrúbky stien a hodnota redukcie, ktorá vznikla ťahaním príslušných priemerov rúr na priemer po ťahaní [3].

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):

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

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,

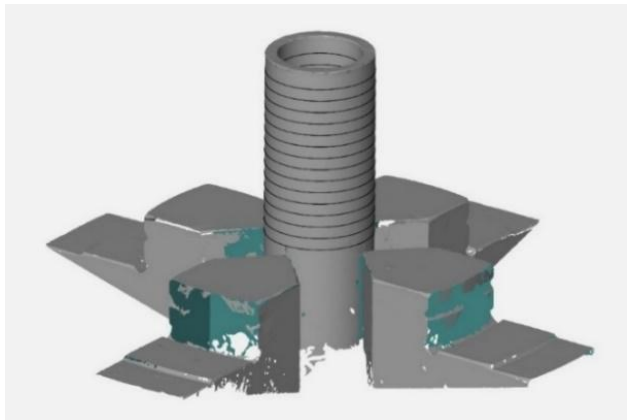
S - plocha prierezu rúry po ťahaní.

1.1 Vyhodnotenie nameraných hodnôt v jednotlivých rezoch

Vyhodnotenie bolo realizované na vzorke rúry s vonkajším priemerom $\text{Ø}18$ mm a hrúbkou steny 2 mm. Rezy boli vytvorené pomocou rovnobežných rovín na základe roviny vzdialenej 3 mm od konca vzorky rúry, a to so vzájomnými vzdialenosťami 2 mm, čo je možné vidieť na obr. 6. Posledná rovina mala vzdialenosť od konca rúry 31 mm [3].

Pre každý rez bola vytvorená best-fit kružnica ako pre vonkajší, tak aj pre vnútorný priemer vzorky rúry. Skenovanie vnútorného povrchu rúry bolo možné len

do určitej vzdialenosti, čo činilo v prípade priemeru vzorky rúry pred ťahaním 13 mm a po ťahaní 7 mm.



Obr. 6. Poloha rezov vo vzdialenosti 2 mm [3]

Limitáciu merania pred aj po ťahaním predstavoval nízky vnútorný priemer vzorky rúry, ktorý obmedzoval projektovanie štruktúrovaného svetla do daných miest. Cieľom experimentálneho hodnotenia bolo porovnanie meraných hodnôt v jednotlivých vzdialenostiach od konca vzorky rúry [3].

Tab. 1. Namerané hodnoty v jednotlivých rezoch - pred ťahaním [3]

Vzdialenosť rezu [mm]	D1 [mm]	D2 [mm]	Kruhovitosť		Sústrednosť
			D1	D2	
3	18,002	13,949	0,02	0,02	0,02
5	18,001	13,948	0,02	0,02	0,00
7	18,000	13,945	0,02	0,02	0,01
9	18,000	13,944	0,02	0,02	0,02
11	18,000	13,942	0,02	0,03	0,03
13	18,000	13,938	0,02	0,09	0,04
15	18,000	-	0,02	-	-
17	18,001	-	0,02	-	-
19	18,003	-	0,03	-	-
21	18,004	-	0,02	-	-
23	18,006	-	0,02	-	-
25	18,007	-	0,02	-	-
27	18,008	-	0,02	-	-
29	18,007	-	0,02	-	-
31	18,008	-	0,06	-	-

Namerané hodnoty priemerov vzoriek rúr sa pred aj po ťahaní menili rádo vo tisícinách milimetra, to znamená, že priemery boli viac-menej konštantné vo všetkých vzdialenostiach od konca rúry. Takisto aj hodnoty odchýlok geometrických tvarov sa menili len nebadane. Z tab. 1 možno tiež vidieť, že hodnoty vnútorného priemeru a odchýlok geometrických

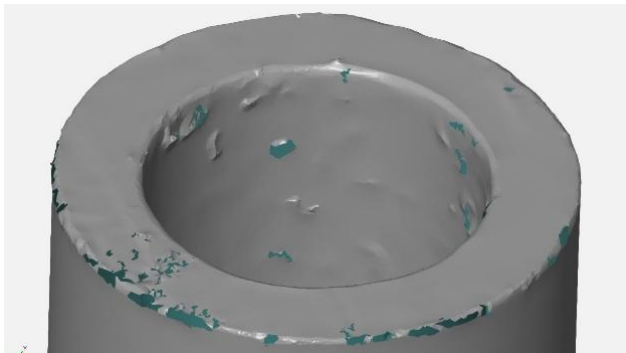
tvarov pred ťahaním vo vzdialenosti 13 mm mali väčšiu odchýlku od priemernej hodnoty, a to z dôvodu vytvorenia neúplného obrysu vnútorného priemeru, čo následne viedlo k nepresnému vytvoreniu best-fit kružnice predstavujúcej vnútorný priemer vzorky rúry. Po ťahaní sa rozptyl hodnôt ako priemerov vzoriek rúr, tak aj odchýlok od geometrických tvarov, výraznejšie nemenil [3].

Tab. 2. Namerané hodnoty v jednotlivých rezoch - po ťahaní [3]

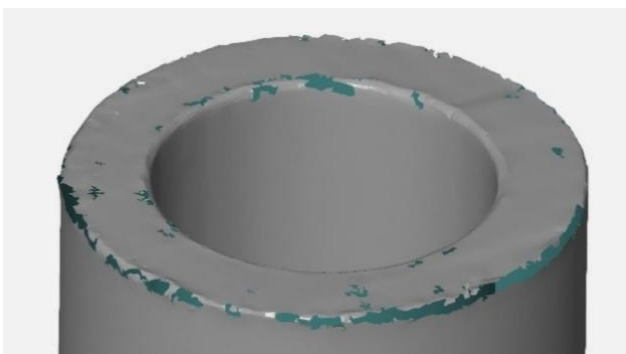
Vzdialenosť rezu [mm]	D1 [mm]	D2 [mm]	Kruhovitosť		Sústrednosť
			D1	D2	
3	11,988	7,832	0,01	0,03	0,02
5	11,989	7,828	0,01	0,03	0,02
7	11,989	7,827	0,01	0,03	0,02
9	11,990	-	0,01	-	-
11	11,991	-	0,01	-	-
13	11,991	-	0,01	-	-
15	11,992	-	0,01	-	-
17	11,992	-	0,01	-	-
19	11,993	-	0,01	-	-
21	11,994	-	0,02	-	-
23	11,995	-	0,01	-	-
25	11,997	-	0,02	-	-
27	11,997	-	0,01	-	-
29	11,997	-	0,01	-	-
31	11,998	-	0,02	-	-

2.2 Vyhodnotenie nameraných hodnôt pri znečistenej vzorke rúry

Ďalšie experimentálne meranie bolo zamerané na vyhodnotenie vplyvu znečistenia vzorky rúry na namerané hodnoty. Konce rúr boli po ťahaní zdeformované, preto ich bolo nutné zarovnať pomocou píly. Proces pílenia zanechal vo vnútornom priestore vzorky rúry kovové triesky a tento experiment skúmal ich vplyv na výsledky merania. Namerané hodnoty rozmerov a geometrických tvarov očistenej (1) a neočistenej (1') vzorky rúry boli následne porovnané. Z tab. 3 je evidentné, že vnútorný priemer rúry zanesenej kovovými trieskami v porovnaní s priemerom očistenej rúry bol menší takmer o stotinu milimetra, t. j. o 0,09 mm. Znečistenie malo vplyv aj na hodnotu kruhovitosti, ktorá sa zmenila o 0,04. Z uvedeného experimentu vyplýva, že povrch objektu je nutné pred digitalizáciou dôkladne očistiť za účelom dosiahnutia čo najväčšej presnosti merania [3].



a)



b)

Obr. 7. Porovnanie nameraných hodnôt [3]:
a) znečistenej vzorky rúry kovovými trieskami,
b) očistenej vzorky rúry

Tab . 3. Porovnanie hodnôt čistej a znečistenej vzorky rúry [3]

Č.	D1 [mm]		D2 [mm]		Hrúbka steny [mm]		R [%]	Kruhovitosť				Sústrednosť	
	pred	po	pred	po	pred	po	pred	po		po		pred	po
1	18,001	11,988	13,949	7,832	2,026	2,078	36,391	D1	D2	D1	D2		
1'	18,001	11,982	13,949	7,823	2,026	2,080	36,393	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02

2.3 Vyhodnotenie nameraných hodnôt z hľadiska rôznych nastavení polygonizácie

Uvedené experimentálne meranie bolo zamerané na zhodnotenie vplyvu rôznych nastavení polygonizácie v softvéri *GOM Inspect Suite 2020* na výstupné hodnoty. Polygonizácia vytvára z naskenovaného mraku bodov (polygónovú) sieť (.stl model), ktorá tieto body spája do jedného celku. Meranie bolo vykonané pred ťahaním na neorezanej rúre, konkrétne na vzorke s vonkajším priemerom $\varnothing 18$ mm a hrúbkou steny 1 mm [3].

V softvéri *GOM Inspect* parametre *No*, *More details*, *Standard*, *Less details* a *Smallest data volume* pri polygonizácii ovplyvňujú úroveň detailov a veľkosť výsledného súboru po vytvorení trojuholníkovej siete z mraku bodov. Tieto možnosti nastavujú mieru zjednodušenia modelu pri zachovaní dostatočnej presnosti pre konkrétne účely:

- *No*: Tento parameter znamená, že žiadne zjednodušenie nebude použité. Softvér použije maximálne detaily z pôvodných dát mraku

bodov, čo zachová najvyššiu úroveň presnosti. Táto voľba generuje najväčšie súbory a môže spôsobiť, že model bude preťažovať výkon počítača pri vizualizácii alebo ďalšom spracovaní,

- *More details*: Tento parameter zachová veľa detailov, ale aplikuje jemné zjednodušenie, aby sa zmenšila veľkosť súboru. Trojuholníková sieť (.stl model) má vysokú presnosť a detaily sú stále na vysokej úrovni. Objem dát bude o niečo menší ako pri voľbe *No*,
- *Standard*: Vyvážená voľba medzi úrovňou detailov a veľkosťou súboru. Používa sa, keď je potrebná dostatočná presnosť modelu, ale aj optimalizovaná veľkosť súboru. Je to vhodná možnosť pre väčšinu aplikácií, kde presnosť detailov nemusí byť absolútne maximálna, ale stále postačuje pre bežné využitie v analýze alebo vizualizácii,
- *Less details*: Tento parameter znižuje úroveň detailov viac než *Standard*, čím vytvára ešte menší súbor. V tejto voľbe sú zachované základné tvary a kontúry, ale jemné detaily sa strácajú. Tento režim je vhodný, ak model je potrebný pre rýchlu vizualizáciu alebo analýzu, kde nie sú potrebné vysoké detaily,

- *Smallest data volume*: Táto voľba aplikuje najväčšiu mieru zjednodušenia, aby sa minimalizoval objem dát. Výsledná trojuholníková sieť má najmenší počet trojuholníkov. Táto voľba je vhodná na rýchle náhľady alebo v prípadoch, kde je nutné šetriť pamäť počítača, pričom sa obetuje veľká časť detailov.

Rozdiely medzi nimi teda spočívajú najmä v počte a veľkosti trojuholníkov, ktoré tvoria výslednú sieť, a tým aj v úrovni detailov a objeme dát vo výslednom súbore.

Uvedeným experimentom bolo zistené (tab. 4), že jednotlivé nastavenia polygonizácie nemajú významný vplyv na výsledky merania, nakoľko rozdiely medzi nimi sú v desiatich milimetroch. Najväčší rozdiel nastavení bol vo vzhlade polygonizovaných modelov, pričom niektoré mali viac vyhladenú štruktúru povrchu v porovnaní s inými. Polygonizácia nemala zásadný vplyv ani na veľkosť jednotlivých súborov modelov [3].

Tab. 4. Porovnanie nameraných hodnôt pri rôznych nastaveniach polygonizácie [3]

Nastavenie	D1 [mm]	D2 [mm]
No	17,97637	16,02247
More details	17,97741	16,02464
Standard	17,97763	16,02348
Less details	17,97756	16,02493
Smallest data volume	17,97744	16,23260

ZÁVER

3D digitalizované boli vzorky oceľových bezšvíkových rúr, ktoré boli experimentálne ťahané za studena na jeden ťah pomocou trhacieho stroja EU 40. Metóda optického 3D skenovania sa mimoriadne osvedčila [3].

Ako jej výhody možno uviesť získanie kompletného digitálneho modelu vzorky rúry, ku ktorej bolo možné sa kedykoľvek vrátiť bez potreby ďalšieho skenovania [3].

Hlavnou nevýhodou tejto metódy 3D digitalizácie bolo nedostatočné skenovanie vnútorného priemeru, ktoré bolo pri vzorke rúry pred ťahaním možné do vzdialenosti približne 13 mm a pri rúre po ťahaní to bolo už len do vzdialenosti cca 7 mm, avšak pre potreby tohto experimentu boli tieto vzdialenosti dostačujúce. I keď povrch digitalizovaných vzoriek rúr bol lesklý, optické 3D skenovanie sa realizovalo bez použitia zmatňujúceho kriedového spreja. Bolo to hlavne z dôvodu možného skreslenia nameraných výsledkov, keďže by na povrchu skenovanej rúry vznikla tenká vrstva po sprejovaní, a tým spôsobila nárast hrúbky materiálu. Ako ďalší dôvod možno udať zníženie finančnej náročnosti a skrátenie času digitalizácie [3].

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).

Článok vznikol s podporou grantovej úlohy KEGA 026STU-4/2023 (Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov).

LITERATÚRA

[1] 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, No. 2, pp. 1-22, ISSN 2076-3417.

[2] 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.

[3] HAVRAN, F. (2021): *Vyhodnotenie presnosti vybraných rozmerov bezšvíkových oceľových 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.

[4] GROSS, L. (2022): *Získavanie dát 3D digitalizáciou a vyhodnotenie geometrických tolerancií oceľových 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.

[5] KRITIKOS, M. - BURANSKÝ, I. - BURANSKÁ, E. - MOJŽIŠ, M. (2019): *Evaluation of accuracy of seamless steel tube scanning by industrial computed tomography*. In: Modern Technologies in Manufacturing (MTeM 2019): 14th International Conference, 09-12.10., Cluj-Napoca, Romania. 1. vyd. United Kingdom: EDP Sciences, pp. 1-8, ISBN 978-2-7598-9083-5.

[6] BÍLIK, J. - SOBOTA, R. - NECPAL, M. (2023): *Výroba bezšvíkových rúr. Teoretickotechnologické aspekty výroby*. 1. vyd. Bratislava: Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve SPEKTRUM, 71 p., ISBN 978-80-227-5308-1.

[7] BÍLIK, J. - SOBOTA, R. - KAPUSTOVÁ, M. - KRITIKOS, M. (2021): Vplyv veľkosti pretvorenia na presnosť rúr pri prievlačnom ťahaní jedno a dvojťahovou technológiou. In: Technológ, EDIS - vydavateľstve UNIZA, Vol. 13, No. 3, pp. 20-24, ISSN 1337-8996.

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

[9] 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.