

Jerzy Nowacki\*, Norbert Sieczkiewicz, Michał Nocoń  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

# Pomiar odkształceń spawalniczych metodami skanowania 3D

## Measurement of welding deformations using the 3D scanning methods

### ABSTRACT

The article describe major problems related to measurement of welding deformations, in particular using the 3D scanning methods are presented. The study includes a review of already available industrial 3D scanning technology solutions. Experimental investigation of high strength steel welding deformations has been done. Surfacing was performed on S960QL steel by SAW method with different welding parameters applied. Appropriate 3D scanning technology was selected. 3D scans were obtained, using Kinect for Windows v1 and v2, DAVID SLS-3. Steel plates were measured using GOM ATOS III Triple Scan. Metrology grade 3D scanner used for measurements of weld distortions ensured required accuracy of measurement. Results proved the rightness and accuracy of such solution.

**Keywords:** welding deformations; 3D scanning; structured light scanning; laser scanning

### STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano podstawową problematykę związaną z pomiarem odkształceń spawalniczych metodami skanowania 3D. Dokonano przeglądu dostępnych rozwiązań przemysłowych na rynku skanerów 3D oraz wykonano analizę wyników badań eksperymentalnych wielkości odkształceń stali o wysokiej wytrzymałości S960QL napawanej metodą SAW. Dobrano technikę skanowania dla prostokątnych próbek stalowych, wykorzystując następujące technologie: Kinect dla systemu Windows v1 oraz v2, DAVID SLS-3. Podczas pomiarów odkształceń wykorzystano skaner GOM ATOS III Triple Scan. Wyniki badań uzasadniają zastosowanie przemysłowego skanera 3D do pomiaru wielkości odkształceń, który pozwala na rejestrację najmniejszych różnic pomiędzy próbką przed i po napawaniu.

**Słowa kluczowe:** odkształcenia spawalnicze; skanowanie 3D; metoda światła strukturalnego; skanowanie laserowe

### 1. Wstęp

Podczas spawania i napawania konstrukcji stalowych, w wyniku grzania, topienia i chłodzenia w spoinie oraz materiale podstawowym powstają naprężenia cieplne, które mogą być przyczyną odkształceń, przekroczenia tolerancji wymiarowych oraz niedopasowania do siebie elementów podczas procesu montażu całej konstrukcji.

Dążenie do zmniejszenia kosztów produkcji, przy jednoczesnym zwiększaniu wymagań dotyczących ich wytrzymałości i bezpieczeństwa, wymaga poszukiwania metod pozwalających na ograniczenie wielkości odkształceń spawalniczych. Usuwanie odkształceń spawalniczych związane jest z dodatkowymi, często kosztownymi i czasochłonnymi, procesami. Przykładem takich procesów jest prostowanie za pomocą prasy, prostowanie płomiennicowe, wyżarzanie odprężające oraz stabilizacja wibracyjna.

W artykule rozpatrywane będą bezkontaktowe metody pomiaru odkształceń przy użyciu skanowania 3D. Pozwalają one na bardzo dokładne pomiary i późniejszą analizę względem elementu odniesienia, jak na przykład model CAD, dzięki czemu możliwe jest poznanie zmian wymiarów w wyniku spawania oraz lepsze zaprojektowanie konstrukcji i opracowanie technologii spawania w celu zwiększenia potencjału eksploatacyjnego wytworzonych konstrukcji.

### 2. Wymagania stawiane skanerom 3D

Podczas doboru skanera do kontroli odkształceń spawalniczych należy kierować się podobnymi wymaganiami jak

dla skanerów do kontroli jakości, które obejmują:

- dokładność odtworzenia za pomocą skanera – należy zwrócić uwagę na maksymalny błąd określony w specyfikacji skanera;
- stopień złożoności geometrii skanowanego obiektu – skomplikowany kształt, miejsca trudnodostępne (np. głębokie otwory) oraz złożona geometria obiektu wymagają zastosowania skanera z dwiema kamerami, co zmniejsza ilość pozycji skanowania, a więc skraca czas pracy. Zmniejsza się również ilość szumu, w porównaniu do skanera z jedną kamerą, co zwiększa jakość skanu;
- wymiary minimalne oraz maksymalne obiektu skanowanego – należy uwzględnić, jakie maksymalne pole pomiarowe można wykorzystać. Należy tak dobrać pole pomiarowe, aby wykorzystać całą rozdzielczość skanera na obiekt. Dobrze dobrane pole pomiarowe charakteryzuje się pełnym wykorzystaniem pikseli podczas procesu skanowania;
- barwa i materiał detalu – należy sprawdzić, czy detal wymaga matowienia z użyciem preparatów matujących, co może być przeszkodą w zachowaniu oryginalnej barwy skanowanego przedmiotu. W przypadku badania próbek stalowych, jedynym problemem mogą być refleksy na powierzchni materiału [1].

### 3. Wybrane rodzaje metod skanowania 3D

#### 3.1 Skanery digitalizacyjne i metrologiczne

Skanery 3D przeznaczone są do digitalizacji oraz metrologii [1]. Dokładność skanerów do digitalizacji jest

\*Autor korespondencyjny. E-mail: jerzy.nowacki@zut.edu.pl

wystarczająca do odwzorowania geometrii skanowanego obiektu bez wymogu wzorcowania. Skanery stosowane w metrologii muszą spełniać wymagania dokładności wg normy VDI/VDE 2634 lub ISO 10360 część 8. Mogą również spełniać wymagania ASTM (Tab. 1). Norma VDI/VDE 2634 dotyczy badania dokładności urządzeń optycznych wykonujących pomiary na podstawie jednego zdjęcia, zaś jej druga część dotyczy badania urządzeń optycznych wykonujących pomiary na podstawie kilku zdjęć. Podaje algorytm weryfikacji urządzenia oraz schemat postępowania w celu kalibracji urządzenia. Opisuje również sposób ponownej weryfikacji urządzenia. Jest ono ważne dla użytkownika urządzenia pomiarowego oraz pozwala na utrzymanie granicznych błędów dopuszczalnych na stałym poziomie.

Dokładność skanera 3D określają:

- dokładność głowicy skanującej;
- dokładność pomiaru odległości między sferami;
- dokładność odwzorowania płaszczyzny [2].

Tab. 1. Wykaz norm dotyczących metod testowania skanerów 3D według wymagań ASTM [3].

Tab. 1. ASTM standards list related to evaluation of 3D scanners [3].

Numer normy	Tytuł normy
E2919 - 14	Standard Test Method for Evaluating the Performance of Systems that Measure Static, Six Degrees of Freedom (6DOF), Pose
E2938 - 15	Standard Test Method for Evaluating the Relative-Range Measurement Performance of 3D Imaging Systems in the Medium Range
E3064 - 16	Standard Test Method for Evaluating the Performance of Optical Tracking Systems that Measure Six Degrees of Freedom (6DOF) Pose
E3124 - 17	Standard Test Method for Measuring System Latency Performance of Optical Tracking Systems that Measure Six Degrees of Freedom (6DOF) Pose
E3125 - 17	Standard Test Method for Evaluating the Point-to-Point Distance Measurement Performance of Spherical Coordinate 3D Imaging Systems in the Medium Range

### 3.2 Skanery laserowe bliskiego zasięgu

Skanery laserowe bliskiego zasięgu stosowane są do triangulacji dla rejestracji kształtu trójwymiarowego obiektu i opisu pod postacią chmury punktów. Wiązka lasera kierowana jest na powierzchnię obiektu i po odbiciu od skanowanej powierzchni jej początkowa trajektoria zostaje zaburzona oraz zebrana w sensorze optycznym CCD. Dzięki triangulacji na podstawie zaburzonej wiązki można określić kąt odbicia światła, który jest zależny od odległości skanera od badanej powierzchni dzięki czemu staje się podstawą do obliczenia odległości obiektu od skanera. Gdy skaner zbierze wystarczającą ilość danych, możliwe jest stworzenie mapy powierzchni skanowanego obiektu. Aby możliwe było poprawne zeskanowanie obiektu, dystans między sensorem, a źródłem lasera musi być znany i ściśle określony. Zaletami skanerów laserowych bliskiego zasięgu jest jego dokładność i rozdzielczość oraz możliwość przenoszenia skanera. Takie skanery są również mniej wrażliwe na zmiany warunków oświetlenia w porównaniu z na przykład fotogrametrią.

Skanery laserowe bliskiego zasięgu nie sprawdzają się w przypadku przezroczystych lub błyszczących powierzchni i w związku z tym wymagane jest wówczas zmatowienie powierzchni [4,5].

### 3.3 Skanery laserowe dalekiego zasięgu

Skanery laserowe dalekiego zasięgu dzielą się na skanery impulsowe i skanery z przesunięciem fazowym. Do zastosowań na bliższe odległości lepiej sprawdzają się skanery oparte na zasadzie triangulacji, ponieważ wykazują się większą dokładnością (Tab. 2).

Tab. 2. Charakterystyki metrologiczne laserowych metod pomiarowych [6].

Tab. 2. The metrological characteristics of laser scanning techniques [6].

Metoda pomiarowa	Zakres pomiarowy, m	Dokładność, mm	Szybkość skanowania, punkty na sekundę
Pomiar czasu przelotu impulsu	< 1500	< 20	Do 12 000
Pomiar przesunięcia fazowego	< 100	< 10	Do 625 000
Triangulacja	Kilka metrów	< 0,1	Do 10 000

### Skanery impulsowe

Skanery impulsowe mogą skanować na dalekie odległości dzięki temu, że w nich można uzyskać dużą moc w impulsie oraz krótki czas trwania impulsu. Skanery impulsowe mierzą odległość obiektu od sensora na podstawie czasu, jaki jest potrzebny wiązce lasera, aby dotrzeć do przedmiotu i wrócić do sensora. Do przetworzenia danych wykorzystuje się zespół obwodów elektrycznych, dzięki którym możliwe jest określenie, w jakim czasie światło lasera wróci do sensora z dokładnością do pikosekundy. W tych laserach jeden pomiar jest w stanie określić pozycję tylko jednego punktu, dlatego, aby zeskanować trójwymiarową powierzchnię, laser musi się obracać o 360 stopni. Dokonuje się tego przeważnie za pomocą lustra (Rys. 1), które zmienia kierunek lasera. Zaletą tych laserów jest możliwość skanowania dużych obiektów, zaś ograniczeniem jest niewielka szybkość skanowania [5,7].

### Skanery z przesunięciem fazowym

Skanery z przesunięciem fazowym, poza pulsującym laserem, posiadają możliwość zmiany mocy wiązki lasera. Emitują wiązkę o zmiennej amplitudzie. Różnica w fazie wiązki wysłanej i odbitej stanowi podstawę oszacowania czasu opóźnienia i odległości. Dzięki określaniu odległości na podstawie czasu przelotu impulsu oraz przesunięcia fazowego, skanery z przesunięciem fazowym są dokładniejsze niż skanery impulsowe, jednak mają większe ograniczenia zasięgu [4,7]. Przykładem takiego skanera, gdzie odległość mierzona jest na podstawie różnicy w fazie wiązki lasera, jest przemysłowy skaner Omnitrac 2 (Rys. 2) umożliwiający skanowanie dużych obiektów w zadanych punktach. Informacje o współrzędnych punktu uzyskuje się na podstawie porównania faz wiązki wysłanej przez głowicę i odbitej

od przedmiotu, a także dwóch enkoderów dostarczających informacji o obrotach głowicy w dwóch płaszczyznach [8].



Rys. 1. Lotniczy skaner laserowy Dornier EBK 3D-Laser-Kamera wyposażony w ruchome lustro.

Fig. 1. The laser-based range imaging camera Dornier EBK 3D-Laser-Kamera with rotating mirror, which transmits a laser pulse.



Rys. 2. Tracker laserowy Omnitrac 2 firmy Automated Precision wyposażony w moduł komunikacji bezprzewodowej. Dodatkowo zaprezentowano dwa retroreflektory o średnicach 1,5 cala oraz 0,5 cala, które z wykorzystaniem odpowiednich adapterów, mogą służyć do pomiarów płaszczyzn (adapter „flat nest”) i otworów (adapter „pin nest”).

Fig. 2. Omnitrac 2 is wireless laser tracker from Automated Precision. Picture presents two spherically mounted retroreflectors and laser tracker. Retroreflectors are used in pair with additional tooling such as a flat nest or pin nest.

### 3.4 Skanery emitujące światło strukturalne

Skanery emitujące światło strukturalne oparte są na niebieskim lub białym świetle LED. Światło może być wyświetlane przez projektor LCD lub DLP. Skanery oparte na świetle strukturalnym wyświetlają serię liniowych wzorów świetlnych na obiekt. Kształt przedmiotu jest wykrywany przez jedną lub dwie kamery poprzez odkształcenie się wzoru. Oprogramowanie jest w stanie wyodrębnić krawędzie każdej linii we wzorze, aby następnie bazując na triangulacji, poznać odległość badanej powierzchni od skanera i określić kształt badanego obiektu [9]. W przypadku układów z dwoma kamerami uzyskuje się dwa zdjęcia na skan, dzięki czemu możliwe jest tworzenie obrazu 3D w jednym ujęciu. Skanery te cechują się dużą prędkością skanowania, która pozwala na wykonanie pojedynczego skanu obiektu w ciągu 2 sekund, oraz wysoką rozdzielczością. W przeciwieństwie

do skanerów laserowych skanery oparte na świetle strukturalnym są bezpieczne dla oczu. Wadą tych skanerów w przypadku skomplikowanych kształtów przedmiotu jest konieczność wykonania skanów pod różnymi kątami, aby w całości zeskanować obiekt. Dodatkowo skanery te są wrażliwe na oświetlenie otoczenia i nie powinny pracować w warunkach terenowych. Wrażliwość na otoczenie można częściowo zmniejszyć przez zastosowanie skanerów z projektorem emitującym niebieskie światło.



Rys. 3. GOM ATOS ScanPort - skaner wykorzystujący światło strukturalne wyposażony jest w zautomatyzowany stolik obrotowy; widoczna płyta kalibracyjna zamontowana w miejscu stolika.







Fig. 3. GOM ATOS ScanPort - an optical desktop scanner equipped with automated rotating table. Picture presents ATOS ScanPort with calibration pad in place of rotating table.

Przykładem przemysłowego skanera optycznego ze światłem strukturalnym jest skaner GOM ATOS Triple Scan (Rys. 8) oraz ATOS Core (Rys. 3). Pomiary można dokonywać ręcznie umieszczając skaner na statywie lub pulpicie. Skaner ten może być również komponentem optycznym we w pełni zautomatyzowanym urządzeniu pomiarowym firmy GOM, gdzie dodatkowo można na skaner Triple Scan nałożyć skaner fotogrametryczny pozwalający na lepszą odtwórzalność oraz jednakową dokładność w całym zakresie obszaru skanowania. Wynika to z poprawy pozycjonowania na podstawie punktów referencyjnych. Skaner Atos Triple Scan wykorzystuje jako źródło światła niebieskie światło LED, a do rejestracji obrazu wykorzystywane są kamery w technice stereoskopii [4,10]. Konkurencyjnym rozwiązaniem są systemy COMET firmy Zeiss.

### 4. Próby skanowania 3D odkształceń spawalniczych

W celu kontroli odkształceń spawalniczych zeskanowano kwadratowe próbki o wymiarach 176 x 176 x 8 mm, wykonane ze stali S960QL, przed i po napawaniu łukiem krytym. Następnie przeprowadzono porównanie siatki po napawaniu z wykorzystaniem modelu CAD (wygenerowanego na podstawie siatki przed napawaniem), uzyskując kolorowe mapy odchyłek.

Tab. 3. Skanery 3D wraz z wynikiem pomiaru.  
Tab. 3. 3D scanners and results of scanning.

Metoda skanowania	Urządzenie		Wynik skanowania
Światło strukturalne	DAVID SLS-3		
Światło strukturalne	Kinect dla systemu Windows v1		
Analizator czasu przelotu	Kinect dla systemu Windows v2		

Dobierając technikę skanowania odpowiednią do założonego zadania pomiarowego, przeanalizowano barwę i kształt detalu oraz jego wielkość. Wytypowane metody skanowania obejmowały triangulację laserową oraz skanowanie metodą światła strukturalnego. Na podstawie wstępnych badań wybrano metodę światła strukturalnego (Tab. 3). Próbką zeskanowaną urządzeniem Kinect dla systemu Windows v2 charakteryzowała się najmniejszą ilością detali, zaś najlepszy rezultat uzyskano za pomocą skanera DAVID SLS-3. W celu uzyskania wymaganej dokładności i zarejestrowania najmniejszych odkształceń spawalniczych, skanowanie próbek zostało wykonane na urządzeniu GOM ATOS ScanBox serii 6, które jest metrologicznym skanerem bazującym na świetle strukturalnym.

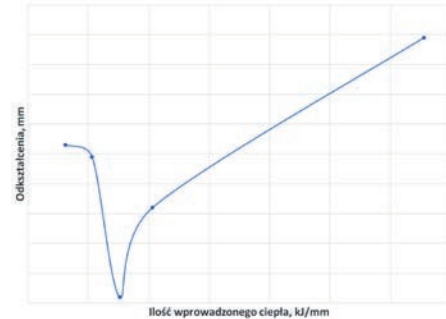


Rys. 4. GOM ATOS ScanBox serii 6 przygotowany do skanowania próbki zamocowanej w imadle.

Fig. 4. GOM ATOS ScanBox series 6 prepared to 3D scanning of clamp mounted object.

W celu określenia wpływu ilości wprowadzonego ciepła w procesie napawania na odkształcenia w próbkach wykonanych ze stali S960QL, dokonano analizy modeli w aspekcie odkształceń kątowych. Zależności odkształceń próbek od ilości wprowadzonego ciepła we wszystkich rozpatrywanych

przekrojach były bardzo zbliżone, co pozwoliło na określenie zmian w badanych próbkach (Rys. 5). Przebieg zależności odkształceń od ilości wprowadzonego ciepła nie jest monotonicznie rosnący. W pewnym przedziale ilości wprowadzonego ciepła wartość odkształceń gwałtownie spada.



Rys. 5. Wykres zestawienia odkształceń próbek w poszczególnych przekrojach w zależności od wprowadzonego ciepła.  
Fig. 5. Effect of heat input on welding deformations.

## 5. Wnioski

Wykazano, że skanowanie metodą światła strukturalnego może zostać wykorzystane do pomiaru odkształceń spawalniczych oraz ich późniejszej analizy.

Z przeprowadzonych badań wynika, że istnieje wąski zakres ilości wprowadzonego ciepła, dla którego odkształcenia spawalnicze są znacznie mniejsze niż dla pozostałych ilości wprowadzonego ciepła.

Zależność wprowadzonego ciepła do materiału podczas napawania nie jest liniowa. Zakres optymalnych parametrów spawania można wyznaczyć stosując metodę przygotowywania elementów z wykorzystaniem zmiennych parametrów spawania, następnie skanowania gotowych próbek za pomocą skanera 3D oraz analizie wielkości odkształceń.

## 6. Literatura/References

- [1] Logismarket.pl. [Online]. Available: <https://www.logismarket.pl/ic/prima-polska-sp-z-oo-informacje-nt-skanerow-3d-834595.pdf>. [Accessed: 01- Aug- 2018].
- [2] A. Wszółek, "Dokładność skanera 3D", *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie*, vol. 6, no. 81, p. 12, 2014.
- [3] "3D Imaging Standards", *Astm.org*, 2018. [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/3d-imaging-standards.html>. [Accessed: 01- Aug- 2018].
- [4] Ems-usa.com. [Online]. Available: <https://www.ems-usa.com/tech-papers/3D%20Scanning%20Technologies%20.pdf>. [Accessed: 01- Aug- 2018].
- [5] "3D scanning technologies - Aniwa.com", *Aniwa.com*. [Online]. Available: <https://www.aniwa.com/3d-scanning-technologies-and-the-3d-scanning-process/>. [Accessed: 01- Aug- 2018].
- [6] F. Huang, R. Klette and K. Scheibe, *Panoramic Imaging: Sensor-Line Cameras and Laser Range-Finders*. Wiley, 2008.
- [7] G. Vosselman and H. Maas, *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, 2010.
- [8] "FARO | 3D Measurement, Imaging & Realization Technology", *www.faro.com*. [Online]. Available: <https://www.faro.com>. [Accessed: 08- Aug- 2018].
- [9] P. ALLARD and J. LAVOIE, "Differentiation of 3D scanners and their positioning method when applied to pipeline integrity", *EITEP Institute*, 2014.
- [10] "Precise Industrial 3D Metrology", *Gom.com*, 2018. [Online]. Available: <http://www.gom.com/>. [Accessed: 01- Aug- 2018].