

# METODA INSPEKCJI USZCZELNIACZY WAŁU Z ZASTOSOWANIEM TRIANGULACJI LASEROWEJ 2D

## *The method for inspection of shaft seals using 2D laser triangulation*

Piotr CZAJKA, Piotr GARBACZ

---

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodę automatycznej kontroli uszczelniaczy wału montowanych w silnikach spalinowych. W bezkontaktowej metodzie inspekcji wykorzystano technikę triangulacji laserowej typu 2D. W systemach wykorzystujących tą technikę na powierzchni badanego obiektu wyświetlana jest linia utworzona przez promieniowanie laserowe. Odbite od powierzchni obiektu światło następnie rzutowane jest na światłoczułą matrycę, umieszczoną pod kątem w stosunku do kierunku projektowania światła laserowego. Zmiana odległości badanej powierzchni względem głowicy pomiarowej powoduje zmianę położenia punktów na światłoczułej matrycy. Na potrzeby wykonanych prac badawczych opracowano stanowisko eksperymentalne, w którym kontrolowany uszczelniaacz umieszczony jest w gnieździe przykręconym do stolika obrotowego, natomiast nad detalem, na dołączonym ramieniu, zamocowana jest laserowa głowica pomiarowa typu 2D. Podczas obrotu stolika przesyłana jest informacja o bieżącym położeniu uszczelniacza. Na tej podstawie kontroler systemu pomiarowego gromadzi w pamięci poszczególne profile 2D kontrolowanego uszczelniacza. Po zebraniu ustawionej ilości profili 2D następuje analiza zeskanowanej powierzchni oraz wydanie decyzji o klasyfikacji badanego wyrobu. W ramach badań eksperymentalnych zidentyfikowano typowe wady występujące na wybranych powierzchniach uszczelniaczy i opracowano katalog wad. W artykule zaprezentowano również przykładowe wyniki skanowania powierzchni uszczelniaczy, zawierające wytypowane rodzaje wad. Omówiono zalety i ograniczenia proponowanej metody.

**Słowa kluczowe:** metoda triangulacji laserowej 2D, skanowanie powierzchni, uszczelniaacz wału, detekcja wad

**Abstract:** The article presents a inspection method for automatic control of internal combustion engines seals. The proposed non-contact method of inspection technique utilize 2D laser triangulation technique. In the systems based on this technique line created by the laser radiation is projected on the surface of the object. The reflected light surface is then recorded by the photosensitive array placed at an angle with respect to the direction of the laser light. Changing the distance of the test surface relative to the measuring head causes a change in the position of points on the light-sensitive sensor. For the purposes of research the experimental station was developed. During the inspection the inspected seals are placed in the socket on the rotary table. The 2D laser measuring head is mounted over the inspection zone. During the rotation of the table the current position of the seal is send to the control unit. On this basis, the measurement system controller accumulates the individual 2D profiles of inspected seal in the memory. After collecting a fixed amount of 2D profiles followed by analysis of the scanned surface of the product the inspection decision is reported. As part of the experimental studies typical seals defects were identified. Additionally in the article an example of the results of the scan surface of the seals with variety types of defects are presented. The advantages and limitations of the proposed method are discussed.

**Key words:** 2D laser triangulation method, surface scanning, shaft seals, detection of defects

---

### **Wprowadzenie**

Zgodnie z aktualnymi trendami w przemyśle, wdrażane są obecnie rozwiązania umożliwiające kontrolę produkowanych wyrobów w celu osiągnięcia poziomu „zero braków” (zero defects) [8]. Ze względu na coraz większe wymogi kontroli jakości, inspekcja wizualna produktów przeprowadzana przez człowieka nie gwarantuje odpowiedniej skuteczności wykrywania i identyfikacji wad. Zastosowanie zautomatyzowanych systemów optycznej inspekcji w procesach produkcji umożliwia zwiększenie jakości wyrobów oraz wydajności procesu kontroli, przez wyeliminowanie lub zmniejszenie udziału czynnika ludzkiego. Ograniczenia w procesie kontroli jakości, związane z bezpośrednim udziałem pracownika wynikają m.in. z braku powtarzalności wykonywanych czynności kontrolnych, zmęczeniem i mniejszą sprawnością [14]. Przedmiotem artykułu jest metoda zautomatyzowanej inspekcji

powierzchni uszczelniaczy wału, w której zastosowano system wizyjny 3D [7, 11].

Zintegrowane, modułowe systemy automatycznej inspekcji, dedykowane do określonych zadań na przemysłowych stanowiskach kontroli jakości, zyskują znaczną popularność dzięki połączeniu dużych możliwości programistycznych z łatwością konfiguracji, przy jednoczesnym zachowaniu zwartości konstrukcyjnej, szybkości działania i odporności na warunki przemysłowe [5].

Uszczelniaacz wału stosowane są w przemyśle motoryzacyjnym i maszynowym do uszczelnienia szczeliny między obracającym się wałem i elementem nieruchomym. Do najważniejszych funkcji uszczelnienia należą: zatrzymywanie środka smarnego, zapobieganie wnikaniu zanieczyszczeń, oddzielanie różnych czynników oraz uszczelnianie pod ciśnieniem. Uzyskiwanie żądanej skuteczności wymaga minimalizacji tarcia i zużycia uszczelnień również w niekorzystnych warunkach



Rys. 1. Poglądowy przekrój uszczelniacza wału  
Fig. 1. The cross section of the shaft seal

eksploatacji. W celu spełnienia wymagań, obowiązujących w różnych zastosowaniach i warunkach eksploatacji, produkuje się uszczelnienia do wałów w odmiennych wersjach konstrukcyjnych i technologiach oraz z różnych materiałów [10]. Uszczelniacze wału, które są przedmiotem inspekcji, mają postać pierścienia wykonanego z gumy usztywnionego metalową wkładką (rys. 1).

Zewnętrzny pierścień osadzany jest w gnieździe obudowy za pomocą połączenia wciskowego. Wewnętrzna gumowa warga przylega natomiast do powierzchni elementu obrotowego. Od jakości wykonania wargi uszczelniającej zależy szczelność i trwałość połączenia.

Celem przeprowadzonych badań była ocena możliwości zastosowania techniki triangulacji laserowej 2D do inspekcji powierzchni uszczelniaczy wału na obecność wad, powstających podczas procesu produkcyjnego, takich jak: rysy (pęknięcia), deformacje gumowej wargi oraz obecność resztek gumy na powierzchni.

Na rys. 2 zaprezentowano kontrolowane wyroby z zaznaczonym obszarem inspekcji.

Wady w postaci pęknięcia z perforacją oraz duże deformacje wargi (objawiające się brakiem przylegania do powierzchni wału na całym obwodzie), mogą być wykryte za pomocą kontroli szczelności [3]. Wykrywanie wad w postaci np. rys na powierzchni wargi (bez perforacji) tą metodą jest jednak nieskuteczne. Alternatywną

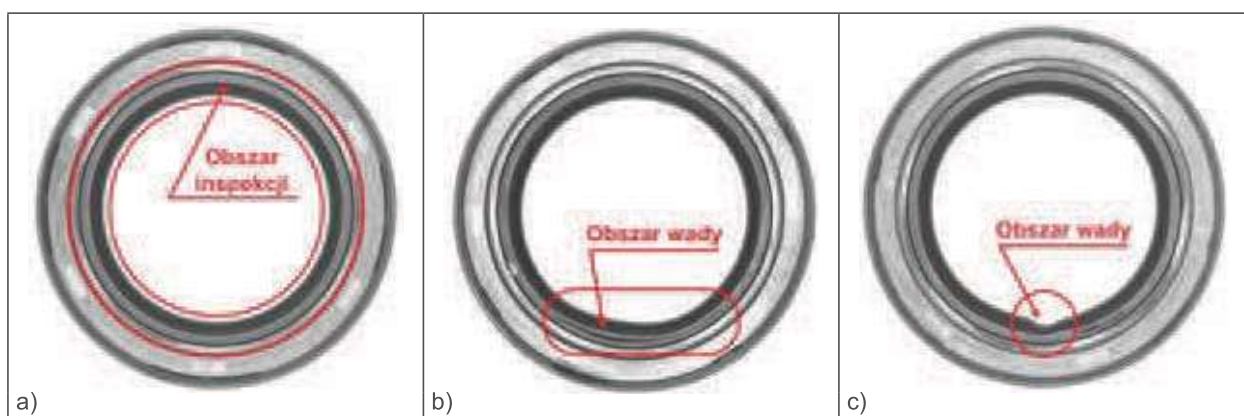
metodą inspekcji jest zastosowanie systemu wizyjnego 2D, składającego się z kamery i odpowiednio dobranego układu oświetleniowego, pozwalającego na wzmocnienie istotnych z punktu widzenia inspekcji cech badanego obiektu. Również w tym przypadku niektóre wady są trudne lub wręcz niemożliwe do wykrycia, np. drobne rysy, niewielkie zmiany na powierzchni uszczelniaczy. W celu zapewnienia wysokiego poziomu wykrywania wad zaproponowano rozwiązanie, bazujące na pomiarze geometrii powierzchni uszczelniacza w obszarze gumowej wargi.

### Metoda triangulacji laserowej 2D

Do wykonania badań zastosowano system pomiarowy, wykorzystujący bezkontaktową metodę triangulacji laserowej typu 2D. Metoda ta polega na projekcji wiązki lasera przez odpowiedni układ soczewek na powierzchni badanego obiektu [2]. Odbite od obiektu światło rzutowane jest na światłoczułą matrycę, umieszczoną pod odpowiednim kątem w stosunku do kierunku projektowania światła laserowego na badaną powierzchnię (rys. 3).

Zmiana odległości punktów oświetlonej powierzchni względem głowicy pomiarowej powoduje zmianę położenia obrazów tych punktów na światłoczułej matrycy. Podczas pojedynczego cyklu pomiarowego otrzymuje się współrzędne punktów określających geometrię badanego obiektu, oświetlonych rzutowanym na nie światłem laserowym. Optyczny układ oświetlający głowicy formuje wiązkę światła laserowego rozbieżną na jednym kierunku, a zbieżną na drugim, skupianą w formie linii na mierzonej powierzchni. Skutkuje to zmiennym zakresem pomiarowym wzdłuż projektowanej linii, w zależności od odległości płaszczyzny referencyjnej głowicy od powierzchni badanego obiektu [4].

W celu weryfikacji proponowanej metody, wytypowana została głowica laserowa firmy Keyence serii LJ-V, charakteryzująca się wysoką dokładnością pomiarową dla założonego zakresu pomiarowego (tab. 1).

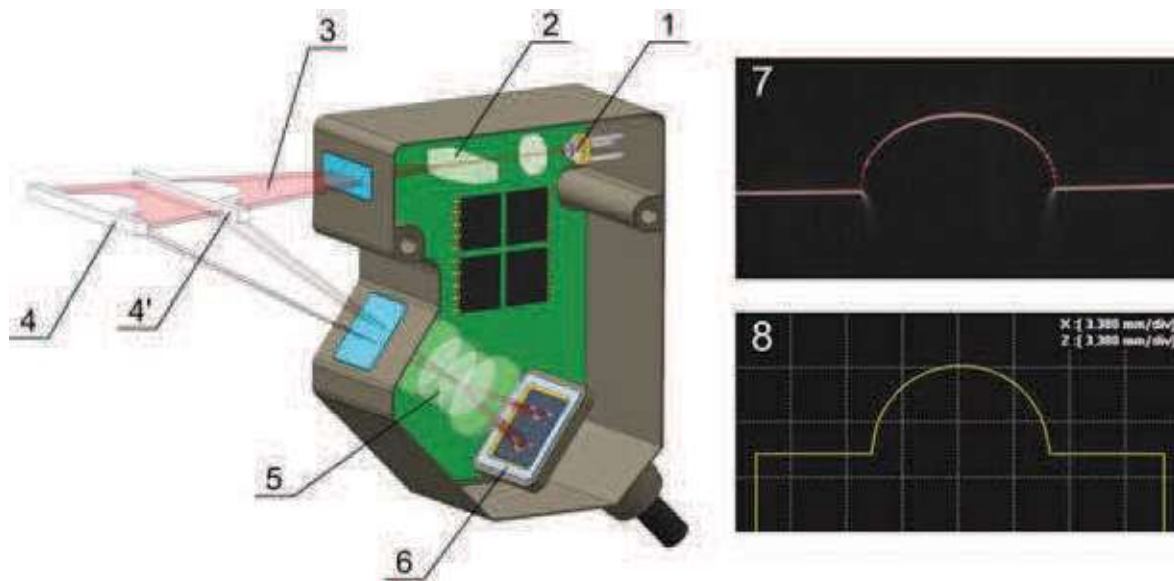


Rys. 2. Widok ogólny powierzchni przykładowych uszczelniaczy: a) wyrób wykonany poprawnie z zaznaczeniem obszaru inspekcji, b) wyrób z wadą w postaci pęknięcia wargi, c) wyrób z wadą w postaci deformacji wargi  
Fig. 2. General view of the surface of the sample seals: a) a product made correctly with marked inspection area, b) a product with a defect in the form of a crack on the lip, c) a product with a defect in the form of deformation of the lip

Tabela 1. Podstawowe parametry wytypowanej głowicy laserowej [13]

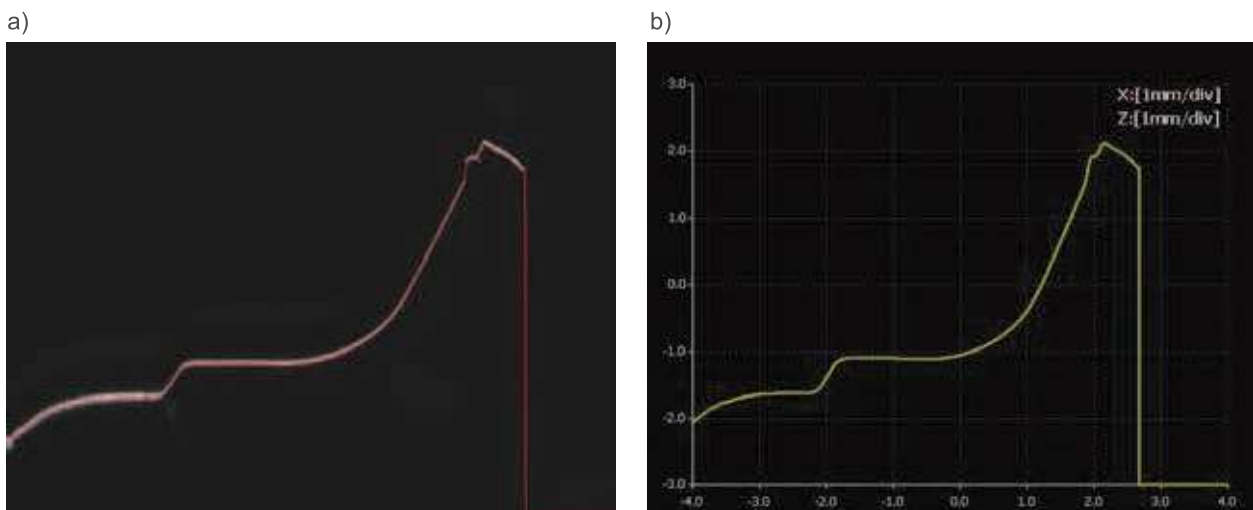
Table 1. Basic parameters for appointed laser head [13]

Parametr		Wartość
zakres pomiarowy	w osi X	6,5–7,5 mm
	w osi Z	± 2,6 mm
rozdzielczość pomiaru	w osi X	10 μm
powtarzalność pomiaru	w osi X	2,5 μm
	w osi Z	0,2 μm
nieliniowość pomiaru	w osi Z	± 0,1% zakresu pomiarowego



Rys. 3. Zasada pomiaru z wykorzystaniem metody triangulacji laserowej typu 2D: 1 – laser półprzewodnikowy, 2 – soczewki cylindryczne, 3 – oświetlająca wiązka laserowa, 4 – powierzchnia obiektu przy dwóch różnych położeniach, 5 – optyczny układ odbiorczy, 6 – matryca światłoczuła, 7 – przykładowy obraz zarejestrowany za pomocą matrycy, 8 – zmierzony profil 2D [4]

Fig. 3. The principle of the measurement using the 2D laser triangulation method: 1 – semiconductor laser, 2 – cylindrical lenses, 3 – illuminating laser beam, 4 – surface of an object at two different positions, 5 – receiving optical system, 6 – image sensor, 7 – an example of the image captured by the sensor, 8 – measured 2D profile [4]



Rys. 4. Przykładowe wyniki uzyskane za pomocą systemu pomiarowego serii LJ-V: a) obraz zarejestrowany za pomocą matrycy światłoczułej, b) wyskalowany w milimetrach profil 2D

Fig. 4. Selected results obtained using the LJ-V measurement system: a) the image captured by the sensor, b) scaled in millimeters 2D profile

Obsługę głowicy pomiarowej zapewnia dedykowany kontroler pomiarowy, który umożliwia rejestrację i analizę on-line profili 2D. Przykładowe wyniki pomiarowe w postaci pojedynczego profilu powierzchni uszczelniacza zaprezentowano na rys. 4.

Kontroler głowicy laserowej umożliwia zaprogramowanie algorytmów pomiarowych i może autonomicznie podejmować odpowiednią decyzję w zależności od otrzymanych wyników. W systemie kontroli jakości sterownik może być podłączony bezpośrednio do urządzeń wykonawczych lub do sterownika PLC. Główne funkcje pomiarowe sterownika to: pomiar wysokości z wyznaczeniem wartości maksymalnej, minimalnej i średniej,

wyznaczenie szerokości/pozycji, pomiar różnicy wysokości dwóch fragmentów profilu, wyznaczenie powierzchni kąta przecięcia oraz porównanie wyników z profilem wzorcowym. Ograniczeniem systemu pomiarowego jest fakt, iż dostępne funkcje pomiarowe bazują wyłącznie na analizie pojedynczych profili.

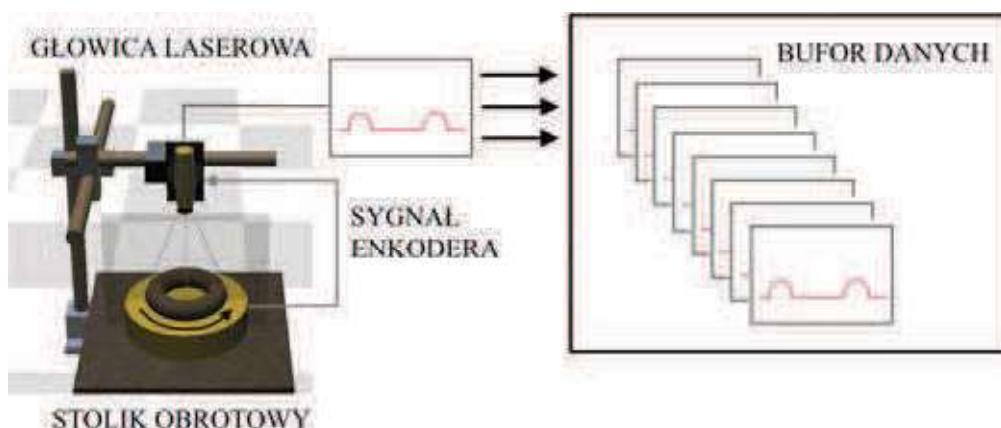
W celu prawidłowej detekcji wad powierzchni uszczelniaczy, wymagane jest wykonanie operacji rekonstrukcji 3D [12] całego obszaru podlegającego kontroli. Do realizacji tego zadania konieczne jest zapewnienie pełnego obrotu kontrolowanego produktu oraz gromadzenie profili 2D do bufora pamięci w celu ich późniejszej łącznej analizy (rys. 5).

Funkcje gromadzenia i analizy danych pomiarowych, w przypadku zastosowanej głowicy laserowej firmy Keyence, może pełnić komputer PC lub kompatybilny kontroler wizyjny Keyence serii CV-X. W przypadku pierwszego z wymienionych rozwiązań, konieczne jest opracowanie własnego oprogramowania, realizującego wszystkie operacje związane z przesyłaniem, przetwarzaniem i analizą danych. W tym celu można wykorzystać specjalistyczne biblioteki do analizy chmur punktów [1]. W drugim przypadku, wykorzystując dodatkowy kontroler wizyjny, zarejestrowany zbiór profili zostaje przekształcony na obraz,

którego wartości dla poszczególnych pikseli odpowiadają wysokości analizowanej powierzchni w danym punkcie. Rozwiązanie takie umożliwia bardzo szybką integrację systemu i opracowanie programu inspekcji z wykorzystaniem algorytmów do przetwarzania i analizy obrazów zaimplementowanych w sterowniku wizyjnym.

#### Opracowane stanowisko badawcze do kontroli uszczelniaczy wału

W celu zeskanowania kontrolowanego obszaru powierzchni uszczelniacza wału, wymagane było zapewnienie obrotu badanego obiektu względem głowicy pomiarowej. Informacja pochodząca z układu pomiarowego, w połączeniu z informacją o położeniu stolika pozycjonującego, umożliwia odtworzenie kształtu powierzchni badanego obiektu na podstawie zbioru zarejestrowanych profili. Do skanowania powierzchni uszczelniacza wału został zastosowany, opracowany w Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu, profilometr laserowy 3D-R, przeznaczony do bezkontaktowych pomiarów i odtwarzania kształtu powierzchni wyrobów [6]. Opracowane stanowisko badawcze zostało zaprezentowane na rys. 6. Kontrolowany uszczelniacz był umieszczany w gnieździe



Rys. 5. Idea odtwarzania geometrii powierzchni uszczelniacza z zastosowaniem głowicy laserowej i stolika obrotowego  
Fig. 5. The idea of the 3D reconstruction of the seal surface geometry using the laser head and rotary table



Rys. 6. Opracowane eksperymentalne stanowisko badawcze do kontroli uszczelniaczy wału: a) widok ogólny, b) zbliżenie na strefę pomiarową  
Fig. 6. The developed experimental test stand for the inspection of shaft seals: a) general view, b) close-up on the measurement area

przykręconym do stolika obrotowego, natomiast nad detalem, na dołączonym ramieniu, była zamocowana laserowa głowica pomiarowa typu 2D.

W badaniach wykorzystany został modułowy kontroler wizyjny firmy Keyence. W wyniku połączenia kontrolera wizyjnego serii CV-X z systemem pomiarowym serii LJ-V, kontroler przejmuje zadania analizy oraz parametryzacji procesu akwizycji. Istotną różnicą, wynikającą z wykorzystania dodatkowego kontrolera, jest możliwość analizy całego pakietu zarejestrowanych profili, zamiast pojedynczego profilu [9]. Na rys. 7 przedstawiono przykładowy wynik pomiaru w postaci grupy zarejestrowanych profili.

W sterowniku wizyjnym został zaimplementowany program umożliwiający analizę danych w postaci pakietu profili pochodzących z systemu pomiarowego serii LJ-V. Program inspekcji umożliwia detekcję wad w postaci rys (pęknięć), deformacji gumowej wargi oraz obecności resztek gumy na powierzchni uszczelniaczy. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarowych kontroler wizyjny dokonuje klasyfikacji badanych wyrobów na dwie kategorie: wyroby dobre „OK” oraz wyroby wadliwe „NG” (not good). Informacja o ocenie jakościowej badanego wyrobu widoczna jest na ekranie monitora oraz dodatkowo sygnalizowana za pomocą wskaźnika w postaci lampki (umieszczonej z prawej strony profilometru).

Podczas prowadzonych badań w celu weryfikacji skuteczności zaproponowanej metody detekcji wad, wykorzystany został testowy program inspekcji. Opracowany algorytm inspekcji składał się z następujących głównych elementów:

- algorytmu pozycjonowania – zmniejszającego wpływ odchyłki pozycji obszarów inspekcji od pozycji referencyjnej,
- algorytmu detekcji deformacji na bocznej powierzchni uszczelniacza,
- algorytmów detekcji rys oraz pęknięć na powierzchni dolnej uszczelniacza.

Przedstawione operacje zostały zrealizowane z wykorzystaniem zaimplementowanych w systemie wizyjnym firmy Keyence funkcji z zakresu przetwarzania i analizy obrazu. Wstępne przetwarzanie obrazu możliwe jest za pomocą algorytmów przypisanych do grupy filtrów m.in.: binaryzacji, dylatacji, erozji. Natomiast analiza obrazu realizowana jest głównie przez zastosowanie narzędzi detekcji krawędzi.

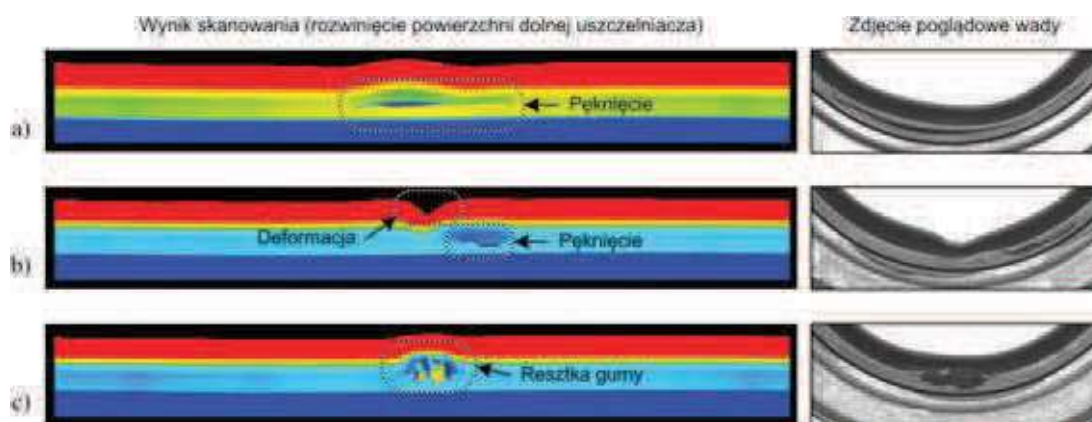
### Wyniki badań eksperymentalnych

Uszczelniacze były kontrolowane podczas wykonania jednego pełnego obrotu (360°). Przeprowadzone badania wykazały znaczny wpływ zanieczyszczeń, znajdujących się na powierzchni uszczelniacza (pyłki, drobne włókna) na wynik inspekcji. W związku z tym, do procedury testów, zdecydowano się wprowadzić wstępny etap oczyszczania uszczelki za pomocą sprężonego powietrza. Poniżej zaprezentowano przykładowe wyniki skanowania powierzchni uszczelniaczy wału z wadami w postaci rysy (pęknięcia), deformacji gumowej wargi oraz resztek gumy na powierzchni dolnej (rys. 8).

Podczas badań na podstawie oceny wizualnej uszczelki podzielono na: dobre, mające deformacje,



Rys. 7. Przykładowy wynik skanowania w postaci rozwinięcia powierzchni dolnej uszczelniacza (bez wady)  
Fig. 7. An example of the scanning result in the form of developed of the bottom seal surface (without defects)



Rys. 8. Prezentacja przykładowych wad występujących na powierzchni dolnej uszczelniaczy: a) wada w postaci rysy (pęknięcia), b) jednoczesna wada w postaci deformacji gumowej wargi oraz rysy (pęknięcia), c) wada w postaci resztek gumy  
Fig. 8. Presentation of the selected defects on the seals bottom surface: a) a defect in the form of scratch (crack), b) simultaneous defect in the form of a rubber lip deformation and scratch (crack), c) defect as a residual rubber

z występującymi rysami oraz z występującymi resztkami gumy. Wyniki przeprowadzonej inspekcji zamieszczono w tab. 2. W grupie uszczeliek ocenionych przez operatora jako „dobre” występują produkty sklasyfikowane przez system automatycznej inspekcji jako wykonane wadliwie. Takie zdarzenie określane jest w systemach maszynowego widzenia jako fałszywy alarm (false positive). Ponadto system podczas inspekcji produktów, do których podczas oceny wizualnej przypisano jeden rodzaj wady (np. w postaci rysy), dodatkowo informował o występowaniu innego rodzaju uszkodzeń, które zostały pominięte przez człowieka lub błędnie zidentyfikowane przez program inspekcji. W wyniku czego występuje różnica w łącznej liczbie uszczelniaczy w klasyfikacji wad przez człowieka i system inspekcji. W przeprowadzonych testach proponowany system uzyskał 100% detekcję uszczelniaczy sklasyfikowanych przez człowieka jako wadliwe.

Tabela 2. Porównanie oceny operatora z wynikami systemu inspekcji dla 1000 sztuk uszczelniaczy

Table 2. Comparison of the assessment of the operator with the results of the inspection system for 1000 seals

Grupa uszczeliek	Ocena wizualna człowieka [szt.]	Wynik inspekcji systemu [szt.]
Dobre	937	905
Deformacje	18	42
Rysy	17	64
Resztki gumy	28	28

### Podsumowanie

Zaproponowana metoda kontroli jakości powierzchni uszczelniaczy wału w postaci połączenia systemu pomiarowego serii LJ-V ze sterownikiem wizyjnym serii CV-X, umożliwia wykrywanie wad w postaci rys (pęknięć), deformacji gumowej wargi oraz obecności resztek gumy na powierzchni. Przeprowadzone prace badawcze w warunkach laboratoryjnych wykazały wysoką skuteczność opracowanego rozwiązania.

Istotnym czynnikiem w przypadku opracowania systemu pracującego on-line na liniach produkcyjnych jest wymagany czas inspekcji. W prezentowanym rozwiązaniu czas obrotu uszczelniaczy na stoliku obrotowym wynosił średnio 9 s. Wynika to przede wszystkim z ograniczeń zastosowanego napędu w postaci silnika krokowego i przekładni. W planowanych dalszych pracach nad rozwiązaniem docelowym zostaną podjęte działania, mające na celu znaczne skrócenie czasu obrotu.

Podczas badań autorzy stwierdzili wrażliwość systemu pomiarowego na występujące zakłócenia w postaci widocznych na powierzchni uszczelniacza zanieczyszczeń, głównie w postaci pyłków, włókien. Zanieczyszczenia te mogą powodować zakwalifikowanie poprawnie wykonanej uszczelki jako wyrób wadliwy. Należy stwierdzić czy zanieczyszczenia te mogą wystąpić już na etapie produkcji, czy są efektem późniejszego przechowywania, magazynowania. Jeśli zanieczyszczenia mogą wystąpić

w miejscu inspekcji, należy rozważyć proces czyszczenia powierzchni uszczelki za pomocą sprężonego powietrza. Operacja ta może być realizowana podczas wykonywania obrotu wyrobu za pomocą dysz ustawionych przed głowicą pomiarową.

W docelowym rozwiązaniu oprócz czasu wymaganego na obrót uszczeliek względem głowicy pomiarowej i czasu analizy należy doliczyć operacje związane z uchwytniem badanego wyrobu do obrotu, następnie odłożenie i separację na wyroby wykonane poprawnie i wadliwie.

Dalsze prace nad systemem powinny być prowadzone w celu optymalizacji algorytmu inspekcji, która zapewni wysoką niezawodność detekcji wad, przy jednoczesnym zmniejszeniu poziomu fałszywych alarmów.

### LITERATURA

- [1] Biblioteka do przetwarzania i analizy chmury punktów pomiarowych PCL, <http://pointclouds.org>.
- [2] Bradshaw G. 1999. „Non – contact surface geometry measurement techniques”. Dublin: Image Synthesis Group, Trinity College.
- [3] Carrara M. 1992. „Seal withdrawal and testing device”. Patent US 5167141 A.
- [4] Czajka P. i in.. 2014. „Profilometr laserowy do odtwarzania geometrii powierzchni”. *Przegląd Elektrotechniczny* (8): 152–156.
- [5] Garbacz P., T. Giesko. 2011. „Integrated vision systems versus custom solutions for quality inspection in industry.” Wrocław: Materiały konferencyjne *Inżynieria Produkcji*, s. 213–217.
- [6] Karta katalogowa produktu: Profilometr laserowy 3D-R, ITeE-PIB, Radom, <http://www.itee.radom.pl>.
- [7] Kowal J., A. Sioma. 2012. „Surface defects detection using a 3D vision system”. 13 International Carpathian Control Conference (ICCC), 382–387.
- [8] Laser World of Photonics: White Paper Image Processing in the Automotive Industry, <http://www.world-of-photonics.com>.
- [9] LJ-V/CV-X200 Series Inline 3D Inspection Image Processing System, Keyence Corporation, 2014.
- [10] Materiały informacyjne firmy SKF: Zasady doboru i stosowania uszczelnień, <http://www.skf.com/pl>.
- [11] Sioma A., G. Struzikiewicz. 2010. „Bezdotkowy pomiar przedmiotu obrabianego”. *Świat obrabiarek* (10–12): 20–24.
- [12] Tornslev K. 2005. „3D scanning using multibeam laser”. Lyngby: Technical University of Denmark.
- [13] Ultra-High Speed In-line Profilometer, LJ-V7000 Series, User’s Manual, Keyence Corporation, 2014.
- [14] Wójcicki T., P. Czajka, T. Giesko. 2010. „Automatyczna inspekcja montażu uszczeliek łożysk tocznych z wykorzystaniem komputerowych metod przetwarzania i analizy obrazów”. *Technologia i Automatyka Montażu* (3): 26–31.

Mgr inż. Piotr Czajka – Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, e-mail: [piotr.czajka@itee.radom.pl](mailto:piotr.czajka@itee.radom.pl)

Mgr inż. Piotr Garbacz – Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, e-mail: [piotr.garbacz@itee.radom.pl](mailto:piotr.garbacz@itee.radom.pl)