

Stanowisko do pomiaru objętości półfabrykatu za pomocą czujnika laserowego

Stand for measuring the volume of the blank using a laser sensor

MARCIN PELIC
TOMASZ BARTKOWIAK
STANISŁAW PABISZCZAK
ŁUKASZ MACYSZYN
ROMAN STANIEK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.11.179>

Przedstawiono stanowisko i metodę pomiaru objętości półfabrykatu za pomocą czujnika laserowego. W analizowanym fragmencie procesu wytwarzania armatury wodnej półfabrykat w postaci mosiężnego pręta jest cięty na pile poprzecznej na wstępniaki o określonej masie. Ze względu na stosowaną bezwypływkową technologię kucia wymagana jest duża dokładność ucinanych wstępniaków, rozumiana jako względna tolerancja masy poniżej 0,1%. W takiej sytuacji istotny jest pomiar geometrii pręta, umożliwiający obliczenie jego objętości i ustawienie na tej podstawie miejsca cięcia. Naturalnym sposobem obliczania objętości brył obrotowych o skomplikowanych kształtach jest wyznaczenie w zadanych granicach wartości całki oznaczonej krzywej, opisującej zewnętrzną powierzchnię bryły obracającej się dookoła pewnej osi. Jednakże w przypadku brył obarczonych błędem geometrii ściany bocznej, który może się zmieniać w zależności od wysokości, ta funkcja może się zmieniać wraz z kątem obrotu tej bryły. W przypadku układów rzeczywistych, gdy wyniki pomiarów stanowią dyskretny ciąg liczb, naturalnym sposobem jest całkowanie numeryczne. Gdy poprawnie dobierze się dokładność pomiarową czujnika oraz podzieli całą bryłę na odpowiednio małe fragmenty, błąd wynikający z numerycznego rozwiązania zagadnienia jest pomijalny, a proces obliczeniowy – szybki, co pozwala na zastosowanie komputera przemysłowego klasy ekonomicznej. W artykule przedstawiono zastosowanie czujnika laserowego – przesuwanego wokół osi oraz wzdłuż pręta i służącego do pomiaru jego objętości – a także koncepcję kompletnego stanowiska pomiarowego.

SŁOWA KLUCZOWE: pomiar objętości, czujnik laserowy

The aim of the article is to present a method of measuring the volume of a blank using a laser sensor and a complete measuring stand. In the analyzed part of the manufacturing process of water fittings, the brass rod is cut on blanks of a given weight using CNC sawing machine. Due to the applied flashless forging technology, high cutting precision is required, understood as a relative mass tolerance of the blank of less than 0.1%. In this case, it becomes important to measure the geometry of the rod to calculate its volume – to correct the length of the blank. The natural way to calculate the volume of rotational solids with complex shapes is to determine the definite integral of the curve describing the outer surface of the solid. However, in the case of solids with geometrical errors this function may vary with the angle of rotation of the solid.

* Dr inż. Marcin Pelic (marcin.pelic@put.poznan.pl), dr inż. Tomasz Bartkowiak (tomasz.bartkowiak@put.poznan.pl), mgr inż. Stanisław Pabiszczak (stanislaw.pabiszczak@put.poznan.pl), mgr inż. Łukasz Macyszyn (lukasz.macyszyn@put.poznan.pl), prof. dr hab. inż. Roman Staniek (roman.staniek@put.poznan.pl) – Instytut Technologii Mechanicznej, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej

In the case of real systems, in which the measurement results are a discrete sequence of numbers, it is natural to choose numerical integration. The paper presents the use of a laser sensor moved around the axis and along the rod to measure its volume and the concept of a complete measuring stand.

KEYWORDS: volume measurement, laser sensor

Postęp w technikach skanowania z wykorzystaniem przetworników laserowych przyczynił się do rozwoju systemów skanujących, wytwarzanych na potrzeby przemysłu maszynowego, fizyki ciała stałego [1] czy medycyny [2–4]. Przedmiotem rozważań w tym artykule jest pomiar objętości pręta osiowosymetrycznego, wykonanego ze stopu miedzi. Pręt ten stanowi materiał wsadowy do procesu kucia bezwypływkowego komponentów armatury wodnej, przeznaczonej do kontaktu z wodą pitną. Typowe dla tego procesu wytwarzania jest cięcie pręta na wstępniaki, których tolerancja objętości – i tym samym masy – pozwala na ich zastosowanie w dalszym kuciu bezwypływkowym.

Metody pomiaru objętości przedmiotów osiowosymetrycznych bazują przede wszystkim na pomiarze ich średnicy wzdłuż głównej osi. W odróżnieniu od metod dotykowych, np. wykorzystujących czujniki pojemnościowe czy wiroprądowe odległości, metody bezdotykowe zapewniają dużą elastyczność, ponieważ pomiar nie ogranicza się do obiektów przewodzących prąd elektryczny [5]. Możliwość pomiaru optycznego elementów skomplikowanych geometrycznie pozwala na wykorzystanie tych metod do kontroli jakości zgodnie ze standardami ISO [6]. Przekrój metod wizyjnych i za pomocą czujników laserowych przedstawiono w pracy [7].

Znane są także metody oparte na pomiarze cieni rzucanych przez obiekt oświetlony za pomocą rozbieżnego strumienia światelnego. Zaletą tych metod jest brak elementów optycznych, takich jak soczewka czy lustro [8].

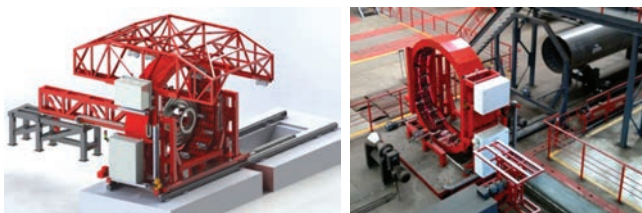
W technice komercyjnej znane są różnego rodzaju maszyny i urządzenia pomiarowe służące do pomiarów przedmiotów osiowosymetrycznych, zwłaszcza o przekroju okrągłym. Wśród rozwiązań dostępnych na rynku można znaleźć urządzenia stykowe, jak również bezkontaktowe, bazujące przede wszystkim na czujnikach laserowych i optycznych.

Do najbardziej kompaktowych bezstykowych urządzeń pomiarowych zalicza się mikrometry laserowe (rys. 1). Umożliwiają one zmierzenie wymiarów oraz błędów kształtu i położenia w warunkach laboratoryjnych, a dzięki zastosowaniu modułów skanujących – również w warunkach produkcyjnych. Mikrometry laserowe można wypożyczyć w różnego rodzaju podajniki i podtrzymki, ułatwiające wykonywanie pomiarów.



Rys. 1. Laserowy mikrometr skanujący firmy Mitutoyo [9]

Wśród rozwiązań przeznaczonych do bezpośredniego zastosowania w warunkach produkcyjnych można wyróżnić system Ultrametrix firmy Ultrakraft (rys. 2). Jest to urządzenie do bezstykowych pomiarów m.in. średnicy zewnętrznej i błędów kształtu (okrągłości, walcowości) rur o średnicy nawet do 1400 mm. Głównym elementem systemu jest nieruchoma głowica pomiarowa wyposażona w laserowe czujniki skanujące, rozmieszczone równomiernie względem osi mierzonego elementu w kierunku promieniowym. Ruch wzdłużny przedmiotu jest realizowany za pomocą napędzanych podtrzymek. W zależności od konfiguracji istnieje także możliwość pomiaru długości rury oraz średnicy wewnętrznej – dzięki zastosowaniu przesuwnej głowicy pomiarowej.



Rys. 2. System Ultrametrix do pomiarów rur [10]

Do pomiarów przedmiotów osiowoosymetrycznych stosuje się także urządzenia z systemami wizyjnymi. Jednym z nich jest skaner elementów obrotowych OpticLine (rys. 3), przeznaczony do pomiaru długości, średnic, kątów i promieni, a także odchyłek okrągłości, walcowości, bicia, prostoliniowości i równoległości. Kamery i źródła światła obracają się wokół osi obrotu mierzonego elementu. Zakres pomiarowy średnic (w zależności od modelu) wynosi 0,2÷140 mm, zakres pomiarowy długości – 300 mm, a maksymalna masa mierzonego przedmiotu – 20 kg. Wadą tego typu urządzeń jest brak możliwości bezpośredniego zastosowania w ciągu linii produkcyjnych.



Rys. 3. Skaner optyczny OpticLine firmy Jenoptik [11]

Główną ideą przedstawionej metody pomiaru objętości pręta (rys. 4) jest wyznaczenie wartości całki oznaczonej, opisującej tworzącą pręta. Sposób ten bazuje na założeniu, że struktura materiału pręta jest homogeniczna oraz że znana jest jego gęstość, natomiast sama geometria pręta obarczona jest błędami wykonawczymi. W założeniu pręt obraca się oraz przesuwa względem czujnika, który tworzy jego profil przestrzenny. Dane z przetwornika

odległości, enkodera monitorującego względny kąt obrotu oraz przetwornika badającego przesuw pręta są dostarczane do sterownika przemysłowego, kontrolującego cały proces. Urządzenie oblicza numerycznie wartość objętości pręta według zależności:

$$V = l \sum_{1}^m \sum_{1}^n \frac{\pi}{n} r_{m,n}^2 \quad (1)$$

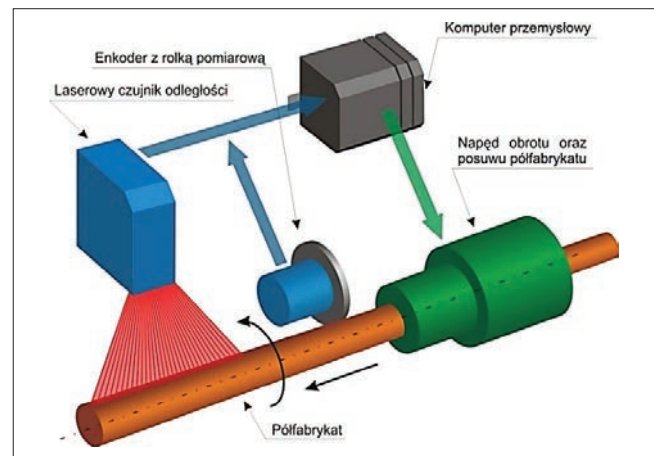
gdzie: l – zmierzona długość pręta; $r_{m,n}$ – promień zmierzony w danym punkcie pomiarowym; m, n – indeksy kolejnych punktów pomiarowych.

W celu uniezależnienia wyników od systematycznych błędów pomiarowych, wynikających z dokładności ustawienia promieniowego przetwornika pomiarowego względem pręta, początkowo pręt jest skanowany, a następnie ważony.

Zależność (1) uzupełniono o współczynnik korekcyjny a :

$$V = l \sum_{1}^m \sum_{1}^n \frac{\pi}{n} (a + r_{m,n})^2 = \frac{m}{\rho} \quad (2)$$

W tej zależności do promienia zmierzonego przez urządzenie jest dodawana stała wartość a , obliczana numerycznie na podstawie zależności objętości, masy i gęstości. W przedstawionym przypadku możliwe jest zastosowanie metody kolejnych przybliżeń, Newtona itp.

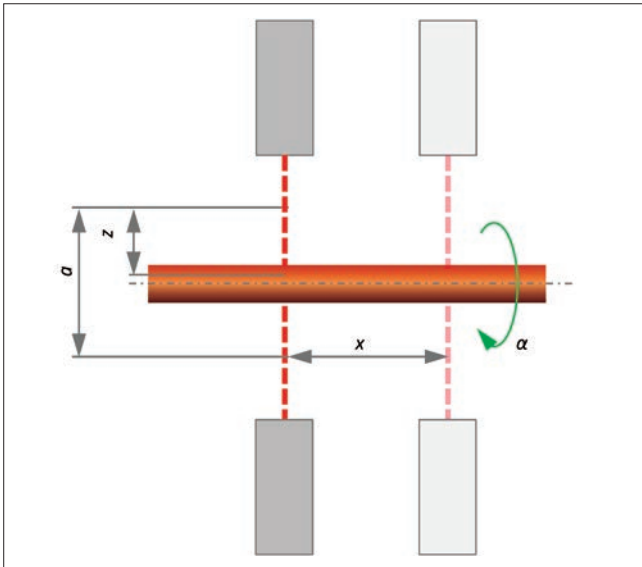


Rys. 4. Koncepcja pomiaru objętości pręta

Metoda pomiaru

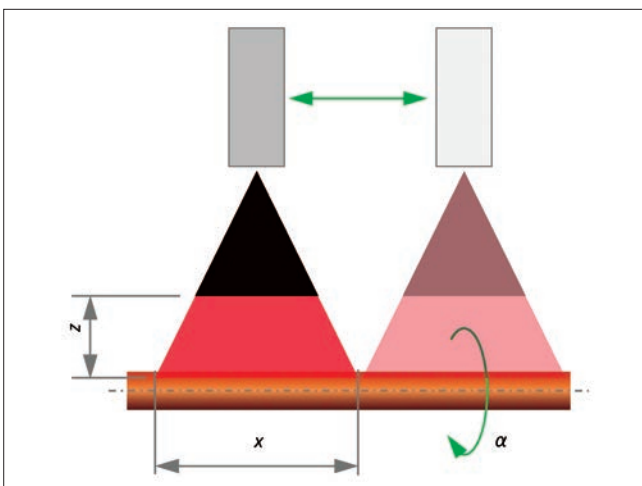
Dalej przedstawiono cztery różne metody pomiaru, które wykorzystano na stanowisku pomiarowym.

■ **Pomiar za pomocą laserowego, punktowego przetwornika odległości.** Laserowy, punktowy przetwornik odległości jest urządzeniem pomiarowym, w którym wiązka światła, emitowana przez źródło, odbija się od mierzonego elementu i wraca do detektora ustawionego pod pewnym kątem. Przesunięcie nadajnika i odbiornika o znany kąt pozwala wytyczyć – na drodze triangulacji – odległość między nadajnikiem a mierzonym elementem. Takie przetworniki są precyzyjne i powtarzalne. Do ich wad zalicza się natomiast wysoką cenę oraz punktowy charakter pomiaru, który po części jest rekompensowany niejednokrotnie wysokimi częstotliwościami pracy. Przykład zastosowania laserowych przetworników punktowych do określania objętości pręta pokazano na rys. 5.



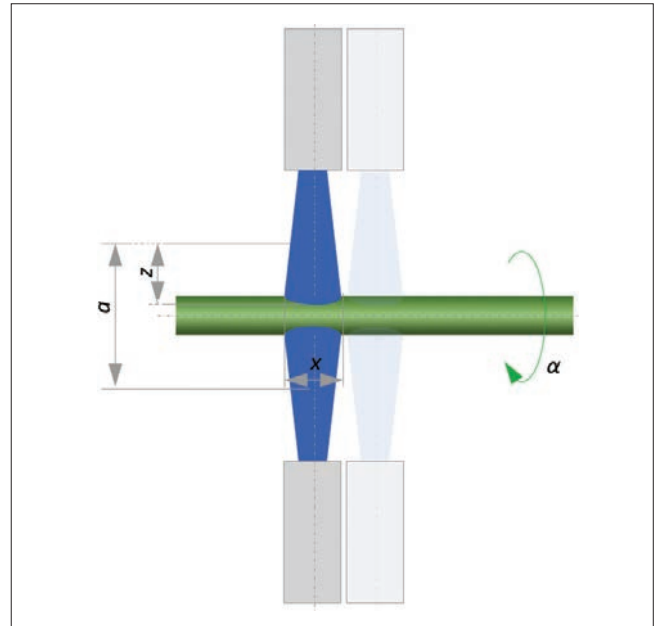
Rys. 5. Pomiar profilu pręta z użyciem punktowych, laserowych przetworników odległości, gdzie: a – znana odległość przedmiotu od czoła przetwornika, z – zasięg, x – przesunięcie liniowe czujników, α – przesunięcie kątowe czujników

■ **Pomiar za pomocą laserowego, skanującego przetwornika odległości.** Laserowy, skanujący przetwornik odległości działa na podobnej zasadzie co przetwornik punktowy, jednak w zależności od budowy używany jest laser liniowy (plamka w formie linii prostej) lub zmieniany jest kierunek wiązki światła. Dostępne są przyrządy w wersjach 2D (skanowana jest odległość profilu wzdłuż linii pomiarowej) i 3D (skanowana jest odległość poszczególnych punktów siatki pomiarowej na badanej powierzchni). Do najważniejszych atutów tych urządzeń można zaliczyć prędkość działania, a do wad – niezbyt wysoką pewność pomiaru i duży koszt. Przykład zastosowania skanującego, laserowego przetwornika odległości do określania objętości pręta przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Pomiar profilu pręta z użyciem skanującego, laserowego przetwornika odległości, gdzie: z – zasięg, x – przesunięcie liniowe czujników, α – przesunięcie kątowe czujników

■ **Pomiar za pomocą indukcyjnego, wiroprowodowego przetwornika odległości.** Indukcyjne przetworniki odległości działają na zasadzie zmiany indukcji wzajemnej zespołu cewek, przez wprowadzanie w ich sąsiedztwo obiektów, w których wzbudzany jest przepływ prądów wirowych. Niebagatelnymi zaletami tych przetworników są bardzo niska cena oraz uśrednianie wyników z badanego pola, natomiast do wad należy zaliczyć niską pewność

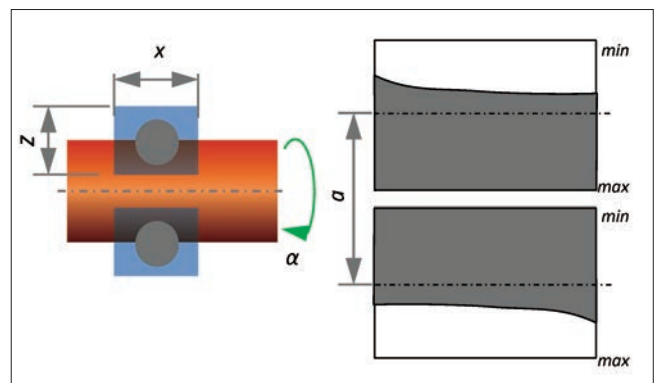


Rys. 7. Pomiar profilu pręta z użyciem wiroprowodowych przetworników odległości, gdzie: a – znana odległość przedmiotu od czoła przetwornika, z – zasięg, x – przesunięcie liniowe czujników, α – przesunięcie kątowe czujników

pomiarową. Przykład zastosowania przetworników wiroprowodowych do określania objętości pręta przedstawiono na rys. 7.

■ **Pomiar za pomocą systemu wizyjnego.** Systemy wizyjne na stałe zagościły w różnych gałęziach przemysłu. Urządzenia te cechują się dużą elastycznością i szerokim zakresem zastosowania, przy czym ich możliwości w dużej mierze wynikają z kreatywności programistów. Jako takie nie mają jednego przeznaczenia, dlatego trudno jest precyzyjnie określić parametry systemu wizyjnego przed jego zbudowaniem. Proponowany system wizyjny ma rejestrować tworzącą pręta tak, aby styczna do okręgu była w osi optycznej kamery. Zastosowany przetwornik musi się cechować rozmiarem piksela na poziomie $2 \mu\text{m}$, podobnie jak rozdzielczość optyczna użytych obiektywów. Przykład zastosowania przetworników wizyjnych do określania objętości pręta zaprezentowano na rys. 8.

W przedstawionych przykładach zastosowano przede wszystkim przetworniki podwójne – monitorujące odległość w punktach leżących naprzeciwko siebie. Takie ułożenie przetworników pozwala na pomiar różnicowy, który minimalizuje błędy systematyczne oraz ogranicza wpływ krzywizny badanego pręta na wyniki analizy.



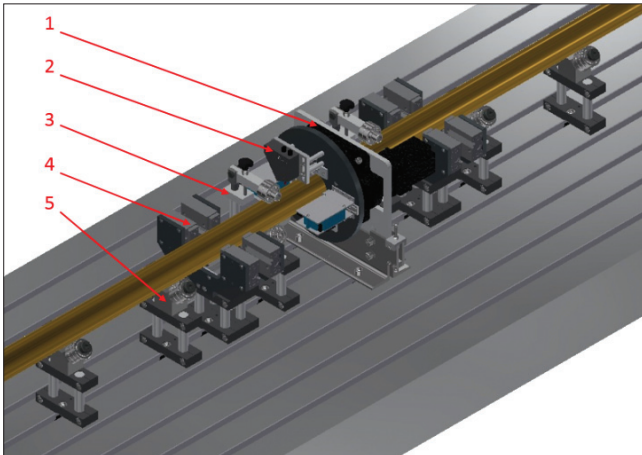
Rys. 8. Pomiar profilu pręta z użyciem systemu wizyjnego, gdzie: a – znana odległość przedmiotu od czoła przetwornika, z – zasięg, x – przesunięcie liniowe czujników, α – przesunięcie kątowe czujników

Stanowisko pomiarowe

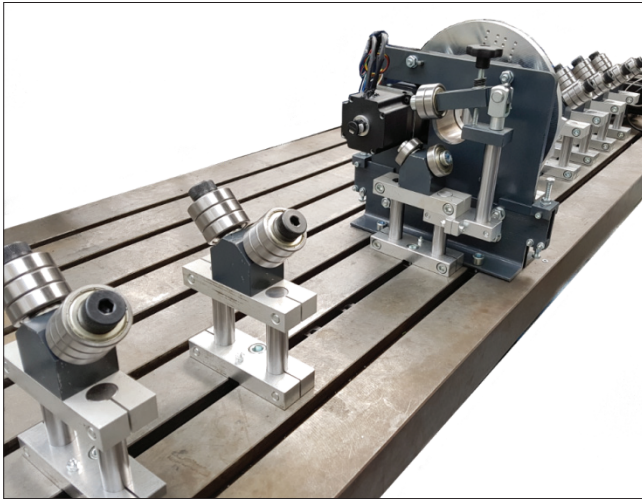
Ze względu na wysoki koszt omówionych wcześniej urządzeń, a także z uwagi na niezwykle trudne czy wręcz niemożliwe zastosowanie ich w przypadku precyzyjnego cięcia wstępniaków opracowano konstrukcję specjalnego urządzenia pomiarowego (rys. 9 i 10).

Głównymi elementami stanowiska do pomiaru prętów są moduł napędowy, moduł pomiarowy oraz komponenty odpowiedzialne za podtrzymywanie i odbieranie pręta.

Na potrzeby badań urządzenie zostało zamontowane na stalowym stole z rowkami teowymi, co zapewnia precyzyjne ustawienie poszczególnych elementów stanowiska względem płaszczyzny przechodzącej przez oś mierzonych pręta, prostopadłej do podstawy.

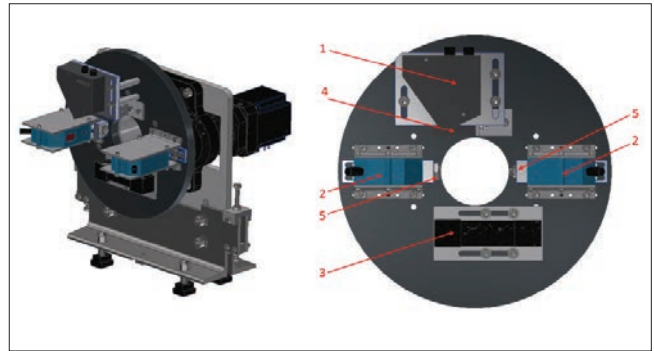


Rys. 9. Model CAD stanowiska do pomiaru prętów na potrzeby bezwypływowego kucia elementów armatury wody pitnej: 1 – moduł napędowy z przekładnią indeksującą, 2 – moduł pomiarowy, 3 – żarzutka, 4 – podajnik pręta, 5 – podtrzyma

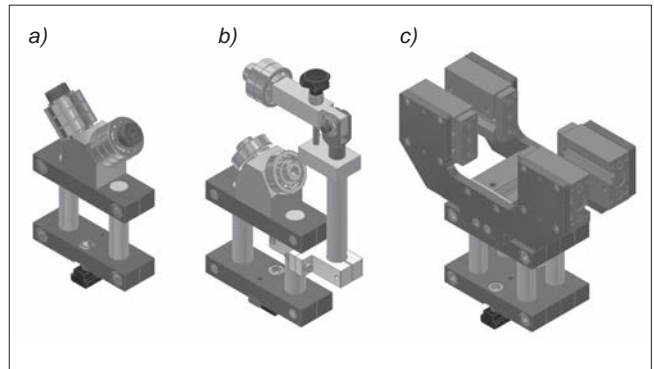


Rys. 10. Stanowisko do pomiaru prętów na potrzeby bezwypływowego kucia elementów armatury wody pitnej

Moduł napędowy (rys. 11) składa się ze stalowej płyty umieszczonej w uchwytach, do której jest przymocowana przekładnia indeksująca o przełożeniu redukującym 1:10. Napęd zapewnia silnik krokowy z enkoderem, dzięki czemu możliwy jest pośredni pomiar położenia kąowego modułu pomiarowego. Stanowisko zostało przystosowane do mierzenia prętów o maksymalnej średnicy 70 mm, a jego konstrukcja pozwala na bezstopniową regulację położenia modułu pomiarowego względem podstawy – konieczną z uwagi na zmienny zakres mierzonych średnic.



Rys. 11. Moduł napędowy z przekładnią indeksującą oraz moduł pomiarowy: 1 – laserowy, skanujący przetwornik odległości; 2 – laserowy, punktowy przetwornik odległości; 3 – przetwornik wizyjny; 4 – zwierciadło; 5 – wirprawodowy przetwornik odległości



Rys. 12. Komponenty podtrzymujące i podające: a) podtrzyma z regulowaną wysokością, b) podtrzyma z regulowaną wysokością i żarzutką dociskową, c) podajnik pneumatyczny pręta

Do przekładni indeksującej jest przymocowany moduł pomiarowy (rys. 11), składający się z tarczy, do której za pośrednictwem specjalnych przesuwanych uchwytów zamocowano zestaw przetworników pomiarowych. Pierwszym z nich jest laserowy, skanujący przetwornik odległości 1 o rozdzielczości 3 μm i zakresie pomiarowym 5,9 mm. W płaszczyźnie prostopadłej do osi skanera zamocowano laserowe, punktowe przetworniki odległości 2 o zakresie pomiarowym 12,7 mm i rozdzielczości 0,64 μm . Pod nimi znajduje się indukcyjny czujnik wirprawodowy 5. Zespół pomiarowy uzupełniają: kamera 3 (wyposażona w obiektyw kątowy) oraz zwierciadło 4.

Niezwykle istotne z punktu widzenia dokładności pomiarów jest ograniczenie wpływu ugięcia pręta na uzyskiwane wyniki. Z tego względu stanowisko pomiarowe zostało wyposażone w kilka podtrzymek (rys. 12a), umożliwiających precyzyjne podparcie pręta dzięki regulacji ich wysokości. Ponadto dwie podtrzymki, znajdujące się najbliżej modułu pomiarowego, zostały wyposażone w żarzutki (rys. 12b), których zadaniem jest zapewnienie właściwego prowadzenia pręta w strefie pomiaru. Aby pomiary mogły być wykonywane w cyklu automatycznym, zaprojektowano specjalne podajniki pneumatyczne, których konstrukcja bazuje na kompaktowych siłownikach z przewodnikami o skoku 50 mm. Podajniki rozmieszczono z obu stron strefy pomiarowej, aby zapewnić ciągłość pracy stanowiska. Podczas pracy jeden z podajników przemieszcza pręt, natomiast drugi pełni rolę zacisku, ograniczającego ryzyko wystąpienia błędów związanych z pozycjonowaniem osiowym mierzonych prętów.

Układ sterowania urządzenia został zaprojektowany na bazie sterownika przemysłowego, który jednocześnie odpowiada za akwizycję danych oraz realizuje zadania związane ze względnym przemieszczeniem przetworników

i mierzonego obiektu. Biorąc pod uwagę potrzebną moc obliczeniową, konieczne jest użycie sterownika przemysłowego z procesorem klasy Intel i7 lub wyższej. Wymagana duża moc obliczeniowa wynika z oprogramowania układu wizyjnego. Urządzenie zostało wyposażone w moduły wejść cyfrowych i analogowych, moduły wyjść cyfrowych oraz interfejsy komunikacyjne. Wejścia analogowe posłużą do odczytu sygnałów z czujników z takimi wyjściami, interfejsy komunikacyjne – do wymiany informacji ze sterownikiem silnika oraz skanującego, laserowego przetwornika odległości, natomiast wyjścia cyfrowe – do wyświetlania stanu urządzenia oraz sterowania zaworami pneumatycznymi siłowników napędu liniowego. Do połączenia przetwornika wizyjnego zostanie wykorzystany port USB, zamontowany bezpośrednio w CPU.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono podsumowanie znanych obecnie metod pomiaru objętości elementów osiowosymetrycznych. Przedmiotem prac badawczych był sposób pomiaru objętości pręta wykonanego z mosiądzu, który stanowi materiał wsadowy do procesu precyzyjnego kucia matrycowego. Objętość pręta jest istotna ze względu na wyznaczenie linii cięcia na wstępniaki, których tolerancja objętości (i masy) musi zagwarantować bezwypływkowe kucie.

W artykule przeanalizowano cztery różne sposoby pomiaru z wykorzystaniem: laserowych przetworników odległości, wiroprowadowego przetwornika odległości oraz systemu wizyjnego. Zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze, które pozwoli na ustalenie, który z tych przetworników zapewni pomiar z wymaganą dokładnością.

Badania zostały sfinansowane ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój i w ramach projektu pt. „Bezodpadowa technologia kształtowania elementów armatury wody pitnej z bezołowiowych stopów miedzi”.

LITERATURA

1. Kuramoto N., Fujii K., Yamazawa K. "Volume measurements of 28Si spheres using an interferometer with a flat etalon to determine the Avogadro constant". *Metrologia*. 48, 2, s. 83–95.
2. Bhat S.S., Smith J. "Laser and sound scanner for non-contact 3D volume measurement and surface texture analysis". *Physiological Measurement*. 15, 1, s. 79.
3. Marjanovic D., Dugdale R.E., Vowden P., Vowden K.R. "Measurement of the volume of a leg ulcer using a laser scanner". *Physiological Measurement*. 19, 4, s. 535–543.
4. Gardner W.B., Cameron R.G., Vowden P., Lane C., Grocott P. "A technique for the use of 3D surface imaging to study wound dressing fixation". *Wounds*. 17, 12, s. 337–346.
5. Jabłoński R., Mąkowski J. "Measurement of cylinder diameter by laser scanning". *Recent Advances in Mechatronics* (red.: R. Jabłoński, M. Turkowski, R. Szewczyk). Berlin, Heidelberg: Springer.
6. EN ISO 14253-1:1998 Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1. Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications.
7. Chen Y., Liu C. "Radius and orientation measurement for cylindrical objects by a light section sensor". *Sensors*. 16, 11, s. E1981.
8. Fedorov E., Koba A. "Diameter Calculation in Contactless Three-Axis Measuring Devices". *MATEC Web Conf.* 79 01082.
9. <https://bhkarcz.pl/mitutoyo> (dostęp: 07.05.2018 r.).
10. www.ultrakraft.ru (dostęp: 07.05.2018 r.).
11. www.ita-polska.com.pl (dostęp: 07.05.2018 r.).