

Stanisław ADAMCZAK, Dariusz JANECKI, Krzysztof STĘPIEŃ

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, WYDZIAŁ MECHATRONIKI I BUDOWY MASZYN, KATEDRA TECHNOLOGII MECHANICZNEJ I METROLOGII

Statystyczne badania dokładności pomiaru zarysów walcowości metodą odniesieniową

Prof. dr hab. inż. Stanisław ADAMCZAK, dr h.c.

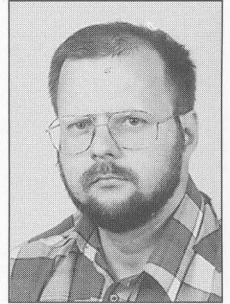
jest Dziekanem Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej oraz kierownikiem Katedry Technologii Mechanicznej i Metrologii na tym wydziale. Jego zainteresowania naukowe obejmują podstawy metrologii i metrologię wielkości geometrycznych. Jest członkiem wielu organizacji i stowarzyszeń naukowych, m.in. Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN oraz prezesem Sekcji Metrologii SIMP. Wchodzi w skład rad naukowych zagranicznych uczelni technicznych i jednostek badawczo-rozwojowych w kraju. Od 1997 roku jest profesorem wizytującym w Technische Universität w Wiedniu. W swoim dorobku ma 183 publikacje i 120 referatów. Jest też autorem lub współautorem patentów. Opracowane przez jego zespół systemy pomiarowe zostały wdrożone w wielu zakładach przemysłowych zarówno w kraju, jak i za granicą.

adamczak@tu.kielce.pl



Dr hab. inż. Dariusz JANECKI

Studia wyższe na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej ukończył w 1981, a w 1996 obronił tam pracę doktorską. W 1996 obronił pracę habilitacyjną w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN. Obecnie pracuje na stanowisku profesora w Politechnice Świętokrzyskiej i jest kierownikiem Zakładu Automatyki i Informatyki. Zainteresowania naukowe obejmują teorię sterowania ze szczególnym uwzględnieniem metod identyfikacji i sterowania adaptacyjnego, matematyczne podstawy metrologii powierzchni oraz problemy związane z modernizacją przyrządów pomiarowych.



djanekki@tu.kielce.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję wykorzystania metod odniesieniowych do pomiaru zarysów walcowości, opracowaną w Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach. Zaproponowana koncepcja była podstawą zbudowania modelowego stanowiska badawczego do odniesieniowych pomiarów zarysów walcowości. Artykuł przedstawia koncepcję pomiaru walcowości metodą odniesieniową oraz przebieg eksperymentalnej weryfikacji opracowanej metody. Wyniki stały się podstawą obliczeń statystycznych, a uzyskane wartości parametrów wykorzystano do obliczenia wartości błędu pomiaru za pomocą nowej metody.

Abstract

Products with cylindrical surfaces are found in various branches of industry, for instance, in the paper, chemical, steel, heating, and shipping industries. To assure high quality of cylindrical products, it is required that regular assessments of cylindrical profiles be conducted both during the manufacturing process as well as the product operation. Cylindricity measurements under industrial conditions are not easy though. The researchers from the Kielce University of Technology have come up with a new approach to measurements of cylindricity (shown in Fig. 1) and developed a concept of so-called reference cylindricity measurement. The concept was used to construct a model of a measuring stand for reference cylindricity measurements (see Fig. 2). In order to verify developed method the results obtained by the reference method were compared to the results obtained by a radial method. The results of the experiment were verified statistically, and obtained values of parameters were used to establishing the value of the error of proposed method (see Table 1).

Słowa kluczowe: walcowość, pomiar, metoda odniesieniowa.

Key words: cylindricity, measurement, a reference method

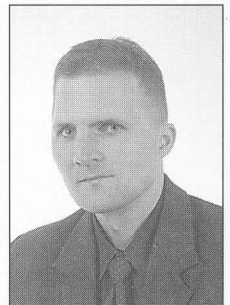
1. Wprowadzenie

W wielu gałęziach przemysłu (np. w przemyśle hutniczym, okrętowym, papierniczym, chemicznym czy energetycznym) produkowane są przedmioty o powierzchniach walcowych. Wymogiem współczesnych procesów technologicznych jest stała ocena zarysu walcowości takich części maszyn w warunkach produkcyjnych (nawet bezpośrednio na obrabiarce). Pomiaru takie mają szczególną wagę ze względu na duży wpływ kształtu powierzchni walcowych na stan dynamiczny współpracujących ze sobą zespołów gotowych wyrobów. Dlatego też minimalizacja błędów kształtu powierzchni walcowych jest zagadnieniem szczególnej wagi. W dotychczasowej praktyce dokładność powierzchni walcowych oceniano zazwyczaj na podstawie odchyłek zarysów okrągłości w kilku wybranych przekrojach poprzecznych badanego przedmiotu. Dawało to jednak bardzo ograniczoną informację o zarysie walcowości mierzonego elementu. Ponieważ na współpracę elementów wpływa w praktyce cała ich powierzchnia, współczesne procesy technologiczne coraz częściej wymagają stałej kontroli zarysów walcowych, ocenianych za

Mgr inż. Krzysztof STĘPIEŃ

jest asystentem w Katedrze Technologii Mechanicznej i Metrologii Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami podstaw metrologii i pomiarów wielkości geometrycznych, a w szczególności pomiarami zarysów okrągłości i walcowości.

kstepien@tu.kielce.pl

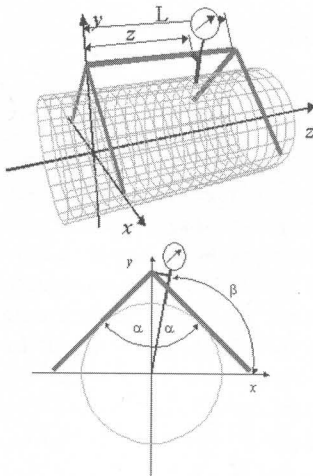


pomocą takich parametrów, które odnoszą się do całej powierzchni. Taka kontrola może być przeprowadzana jedynie za pomocą specjalistycznych systemów do pomiaru walcowości, wyposażonych w odpowiednie oprogramowanie [1].

2. Zasada pomiaru walcowości metodą odniesieniową

Metodami, które mogą umożliwić dokładny pomiar walcowości w warunkach przemysłowych są tzw. metody odniesieniowe. Polegają one na stosowaniu baz pomiarowych dwu lub wielopunktowych. W metodach tych stopień wykrywalności określonego rodzaju dominującego błędu okrągłości (dominujący rodzaj błędu nazywa się dominującą składową harmoniczną w rozwinięciu funkcji zarysu w szereg Fouriera) lub poszczególnej harmonicznej zarysu nieregularnego, zależy od liczby punktów podparcia, ich rozmieszczenia i kąta położenia czujnika pomiarowego względem tych punktów. Metody te wymagają stosowania dla poszczególnych harmonicznym odpowiednich przeliczeniowych współczynników, zwanych współczynnikami wykrywalności, a uzyskiwany zarys okrągłości różni się w sposób zdecydowany od zarysu rzeczywistego [2, 3]. Dlatego metody odniesieniowe były do niedawna wykorzystywane do pomiarów odchyłek okrągłości w ograniczonym zakresie. Wykonane dotychczas prace badawcze, m.in. w ramach projektu KBN nr 7T07D04008 [4], wykazały, że metody odniesieniowe mogą być wykorzystywane do dokładnych pomiarów okrągłości, jeśli dokona się matematycznej transformacji zarysu zmierzonego metodą odniesieniową na zarys rzeczywisty. Pozytywny wynik tych prac został potwierdzony zastosowaniem zbudowanych odniesieniowych przyrządów pomiarowych w warunkach produkcyjnych, na stanowiskach kontrolnych, a nawet bezpośrednio na obrabiarce. W związku z tym w Politechnice Świętokrzyskiej opracowana została koncepcja przystosowania metod odniesieniowych do dokładnych pomiarów zarysów walcowości. Dotychczas stosowane odniesieniowe systemy pomiarowe umożliwiają pomiar zarysów okrągłości względem stałych punk-

tów podparcia w różnych przekrojach poprzecznych mierzonego przedmiotu. Dodatkowo istnieje możliwość oceny względnej różnicy średnic. Natomiast w tradycyjnych odniesieniowych układach pomiarowych nie ma możliwości pomiaru niecentryczności zarysów [5]. W związku z tym opracowano układ pomiarowy do pomiaru walcowości metodą odniesieniową, składający się z dwóch połączonych pryzm, względem których po dokładnie wykonanych prowadnicach przemieszczałyby się czujnik pomiarowy. Zasadę pomiaru zarysów walcowości metodą odniesieniową przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Zasada pomiaru walcowości metodą odniesieniową;

α , β , L - parametry metody

Fig. 1. Principle of measurement of cylindricity profiles with a reference method, where α , β , L - are method parameters

Przy pomiarze walcowości za pomocą proponowanej metody przedmiot mierzony umieszczony jest w urządzeniu kłowym. Do jego powierzchni przylegają dwie połączone ze sobą pryzmy. Element łączący pryzmy pełni dodatkowo rolę prowadnicy, po której przesuwa się indukcyjny czujnik pomiarowy. Pomiar walcowości przedmiotu polega na odpowiednim skanowaniu powierzchni przedmiotu za pomocą czujnika pomiarowego wzdłuż odpowiednio zaprojektowanej trajektorii poprzez odpowiednie sterowanie kątem obrotu przedmiotu i przesunięciem czujnika. Podczas pomiaru wskazania czujnika zależą od wartości odchyłki w punkcie styku czujnika z powierzchnią przedmiotu, od odchylenia osi rzeczywistej od osi oraz innych błędów przyrządu, np. błąd prostoliniowości przesuwu czujnika, nierównoległość osi przesuwu do osi przedmiotu. Z tego względu dla zaproponowanego układu pomiarowego zostały opracowane teoretyczne podstawy odniesieniowych metod pomiaru walcowości. Pozwoliło to na opracowanie matematycznej transformacji zmierzonego zarysu walcowości na zarys rzeczywisty i modelu matematycznego odniesieniowych metod oceny walcowości. Model ten został użyty przy tworzeniu procedur komputerowych, które wykorzystane zostały w programie komputerowym umożliwiającym transformację zarysu zarejestrowanego przez czujnik na zarys rzeczywisty, a także pozwalającym na wszechstronną analizę uzyskanych wyników pomiaru walcowości. Program ten został wykorzystany podczas eksperymentalnej weryfikacji opracowanej koncepcji.

3. Określenie zależności między zarysem zmierzonym a rzeczywistym

W pomiarze metodą odniesieniową sygnał uzyskany z czujnika pomiarowego jest zakłócony przez pierwszą składową harmoniczną zarysu. Dlatego też, aby uzyskać poprawne wyniki pomiarów konieczne jest dokonanie matematycznej transformacji zmierzonego zarysu walcowości $F(\varphi, z)$ na tzw. *zarys rzeczywisty* $R(\varphi, z)$. Zależność między zarysami $F(\varphi, z)$ i $R(\varphi, z)$ przedstawia równanie (1):

$$F(\varphi, z) = R(\varphi + \beta, z) + E_x(\varphi, z) \cos \beta + E_y(\varphi, z) \sin \beta \quad (1)$$

gdzie $E_x(\varphi, z)$ i $E_y(\varphi, z)$ to współrzędne kartezjańskie przecięcia osi walca obróconego o kąt φ z płaszczyzną prostopadłą do osi Z o współrzędnej z .

W celu rozwiązania tego zagadnienia autorzy posłużyli się rozwinięciem sygnału w szereg Fouriera. Niech \hat{F}_{nz} i \hat{R}_{nz} będą n -tymi składowymi rozwinięcia zarysów $F(\varphi, z)$ i $R(\varphi, z)$ w wykładniczy szereg Fouriera $n = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty$, tzn.:

$$R(\varphi, z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{R}_{nz} e^{in\varphi}, \quad F(\varphi, z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{F}_{nz} e^{in\varphi} \quad (2)$$

Wiedząc, że:

$$E_x(\varphi, z) = E_x(\varphi, 0) \left(1 - \frac{z}{L}\right) + E_x(\varphi, L) \frac{z}{L} \quad (3)$$

$$E_y(\varphi, z) = E_y(\varphi, 0) \left(1 - \frac{z}{L}\right) + E_y(\varphi, L) \frac{z}{L} \quad (4)$$

oraz wykorzystując fakt, że w punktach styku pryzm z elementem mierzonym odległość między zarysem walca mierzonego i nominalnego jest równa zero, można wyprowadzić zależność między zarysem $F(\varphi, z)$ i $R(\varphi, z)$ w dziedzinie składowych rozwinięcia zarysu w wykładniczy szereg Fouriera:

$$\hat{F}_n(z) = e^{in\varphi} \hat{R}_n(z) - \left(\left(1 - \frac{L}{z}\right) \hat{R}_{n0} + \frac{z}{L} \hat{R}_{nL} \right) \hat{M}_n \quad (5)$$

$$\hat{M}_n = \frac{1}{2} e^{in\alpha} \left[\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} + \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right] + \frac{1}{2} (-1)^n e^{-in\alpha} \left[-\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} + \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right] \quad (6)$$

Składowe \hat{R}_{n0} i \hat{R}_{nL} w początkowym i końcowym przekroju poprzecznym (dla współrzędnej z równej odpowiednio 0 i L) wyznacza się z zależności

$$\hat{F}_{n0} = \hat{R}_{n0} \hat{K}_n \quad \text{i} \quad \hat{F}_{nL} = \hat{R}_{nL} \hat{K}_n, \quad (7)$$

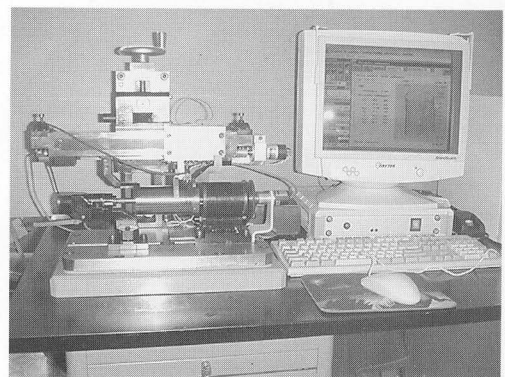
gdzie

$$\hat{K}_n = e^{in\beta} - \hat{M}_n \quad (8)$$

\hat{K}_n jest tzw. współczynnikiem wykrywalności określającym stopień wykrywania poszczególnych harmonicznych zarysu. Z zależności (5)-(7) wynika, że pomiar walcowości elementu powinien obejmować pomiary zarysów okrągłości w przekrojach podpór.

4. Eksperymentalna weryfikacja proponowanej koncepcji

Aby umożliwić eksperymentalną weryfikację przeprowadzonych prac teoretycznych i wykonanych symulacyjnych badań komputerowych zbudowane zostało modelowe skomputeryzowane stanowisko badawcze PSA 6 do odniesieniowych pomiarów zarysów walcowości, którego konstrukcja wykorzystuje założenia opracowanej koncepcji (rys.2.)



Rys. 2. Modelowe stanowisko badawcze do odniesieniowych pomiarów zarysów walcowości PSA 6

Fig. 2. The PSA 6 - a model device for reference cylindricity measurements

Stanowisko to jest skomputeryzowane. Program komputerowy współpracujący z przyrządem PSA 6 zawiera procedury, które zostały opracowane na podstawie modelu matematycznego odniesieniowych pomiarów zarysów walцовości i umożliwia transformację zmierzzonego zarysu walцовości na zarys rzeczywisty.

Eksperymentalną weryfikację opracowanej koncepcji pomiaru walцовości metodą odniesieniową przeprowadzono na drodze testowania statystycznego. Celem tego testowania było eksperymentalne określenie błędu metody odniesieniowego pomiaru zarysów walцовości dla odpowiednich próbek według zasad wnioskowania statystycznego oraz dokładności metody. Badania przeprowadzono na modelowym stanowisku badawczym PSA 6 oraz na skomputeryzowanym przyrządzie do pomiarów walцовości i okrągłości metodą promieniową *Talycenta* firmy *Taylor Hobson*, uznanym za wzorcowy. Pomiarowi podlegała próbka 50 losowo wybranych sworzni.

W statystycznej ocenie dokładności opracowanej koncepcji w badaniach podstawowych przyjęto jako parametr eksperymentalny błąd metody odniesieniowych sposobów pomiarów zarysów walцовości, uwzględniając wartość odchyłki walцовości ΔC . Eksperymentalny błąd metody skomputeryzowanego odniesieniowego pomiaru zarysów walцовości (w stosunku do pomiaru uzyskanego metodą promieniową) określony jest zależnością 9.

$$w_{\Delta C} = \frac{\Delta C_o - \Delta C_B}{\Delta C_B} \quad (9)$$

gdzie: $w_{\Delta C}$ - błąd metody, ΔC_o - odchyłka walцовości wyznaczona metodą odniesieniową, ΔC_B - odchyłka walцовości wyznaczona metodą promieniową.

Na podstawie zależności 9 obliczono błąd metody dla każdego elementu próbki. Następnie obliczono średnią wartość błędu metody $\bar{w}_{\Delta C}$ za pomocą zależności 10

$$\bar{w}_{\Delta C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_{\Delta C_i} \quad (10)$$

gdzie: $\bar{w}_{\Delta C}$ - średni błąd metody, n - liczność próbki.

Po obliczeniu średniego błędu metody wyliczone zostało jego odchylenie średnie kwadratowe za pomocą zależności 11

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (w_{\Delta C_i} - \bar{w}_{\Delta C})^2} \quad (11)$$

Dokładność pomiarową metody *DM* wyliczono za pomocą zależności

$$DM = \left| \bar{w}_{\Delta C} \pm k_p s \right|_{\max} \cdot 100\% \quad (12)$$

przy czym k_p jest tzw. współczynnikiem rozszerzenia [6] zależnym od prawdopodobieństwa. Do badań przyjęto wartość prawdopodobieństwa $P=0,95$ (dla $P=0,95$ wartość współczynnika rozszerzenia $k_p=1,96$).

Wyniki przeprowadzonych obliczeń zostały umieszczone w tabeli 1.

Z danych ujętych w tabeli 1 wynika, że wartość średnia względnego eksperymentalnego błędu metody $\bar{w}_{\Delta C}=0,04$, natomiast dokładność pomiaru odchyłki walцовości dla badanej próbki wynosi

Tab. 1. Wyniki statystycznych badań dokładności pomiaru walцовości metodą odniesieniową

Tab. 1. The results of statistical examination of the method of reference cylindrical measurements

Parametr	Wartość
Wartość najmniejsza błędu metody $w_{\Delta C_{\min}}$	-0,142
Wartość największa błędu metody $w_{\Delta C_{\max}}$	0,180
Wartość średnia błędu metody $\bar{w}_{\Delta C}$	0,04
Odchylenie średnie kwadratowe s	0,074
Dokładność metody <i>DM</i>	19,4%

19,4%. Przyjmując, że obliczony eksperymentalny błąd metody pomiaru jest wystarczającą miarą dokładności oraz uwzględniając akceptowane powszechnie założenia, iż w kontroli technicznej dokładność przyrządu do pomiaru struktury geometrycznej powierzchni powinna zawierać się w granicach 10%-25%, można stwierdzić, że zaproponowana koncepcja odniesieniowego pomiaru zarysów walцовości. Uzyskana dokładność pozwala na zakwalifikowanie przyrządu PSA 6, opartego na metodzie odniesieniowej, jako nadającego się do przeprowadzania pomiarów przemysłowych.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania doświadczalne udowodniły, że metoda odniesieniowa, dzięki zastosowaniu technik komputerowych, pozwala na przeprowadzenie dokładnych pomiarów walцовości w warunkach przemysłowych. Otrzymane wyniki potwierdziły prognozy dotyczące dokładności tak samego urządzenia, jak i użycia pomiaru. Dodatkowo, czas pomiaru za pomocą nowej metody był dużo krótszy, gdyż element mierzony był jedynie mocowany w urządzeniu kłowym, natomiast w przypadku pomiaru metodą promieniową konieczne było przeprowadzenie czasochłonnego centrowania i poziomowania przedmiotu na stole pomiarowym. Na podstawie uzyskanych wyników eksperymentu można stwierdzić z dużym prawdopodobieństwem, że metoda odniesieniowa umożliwia budowę przyrządów do pomiaru walцовości, cechujących się prostotą konstrukcji i umożliwiającymi dokładny pomiar walцовości w warunkach produkcyjnych, być może nawet bezpośrednio na obrabiarce. Celem przyszłych prac badawczych będzie analiza potencjalnych źródeł błędów pomiaru walцовości związanych z konstrukcją przyrządów odniesieniowych oraz próba eliminacji ich wpływu na wynik pomiaru.

Praca została wykonana w ramach grantu KBN nr 7T07D00617 pt. „Teoretyczno-eksperymentalne podstawy odniesieniowych pomiarów zarysów walцовości części maszyn“

6. Literatura

- [1] ŻEBROWSKA-ŁUCYK S.: Bezodniesieniowa metoda badania makrogeometrii powierzchni elementów obrotowych. Politechnika Warszawska. Prace Naukowe. Mechanika, zeszyt 187, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [2] WESTKÄMPER E., MICHEL S., GENTE A., LANGE D.: Prozessnahe Rundheitsmeßtechnik mit 3-Punktmeßsystemen. In 6. Internationales DAAAM Symposium, TU Krakow, 1995, ss.363-364.
- [3] WHITEHOUSE D.J.: Handbook of Surface Metrology, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1994.
- [4] ADAMCZAK S. i inni: Koncepcja komputerowych metod odniesieniowych do dokładnych pomiarów zarysów okrągłości części maszyn. Projekt badawczy KBN nr 7T07D04008, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1997.
- [5] KATSURADA K., GOHO K., MITSUI K., HAYASHI A., Cylindricity measurement of parallel rollers based on a V-block method, Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, CHEN/Transactions of the JSME, Vol. 69, No. 11, 2003, s. 3124-3129.
- [6] ADAMCZAK S., Odniesieniowe metody pomiaru zarysów okrągłości, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, seria Monografie, nr 12, Kielce 1998.

Title: Statistical investigation on accuracy of reference measurements of cylindrical profiles