

Obliczenia parametrów walca i odchyłek walcowości

RYSZARD FILIPOWSKI, JÓZEF ZAWORA *

Opracowano program obliczenia parametrów walca na podstawie pomiarów pięciu okręgów na współrzędnościowej maszynie pomiarowej (WMP). Parametrami obliczanymi przez program są: średnica walca, oś nachylenia osi walca do bazy pomiarowej, walec odniesienia najmniejszych kwadratów (LSCY), oś walca przechodząca przez środki skrajnych okręgów pomiarowych. Grafikę odchyłek względem walca LSCY przedstawiono w systemie Auto CAD za pomocą polecenia *script*. Opracowany program stanowi uzupełnienie oprogramowania maszyn współrzędnościowych.

WSTĘP

Pomiary odchyłek walca są zagadnieniem złożonym. Tradycyjnie, pomiary odchyłek są wykonywane czujnikami zegarowymi. Na stole pomiarowym, przedmiot ustalany jest w kłach i bazowany na nakiełkach lub fazkach przedmiotu. Współcześnie, do pomiaru odchyłek są wykorzystywane WMP. Starsze typy WMP nie mają algorytmów do obliczania odchyłek walcowości w swoim oprogramowaniu. Ponieważ istnieje możliwość wyprowadzania ciągów współrzędnych punktów pomiaru walca, opracowano oprogramowanie, które oblicza odchyłki i parametry walca poza oprogramowaniem WMP.

Standardowo, pomiar walca polega na pomiarze dwóch okręgów rozmieszczonych wzdłuż jego osi. Taki pomiar pozwala na obliczenie średnicy walca, kąta nachylenia osi do bazy (czoło cylindra), ale nie pozwala określić odchyłek występujących na powierzchni walca. Odchyłki walcowości można ustalić posługując się zalecanymi w normach

strategiami pomiaru walca [5, 6, 7]. W przedstawionym niżej programie o nazwie CYLMZ przyjęto strategię profilu okrągłości. W prezentowanym przypadku, przyjęto pięć przekrojów: dwa skrajne, środkowy i dwa pośrednie. Pomiary wykonano na WMP VISTA ZEISS, metodą CNC, głowicą z przetwornikiem elektrostatycznym TP2-6W. Niepewność pomiaru na WMP wynosi $u_1 = 2,5 + L/250 \mu\text{m}$ [1].

Podczas pomiaru zapisywane są współrzędne środka kulki. Zarejestrowane punkty na pięciu okręgach w walcu są wykorzystywane do obliczenia parametrów walca i odchyłek na jego powierzchni. Pierwszy o nazwie CYLMZ, służy do obliczenia parametrów i odchyłek walca. Dla utworzenia obrazów 2D odchyłek okrągłości otworów, opracowano drugi program o nazwie DEV2Z, który tworzy upakowany plik PLINE (.scr) współrzędnych (x_i, y_i) punktów pomiarowych. Dla obrazów 3D odchyłek walcowości, opracowano trzeci program o nazwie DEV3Z, który tworzy upakowany plik 3DMESH (.scr) współ-

rzędnych (x_i, y_i, z_i) punktów pomiarowych. Do prezentacji graficznej odchyłek od średnicy walca LSCY (najmniejszych kwadratów) zastosowano program Auto CAD. Wymienione pliki .scr wczytuje się do systemu Auto CAD przez polecenie *script*.

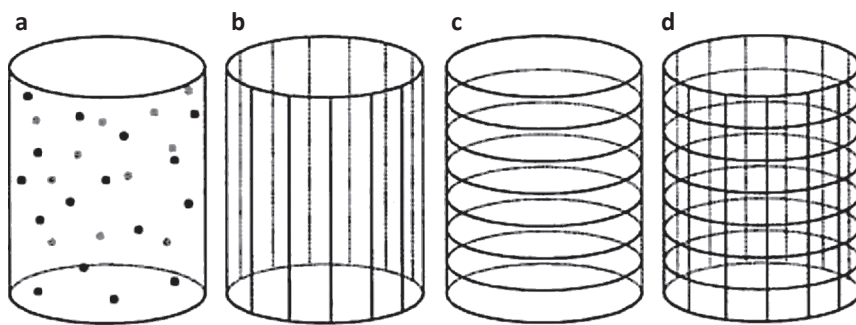
STRATEGIE POMIARU WALCA NA WMP

Pomiary walca i jego odchyłek można wykonać jedną z czterech strategii pomiarowych: punktową, tworzącą profil okrągłości, oraz klatki, [4, 5, 6, 7]. Do pomiaru walca wybrano strategię c) profilu okrągłości (rys. 1).

Pomiary walca wykonano metodą punktową w trybie CNC na WMP VISTA ZEISS, metodą CNC, głowicą z przetwornikiem elektrostatycznym TP2-6W [1] (rys. 2).

Wzdłuż tworzącej walca wykonano pomiary pięciu okręgów, oddalonych od czoła cylindra: $L1 = -2,1 \text{ mm}$, $L2 = -25,1 \text{ mm}$, $L3 = -50,1 \text{ mm}$, $L4 = -75,1 \text{ mm}$, $L5 = -100,1 \text{ mm}$. Na rys. 2 przedsta-

* Dr inż. Ryszard Filipowski, rfilipowski@meil.pw.edu.pl, dr hab. inż. Józef Zawora, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji.



Rys. 1. Strategie pomiarowe odchyłek walcowości: a) punktowa, b) tworzącej, c) profilu okrągłości, d) kratki

wiono pomiar okręgu w cylindrze w odległości $L1 = -2,1$ mm.

TRADYCYJNE METODY POMIARU ODCHYLEK KSZTAŁTU WAŁKA

W przypadku wałków, charakterystycznymi odchyłkami, których wartości graniczne definiuje się, są odchyłki:

- okrągłości,
- walcowości.

Pierwsza z nich określa dopuszczalne wartości w jednym przekroju, natomiast druga na całym mierzonym odcinku wałka.

Tradycyjnie pomiary odchyłek kształtu wałka wykonuje się na powierzchni walcowej za pomocą czujnika zegarowego. Oś przedmiotu ustalają nakiełki (wałki) lub fazki (tuleje) – rys. 3.

Podczas pomiaru w przekrojach I, II, III (rys. 3), rejestrowane są odchyłki w funkcji kąta obrotu (wałek wykonuje pełny obrót). Pomiary umożliwiają ustalenie wartości odchyłek: okrągłości (rys. 4) oraz walcowości (rys. 5).

Przykłady odchyłek kształtu: okrągłości i walcowości

Szczególnymi przypadkami odchyłki okrągłości są: owalność, graniastość, spłaszczenie. Na rys. 4 pokazano wymiary niezbędne do określenia wartości owalności.

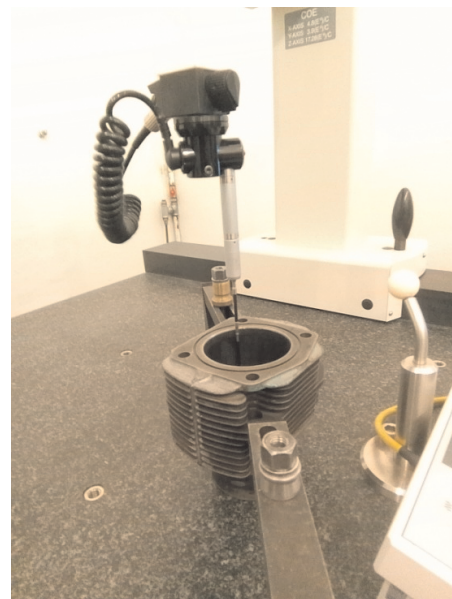
Wartość odchyłki owalności wałka wynika z różnicy jego średnic mierzonych co 90 stopni i liczona jest ze wzoru:

$$\Delta = \frac{D_{max} - D_{min}}{2} \quad [1]$$

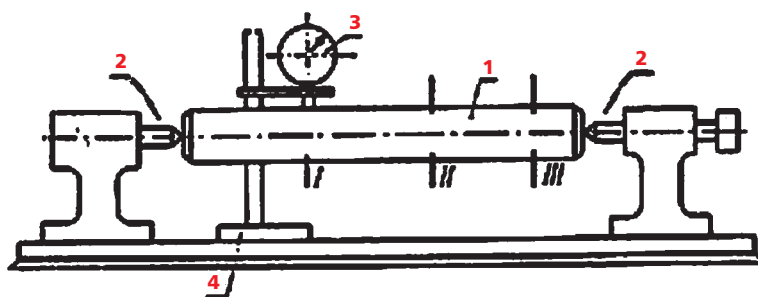
Odchyłka walcowości jest to największa odległość między walcem rzeczywistym a walcem przylegającym. W przypadku

powierzni zewnętrznych, walec przylegający to walec o najmniejszej średnicy opisany na jego powierzchni lub – w przypadku powierzchni wewnętrznych – walec o największej średnicy wpisany w powierzchnię otworu.

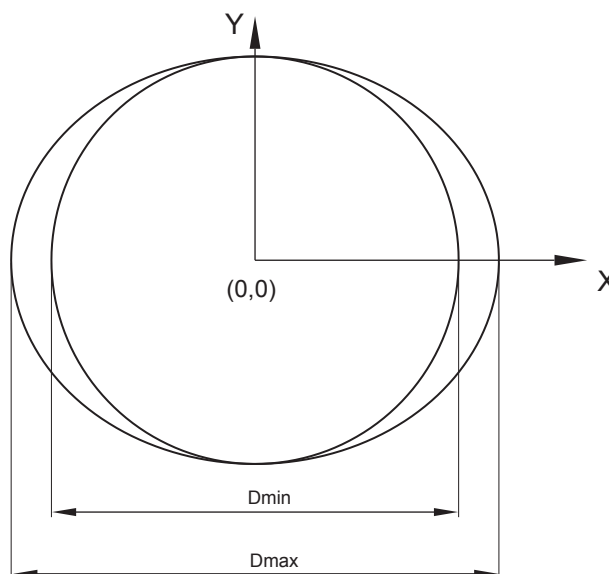
Walcowość jako odchyłka kształtu walca związana jest z odchyłkami: okrągłości,



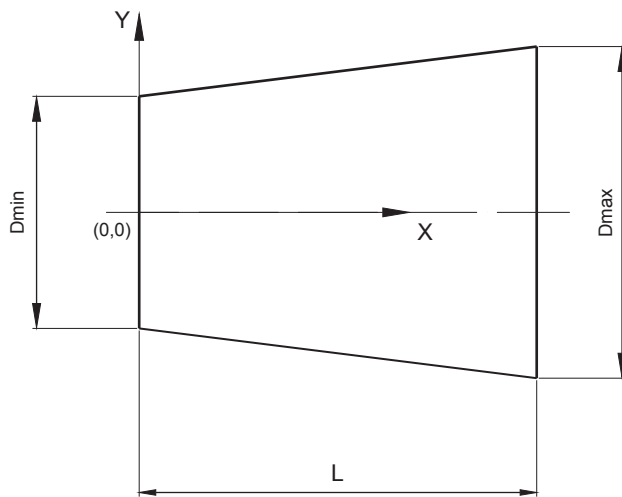
Rys. 2. Pomiar okręgu w cylindrze silnika tłokowego na WMP VISTA ZEISS w odległości $L1 = -2,1$ od czola cylindra



Rys. 3. Schemat pomiaru odchyłek wałka na płycie mierniczej: 1 – wałek, 2 – kły ustalające, 3 – czujnik zegarowy, 4 – statyw



Rys. 4. Owalność – szczególny przypadek odchyłki okrągłości



Rys. 5. Przykład odchyłki walcowości – stożkowość

prostoliniowości tworzącej oraz równoległości tworzących do osi. Szczególnymi przypadkami odchyłki walcowości są: baryłkowość, siodłowość, wygięcie, stożkowość [6].

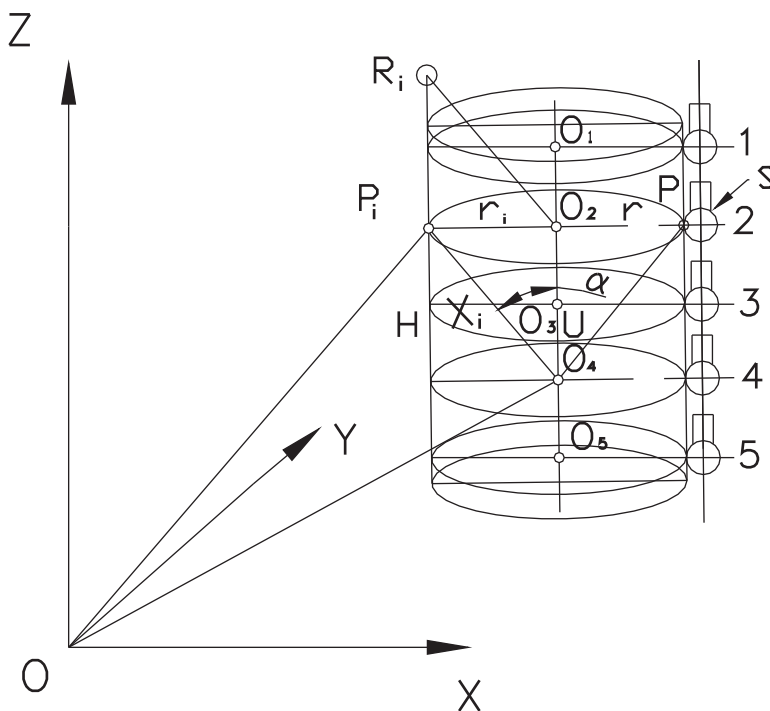
Wartość odchyłki stożkowości wałka (rys. 5) zależy od różnicy średnic mierzonych wzdłuż tworzącej walca o długości L i oblicza się ją ze wzoru:

$$\Delta = \frac{D_{max} - D_{min}}{2} \quad [2]$$

Ponieważ wartość odchyłki stożkowości bezpośrednio zależy od odległości mierzonych średnic L , podając wartość odchyłki należy podać także tę odległość.

PIĘCIU PROFILI OKRĄGŁOŚCI

Do pomiaru odchyłek walcowości cylindra silnika tłokowego zastosowano strategię pięciu profili okrągłości. Schemat pomiaru przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Schemat pomiaru cylindra silnika tłokowego na WMP VISTA ZEISS wg strategii pięciu profili okrągłości: 1,2,3,4,5 – płaszczyzny pomiaru walca, S – głowica elektrostrykowa TP2-6W z końcówką kulistą, O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 – środki okręgów wyznaczone metodą LSCI [6], P_i – punkty leżące na okręgu pomiarowym, R_i – promień punktu pomiarowego, r – teoretyczny promień walca

Pomiary wykonano na WMP VISTA Zeiss, metodą punktową w trybie CNC, głowicą elektrostrykową TP2-6W z końcówką sferyczną o średnicy 5,944 mm. Na każdym okręgu w cylindrze pomiarów dokonywano w 55 punktach pomiarowych. Przedstawiona niżej metoda obliczania odchyłek walcowości zalecana jest do stosowania w przypadku, gdy oprogramowanie WMP takich obliczeń nie wykonuje, a istnieje możliwość pozyskania współrzędnych punktów pomiarowych podczas pomiarów (np. oprogramowanie WMP VIS OBRN Warszawa [2]). Układ współrzędnych, w którym wykonuje się pomiary CNC jest określony przez płaszczyznę czołową cylindra, jego średnicę oraz punkt charakterystyczny definiujący zwrot osi OX . Podczas pomiaru rejestrowane są współrzędne środka kulki końcówki pomiarowej przy ruchu sondy pomiarowej wzdłuż obwodu okręgu.

W obliczeniach parametrów walca przyjęto (dla przybliżenia do warunków pomiaru w metodzie tradycyjnej rys. 3), że oś walca przechodzi przez środki okręgów skrajnych, tj. pierwszego O_1 ($z = -2,1$ mm) w górnej części cylindra, oraz ostatniego O_5 ($z = -100,1$ mm) w dolnej części cylindra.

Kąt nachylenia osi walca α

Na rys. 7 przedstawiono schemat obliczenia kąta nachylenia osi walca. Przyjęto założenie, że oś walca O_1-O_5 jest nachylona względem płaszczyzny bazowej pod kątem α .

Współrzędne okręgu O_1 (x_1, y_1) odpowiadają $z = -2,1$ mm, współrzędne okręgu O_5 (x_5, y_5) odpowiadają $z = -100,1$ mm. Kąt nachylenia osi walca określa wzór:

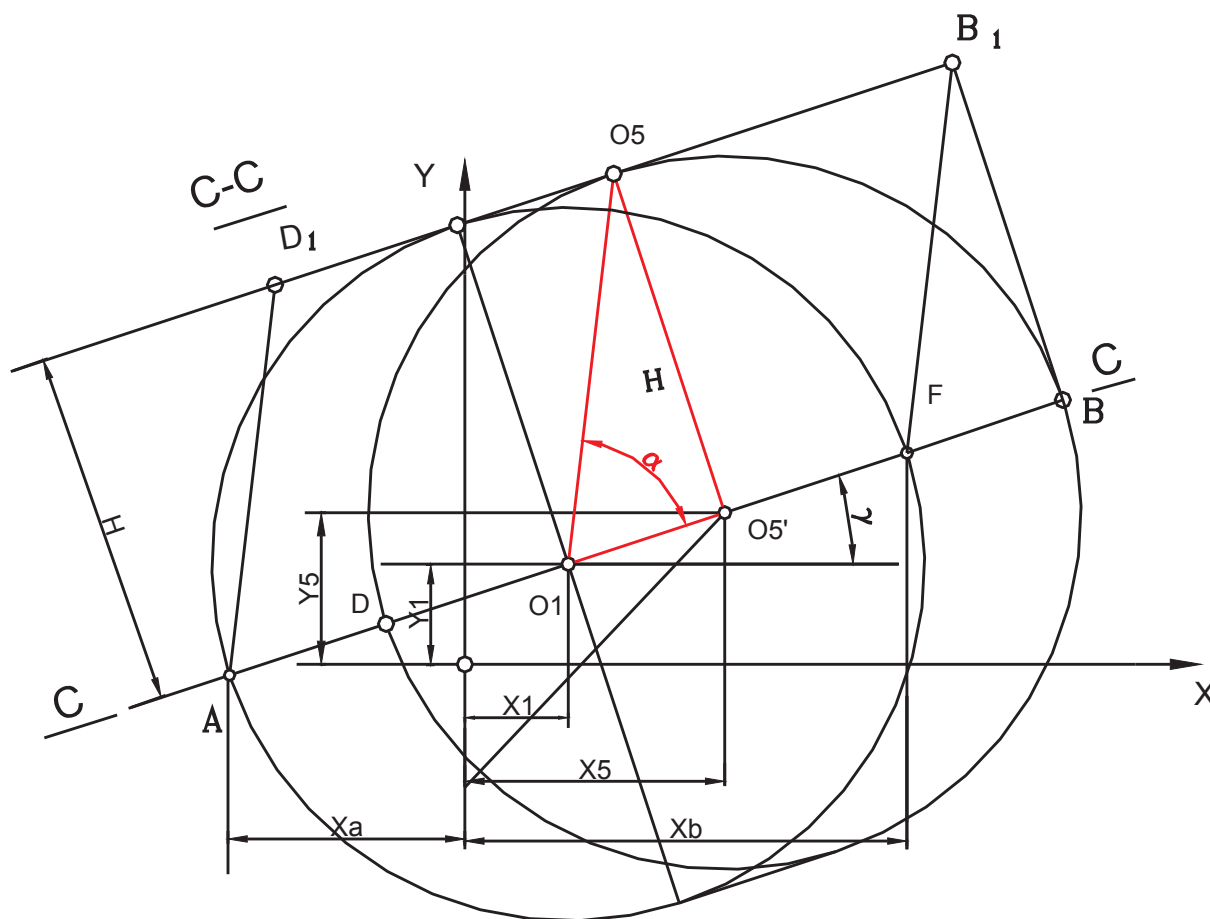
$$\text{tg } \alpha = \frac{H}{\sqrt{(x_5 - x_1)^2 + (y_5 - y_1)^2}} \quad (3)$$

W tabeli 1 przedstawiono wartość kąta α nachylenia osi walca obliczoną przez programy CYLMZ oraz CALYOSO (Zeiss).

Tabela 1. Kąt nachylenia osi cylindra do płaszczyzny bazowej

= 89,9604 stopni \approx 89°57'37" - wg CYLMZ
= 89,9676 stopni \approx 89°58'03" - wg CALYOSO

Nieznaczna różnica wartości obliczonych za pomocą dwóch programów (ok. 0,01%) świadczy o dokładności



Rys. 7. Schemat do algorytmu obliczania kąta nachylenia osi walca względem bazy (C-C): H = wysokość walca, $O_1(x_1, y_1)$, $O_5(x_5, y_5)$ – środki okręgów

proponowanego programu, a tym samym o jego przydatności w praktyce badawczej.

Obliczenie parametrów okręgu i jego położenia

Przez parametry rozumiemy współrzędne środka okręgu (x_s, y_s), promień r_s oraz współrzędną z_s położenia płaszczyzny okręgu względem bazy pomiarowej (czoło cylindra). Do ustalenia parametrów okręgu wykorzystuje się w programie CYLMZ dwa podprogramy:

– najmniejszych kwadratów dla okręgu, o nazwie *OKRL(NN)* [10, 11]; program oblicza parametry okręgu (x_s, y_s, r_s)

– najmniejszych kwadratów dla płaszczyzny, o nazwie *SUPL3D(NN)* [10, 11]; program oblicza współrzędną z_s położenia płaszczyzny w przestrzeni 3D.

Wartości parametrów okręgów: O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 – obliczone przez program CYLMZ zamieszczono w tabeli 2:

Równanie parametryczne osi walca

Oś walca przechodzi przez środki okręgów O_1 i O_5 . Równanie osi walca określa wzór w zapisie parametrycznym:

– składowe wektora osi walca $[u_1, u_2, u_3]$ określają współrzędne:

$$\begin{cases} u_1 = (x_{s_5} - x_{s_1}) \\ u_2 = (y_{s_5} - y_{s_1}) \\ u_3 = (z_{s_5} - z_{s_1}) \end{cases}$$

– równanie parametryczne osi walca w przestrzeni 3D:

$$\begin{cases} x = x_{s_1} + t \cdot u_1 \\ y = y_{s_1} + t \cdot u_2 \\ z = z_{s_1} + t \cdot u_3 \end{cases} \quad (5)$$

Podstawiając do równania (5) obliczone przez program CYLMZ wartości składowych (u_1, u_2, u_3) wektora osi walca

Tabela 2. Współrzędne okręgów O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 przed translacją

Okrąg	Współrzędne		
	x_{s_i}	y_{s_i}	z_{s_i}
O_1	0,00002	0,00653	-100,10009
O_2	-0,00194	0,00347	-75,10011
O_3	-0,00370	0,00663	-50,10028
O_4	-0,00253	0,00775	-25,10031
O_5	-0,00591	0,00724	-2,10048



otrzymujemy ostateczną formę równania:

$$\left. \begin{aligned} x &= 0,0 - t \cdot 0,0059 \\ y &= -0,0065 + t \cdot 0,0007 \\ z &= -100,1001 + t \cdot 97,9996 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Przesuwamy środki okręgów (O_2, O_3, O_4) na oś walca, korzystając z równania osi walca (6). Ponieważ znane są współrzędne (z_2, z_3, z_4) okręgów (O_2, O_3, O_4) można obliczyć wartości parametrów (t_2, t_3, t_4) im odpowiadające, dla których oblicza się współrzędne okręgów (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4). W ten sposób zrealizowano translację środków okręgów (O_2, O_3, O_4) na oś walca. Niżej (tabela 3) przytoczono parametry okręgów (O_2, O_3, O_4) po translacji.

Względem przesuniętych środków okręgów (O_2, O_3, O_4) oblicza się odchyłki punktów pomiarowych R_p, R_v i R_m uzyskanych w pomiarach [6] Największa odchyłka R_m względem osi walca stanowi odchyłkę walcowości.

Parametry walca obliczone przez program CYLMZ

Odchyłki punktów pomiarowych obliczone za pomocą programu CYLMZ są następujące:

- okrąg 1 – odchyłka $R_v = 0,0218$ mm,
- okrąg 5 – odchyłka $R_p = 0,0263$ mm,
- odchyłka walcowości: $R_m = 0,0481$ mm,
- odchyłka walcowości wg CALYOSO: $R_m = 0,0419$ mm.

Wartości wybranych cech geometrycznych walca, obliczone za pomocą tego samego programu są następujące:

- średnica walca odniesienia określona za pomocą programu $LSCI = 73,5202$ mm,
- największa średnica walca DMICY = $= 73,5250$ mm,
- najmniejsza średnica walca DMCCY = $= 73,5128$ mm.

Pole tolerancji walcowości jest zdefiniowane przez dwa współosiowe walce [3, 8]. Cała powierzchnia rzeczywistego walca nie powinna wykraczać poza obszar ograniczony przez dwa współosiowe walce o wymiarze $D = 73,5^{+0,03}_{-0,03}$. Sposób oznaczania odchyłki walcowości w dokumentacji konstrukcyjnej przedstawiono na rys. 8.

GRAFICZNA PREZENTACJA ODCHYLEK WALCA

Do prezentacji graficznej odchyłek okrągłości i walcowości wykorzystano ogólnie dostępny program AutoCAD [9].

Odchyłki okręgów C₁ i C₅ w odległościach L1 i L5 od czoła cylindra

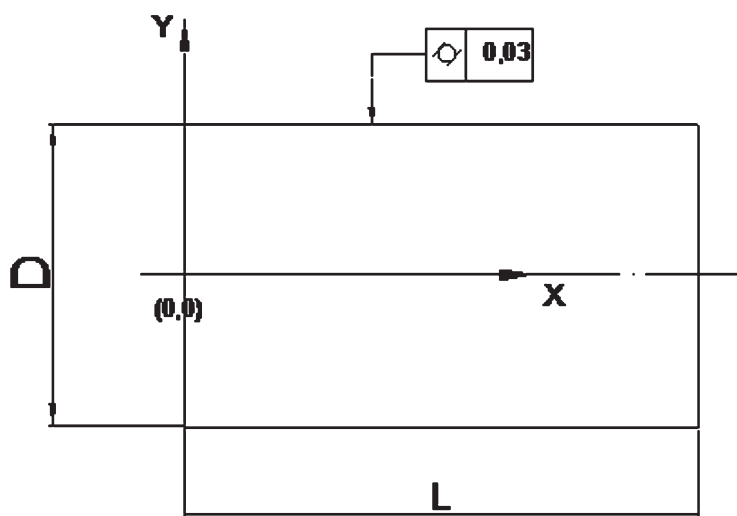
Obraz odchyłek okrągłości w przestrzeni 2D uzyskuje się przez zastosowanie polecenia script [9]. W tym celu należy przetworzyć pliki tekstowe współrzędnych (x_i, y_i) po interpolacji na upakowane pliki PLINE (.scr). Do tego celu opracowano program o nazwie DEV2Z. Utworzone pliki PLINE dla okręgów bazowych C1 i C5 wczytuje się do systemu AutoCAD przez polecenie script. Obrazy odchyłek przedstawiono na rys. 9 i 10:

Na rys. 9 przedstawiono odchyłki okręgu C1 (kolor czerwony) względem wymiaru $D = 73,5^{+0,03}_{-0,03}$, leżącego w odległości $L1 = -2,1$ mm od czoła cylindra. Dwa okręgi współśrodkowe (kolor czarny) oznaczają odchyłki graniczne $\pm 0,03$ mm, a trzeci, środkowy – wymiar nominalny.

Na rys. 10 przedstawiono odchyłki okręgu C5 (kolor czerwony) względem wymiaru $D = 73,5^{+0,03}_{-0,03}$, leżącego w odległości $L5 = -100,1$ mm od czoła cylindra. Podobnie jak wyżej dwa okręgi współśrodkowe (kolor czarny) oznaczają odchyłki graniczne $\pm 0,03$ mm, a trzeci – wymiar nominalny.

Tabela 3. Współrzędne okręgów O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 po translacji

Okrąg	Współrzędne		
	XLC _i	YLC _i	ZS _i
O ₁	0,00002	0,00653	-100,10009
O ₂	-0,00149	0,00671	-75,10011
O ₃	-0,00301	0,00689	-50,10028
O ₄	-0,00452	0,00653	-25,10031
O ₅	-0,00591	0,00724	-2,10048



Rys. 8. Oznaczanie odchyłki walcowości

Odchyłki obliczone (kolor czerwony) względem okręgu *LSCI* zostały powiększone przez zastosowanie mnożnika (5×10^2).

Program *DEV2Z* umożliwia zmianę zarówno wartości mnożnika w trybie konwersacji użytkownika z programem.

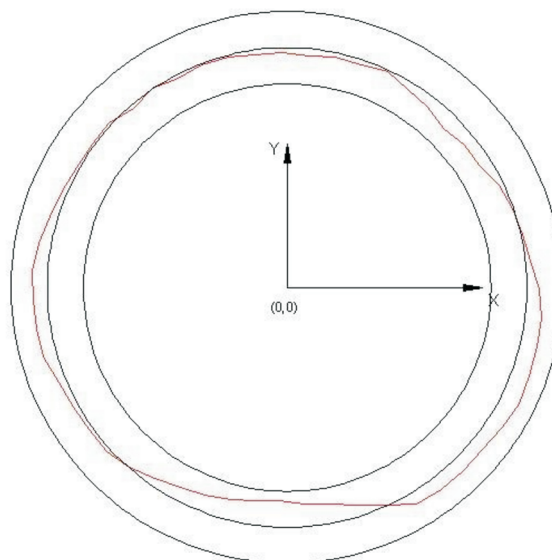
Prezentacja graficzna odchyłek walcowości w przestrzeni 3D

W celu uzyskania obrazu odchyłek walcowości w przestrzeni 3D przy zastosowaniu polecenia *script*, należy przygotować plik *3DMESH (.scr)* z opakowanymi trzema współrzędnymi (x_i, y_i, z_i) pięciu interpolowanych okręgów. W każdym okręgu musi być ta sama liczba punktów (55 punktów na rys. 11). Odchyłki walca *3DMESH* (kolor czerwony) znajdują się wewnątrz dwóch współśrodkowych walców o wymiarach $D = 73,5^{+0,03}_{-0,03}$ mm.

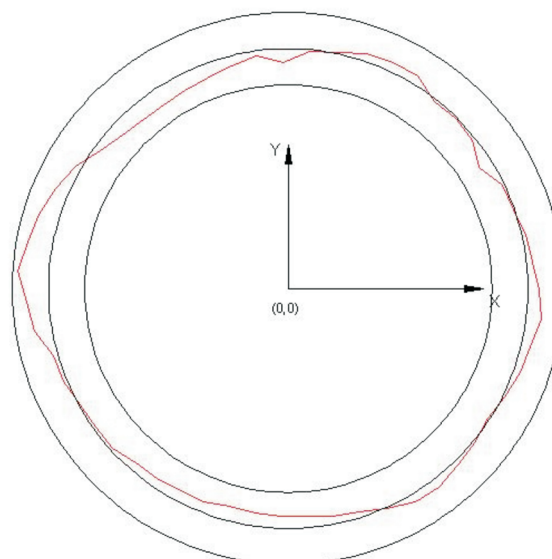
Odchyłki walcowości (kolor czerwony), rozmieszczone względem walców $D = 73,5^{+0,03}_{-0,03}$ mm (rys. 12), zostały powiększone przez zastosowanie mnożnika ($5 \cdot 10^2$). Program o nazwie *DEV3Z* umożliwia zmianę mnożnika w trybie konwersacji użytkownika z programem.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Ocena odchyłek walcowości wymaga dużej liczby punktów pomiarowych na powierzchni walca. Z tego powodu zastosowano strategię pięciu profilów okrągłości [5, 6, 7]. Pomiaru wykonano na *WMP VISTA ZEISS* [1], wyposażonej w głowicę elektrostrykową z końcówką kulistą, metodą punktową w trybie CNC. Postać graficzną odchyłek okrągłości i walcowości tworzy się za pomocą systemu *AutoCAD*. Za pomocą programu *DEV2Z* tworzy się pliki (*PLINE,.scr*) upakowane dwóch współrzędnych (x_i, y_i), które wczytane przez komendę *script* tworzą na ekranie (w skali) obrazy odchyłek od okręgów *LSCI* na tle wymiarów konstrukcyjnych. Obraz przestrzenny 3D odchyłek uzyskuje się podobnie. Za pomocą programu *DEV3Z* tworzy się pliki upakowane trzech współrzędnych (x_i, y_i, z_i) dla pięciu okręgów. Są one składowymi pliku *3DMESH, .scr*, który po wczytaniu przez komendę *script*, tworzy w opcji *3Dwius* obraz przestrzenny odchyłek, na który nanosi się dwa współśrodkowe walce



Rys. 9. Odchyłki okręgu C1 (kolor czerwony) o wymiarze $D=73,5^{+0,03}_{-0,03}$



Rys. 10. Odchyłki okręgu C5 (kolor czerwony) o wymiarze $D=73,5^{+0,03}_{-0,03}$

o wymiarach konstrukcyjnych. Przedstawione w artykule wyniki obliczeń parametrów walca oraz grafika odchyłek okrągłości oraz walcowości w *Auto CAD* dają pełną informację dotyczącą geometrii powierzchni walca.

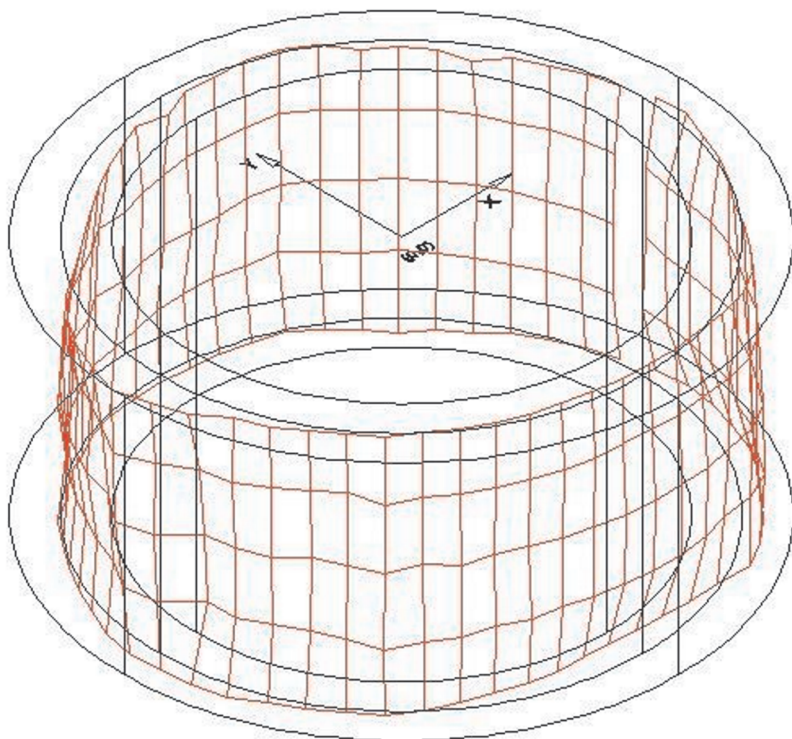
LITERATURA

1. Carl Zeiss Sp. z o.o., Segment Industrielle Messtechnik. Warszawa, e-mail: czimt@pol.pl.
2. Łazuchiewicz A., Kotnowski M.: Koordynatometr XYZ, IO NE Nr 5/88, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Narzędzi VIS, Warszawa 1988.
3. Humienny Z., Białas S., Osanna P.H, Tamre M., Weckenmann A., Blunt L.,

Jakubiec W.: Specyfikacje Geometrii Wyrobów (GPS), Warszawa, Bielsko-Biała, Erlangen, Huddersfield, Tallin, Wiedeń, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2001.

4. Norma EN ISO 12180-2:2011, Załącznik A (informacyjny) Składowe harmoniczne wyrobu nominalnie walcowego i strategię pomiaru.
5. Norma EN ISO 12180-2:2011, Załącznik B (informacyjny) Strategie pomiarowe.
6. Norma PN-EN ISO 12180-1, 2012, Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Walcowość – Część 1: Terminologia parametry kształtu walcowego, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.





Rys. 11. Odchyłki walca 3DMESH (kolor czerwony) o wymiarze $D = 73,5^{+0,03}_{-0,03}$

7. Norma PN-EN ISO 12180-2, 2012, *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Walcowość – Część 2: Operatory specyfikacji*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.

8. Nowakowski P., Gapiński B.: Analiza niepewności pomiaru odchyłki walcowości w zależności od stosowanej strategii pomiaru. *Inżynieria Maszyn*, R18, z. 3, 2013.

9. Pikoń A.: *Auto CAD*. Wydawnictwo HELION, Gliwice 1991.

10. Pfeifer T., Hemdt A.: Berechnung der Basiselemente und die Tasterkompensation in der Koordinatenmesstechnik, Teil 1: Basiselemente, *Technisches Messen* 57 (1990) 3, R. Oldenburg Verlag.

11. Ratajczyk E.: *Współrzędnościowa technika pomiarowa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005. ■