

## Bartosz GAPIŃSKI

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH; UL. PIOTROWO 3, 60-965 POZNAŃ

# Zalecenia dla pomiaru odchyłki okrągłości na współrzędnościowej maszynie pomiarowej (CMM)

mgr inż. Bartosz GAPIŃSKI

Asystent w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych ITM Politechniki Poznańskiej. Zajmuje się współrzędnościową techniką pomiarową oraz pomiarami błędów kształtu. Realizuje rozprawę doktorską pod kierunkiem prof. dr inż. Jana Chajdy. Jest autorem kilkunastu publikacji w kraju i za granicą oraz uczestnikiem wielu projektów i grantów badawczych. Pełni funkcję v-ce przewodniczącego Koła SIMP oraz opiekuje się Studenckim Kołem Młodych Metrologów MIKRON.



e-mail: bartosz\_gapinski@o2.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono propozycję zaleceń dla pomiaru odchyłki kształtu (okrągłości) na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Zaprezentowano wpływ cech mierzonego elementu – postać błędu kształtu i tolerancji wykonania oraz metody pomiarowej – liczba punktów pomiarowych, dokładność CMM i stosowany element odniesienia na uzyskiwane wyniki pomiaru. Rezultaty prowadzonych badań symulacyjnych jak i laboratoryjnych potwierdzają, że stosowanie minimalnej liczby punktów pomiarowych jest niewskazane. Jednocześnie, w pomiarach impulsowych, nadmierne ich zwiększanie nie wpływa na poprawę uzyskiwanych wyników. Przedstawiono zalecenia doboru liczby punktów pomiarowych jak i współrzędnościowej maszyny pomiarowej.

**Słowa kluczowe:** współrzędnościowa technika pomiarowa, błąd kształtu, okrągłość, symulacja cyfrowa

## Recommendations for the roundness measurement with CMM

In the paper, the proposal of recommendations for roundness measurement with Coordinate Measuring Machine has been introduced. The influence of the measured element characteristics like tolerance and type of form deviation on the measurement results has been discussed, as well as the measuring methods, number of points, fitting element and inaccuracy of the CMM. The results of simulations and measurements had proved that so-called minimal number of points is inappropriate. At the same time, in the pulse method, there is no reason to increase the points number too much, because of longer measurement and small improvement of accuracy. The recommendations on appropriate numbers of measuring points and the CMM for particular measuring tasks have been presented.

**Keywords:** coordinate measuring technique, shape deviation, roundness, digital simulation

## 1. Wstęp

Silna konkurencja oraz zapotrzebowanie ze strony odbiorców wymusza nieustanną pogoń za poprawą jakości wyrobów. Wytwórcy zmuszeni są do inwestowania w nowoczesne maszyny technologiczne. Pociąga to za sobą równoczesny rozwój działów kontroli jakości oraz stosowanie coraz dokładniejszych i bardziej zaawansowanych przyrządów pomiarowych. W zależności od specyfiki produkcji kupowane są urządzenia specjalizowane lub uniwersalne. Wykonywane pomiary często dotyczą elementów typu wałek lub otwór oraz oceny poprawności ich wykonania, a co za tym idzie współpracy.

Pomiar odchyłki okrągłości może być realizowany różnymi metodami – od najprostszych jak pomiar odniesieniowy

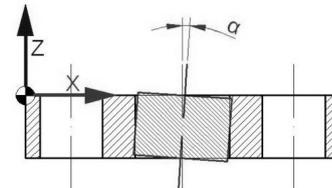
w przyzmię po użytkowanie bardzo precyzyjnych przyrządów do badania okrągłości. Możliwy jest także pomiar na urządzeniach uniwersalnych – jak choćby współrzędnościowe maszyny pomiarowe (CMM) [2]. CMM stają się coraz częściej alternatywnym wyposażeniem laboratorium pomiarowego łącząc w sobie relatywnie wysoką dokładność i szybkość pomiaru z szerokim wachlarzem zadań pomiarowych, do których można je stosować. Można stwierdzić, że na obecnym etapie rozwoju CMM mierzą w tempie, w jakim odbywa się produkcja [1].

Współrzędnościowa technika pomiarowa charakteryzuje się procedurami pomiarowymi opartymi na wartościach współrzędnych lokalizowanych punktów pomiarowych. Punkty te, są podstawą wyznaczania elementów zastępczych będących figurami geometrycznymi. By wyznaczyć średnicę otworu z matematycznego punktu widzenia wystarczą współrzędne trzech punktów. W metrologii za pomiarową minimalną liczbę punktów przyjmuje się cztery. Im większa liczba zebranych punktów tym większa „pewność” dotycząca uzyskanych wartości. W przypadku okręgu są to promień (średnica), współrzędne położenia środka oraz wartość błędu kształtu.

## 2. Strategia pomiaru okrągłości na CMM

### 2.1. Definiowanie układu współrzędnych

Podstawową procedurą pomiarową we współrzędnościowej technice pomiarowej jest definiowanie układu współrzędnych przedmiotu. Czynności te wykonuje się w celu odebrania wszystkich stopni swobody mierzonej części, a co za tym idzie jednoznacznego zdefiniowania jej położenia w przestrzeni pomiarowej CMM. Możliwości zorientowania elementu jest wiele, w związku, z czym poprawność wyznaczenia układu współrzędnych, a co za tym idzie uzyskania poprawnych wyników, zależy w znacznej mierze od wiedzy osoby wykonującej pomiary.

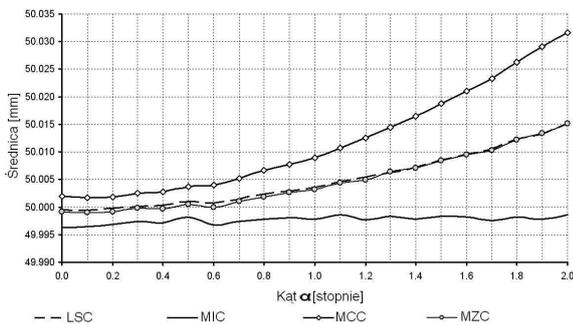


Rys. 1. Przykład niewłaściwego, dla pomiaru odchyłki okrągłości, sposobu wyznaczania układu współrzędnych detalu  
Fig. 1. Example of the inappropriate coordinate system for the roundness measurement with CMM

Oprogramowanie CMM pozwala na stosowanie wielu układów współrzędnych do pomiaru jednej części. Do ogólnej oceny położenia okręgu należy stosować układ współrzędnych elementu. Jednak dla pomiaru jak i oceny odchyłki okrągłości należy wyznaczyć pomocniczy układ współrzędnych. Osł główna takiego układu powinna pokrywać się z osią walca, dla którego wyznaczana jest odchyłka okrągłości. Działanie takie jest zbieżne z pomiarem na urządzeniach specjalizowanych, gdzie przed zastąpieniem do właściwych pomiarów wykonuje się procedurę centrowania i pionowania.

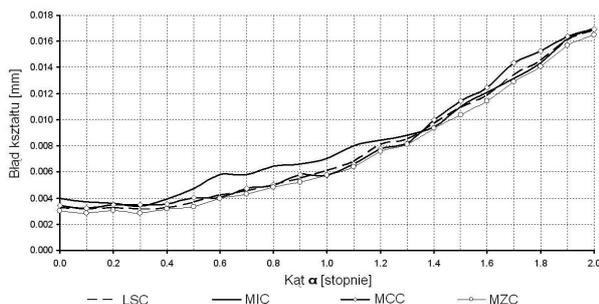
W przypadku, gdy oś walca jest położona pod kątem do baz pomiarowych, a więc do osi układu współrzędnych, pomiar okrągłości będzie odbywał się po elipsie (Rys.1). Może nastąpić

wygaszanie lub wzmacnianie charakterystycznych harmonicznych, a wynikiem pomiaru będzie zniekształcona postać i wartość błędu kształtu oraz średnicy.



Rys. 2. Wpływ kąta  $\alpha$  na średnicę mierzonego okręgu  
Fig. 2. Influence of the  $\alpha$  angle on the measured diameter

Jak przedstawiono na wykresach (Rys. 2 i 3) kąt między osią walca, a osią układu współrzędnych wpływa na wyniki pomiarów. Rezultaty są zależne od charakteru stosowanego elementu odniesienia. W przypadku średnicy, najbardziej zależny od wartości kąta  $\alpha$ , jest minimalny okrąg opisany. Natomiast maksymalny okrąg wpisany nie wykazuje w tym przypadku zależności od kąta  $\alpha$ .



Rys. 3. Wpływ kąta  $\alpha$  na wynik pomiaru błędu kształtu mierzonego okręgu  
Fig. 3. Influence of the  $\alpha$  angle on the results of roundness measurement

Analiza wyników pomiarów pozwoliła na wyznaczenie trendu wspólnego dla wszystkich elementów odniesienia. Pomiarzy prowadzone były na wzorcach o błędach kształtu nie przekraczających 1,8  $\mu\text{m}$ .

## 2.2. Pomiar ciągły, a pomiar impulsowy

W zależności od wyposażenia CMM pomiaru dokonuje się głowicami impulsowymi lub mierzącymi (skanującymi). Głowice skanujące dają możliwość zebranie bardzo dużej liczby punktów pomiarowych w krótkim czasie. Uzyskujemy w ten sposób pełną informację o rzeczywistym kształcie badanego elementu. Wadą tych rozwiązań, w stosunku do głowic impulsowych, jest wyższa cena głowicy oraz sterowania, a także niższa dokładność pomiaru skaningowego.

Dokładność pomiaru definiowana jest przez normę PN-ISO 10360. Pomiar impulsowy charakteryzowany jest przez parametr  $MPE_E$ , a pomiar skaningowy  $MPE_{Tij}$ .

$MPE_E$  – błąd graniczny wskazania CMM podczas pomiaru wymiaru  $[\mu\text{m}]$

$$MPE_E = \pm \left( A + \frac{L}{K} \right) \quad (1)$$

gdzie:

$A$  – stała opisująca udział błędów przypadkowych  $[\mu\text{m}]$

$L$  – mierzona długość  $[\text{mm}]$

$K$  – współczynnik opisujący charakter zmian błędów systematycznych

$MPE_{Tij}$  – błąd graniczny dopuszczalny głowicy pomiarowej skaningowej  $[\mu\text{m}]$ . Wartość błędu  $MPE_{Tij}$  podawana jest w mikrometrach, przy jednoczesnym podaniu czasu, w sekundach, w jakim wartość błędu została uzyskana.

$$MPE_{Tij} \quad (2)$$

gdzie:

$T$  – czas trwania testu skanowania  $[\text{s}]$

$i$  – gęstość punktów ( $H$  = wysoka;  $L$  = niska)

$j$  – definicja toru ruchu ( $P$  = zdefiniowany;  $N$  = niezdefiniowany)

Konstrukcja głowicy warunkuje dokładność detekcji punktów pomiarowych. Najdokładniejsze są głowice skanujące aktywne zapewniające stałą siłę dojazdu końcówki pomiarowej do mierzonej powierzchni lub głowice z ciągłą laserową korekcją położenia końcówki pomiarowej. Jednak nie zależnie od typu maszyny czy głowicy dokładność pomiaru z wykorzystaniem skaningu jest gorsza od pomiaru impulsowego. Przykładowe zestawienie zawarto w tabeli 1.

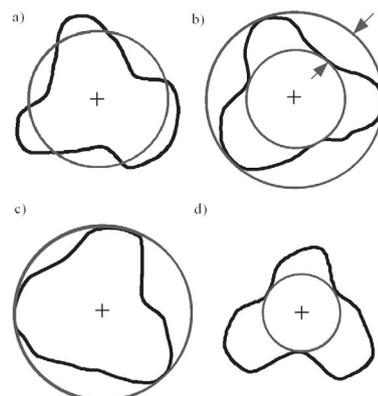
Tab. 1. Zestawienie parametrów  $MPE_E$  i  $MPE_{THP}$  dla różnych CMM

Tab. 1. Parameters  $MPE_E$  and  $MPE_{THP}$  for various CMM

Typ CMM / Głowica	$MPE_E$ $[\mu\text{m}]$	$MPE_{THP}$ $[\mu\text{m/s}]$
Leitz PMM Infinity / LSP-2S	0,3 + L/1000	1,3/59
Leitz PMM-C / LSP-2S	0,6 + L/600	1,5/45
Zeiss Prismo S-ACC / VAST	0,9 + L/350	1,9/50
Wenzel LH / SP25M	1,3 + L/450	1,9/71
DEA Global / LSP-X3	1,5 + L/333	2,5/68
Zeiss Contura G2 direkt / VAST <sub>XT</sub>	1,8 + L/300	3,5/68
Sheffield Endeavor / SP25M	2,5 + L/333	3,0/80

Różnice w dokładności pomiaru impulsowego i skaningowego oraz powszechność stosowania głowic impulsowych skłoniły autora do przeprowadzenia badań nad możliwością zastosowania pomiaru impulsowego do oceny odchyłki okrągłości.

## 2.3. Dobór okręgu odniesienia



Rys. 4. Okręgi odniesienia wg ISO6318: a) okrąg średniokwadratowy LSC, b) okrąg minimalnej strefy MZC, c) najmniejszy okrąg opisany MCC, d) największy okrąg wpisany MIC

Fig. 4. Fitting elements according the standard ISO6318: a) Least Square Circle, b) Minimal Zone Circle, c) Minimal Circumscribed Circle, d) Maximal Inscribed Circle

Zgodnie z normą ISO6318 [4] do oceny zmierzonego okręgu można użyć czterech okręgów odniesienia. Są to: okrąg średniokwadratowy LSC (ang. Least Square Circle), b) okrąg

minimalnej strefy MZC (ang. Minimum Zone Circles), c) najmniejszy okrąg opisany MCC (ang. Minimum Circumscribed Circle), d) największy okrąg wpisany MIC (ang. Maximum Inscribed Circle).

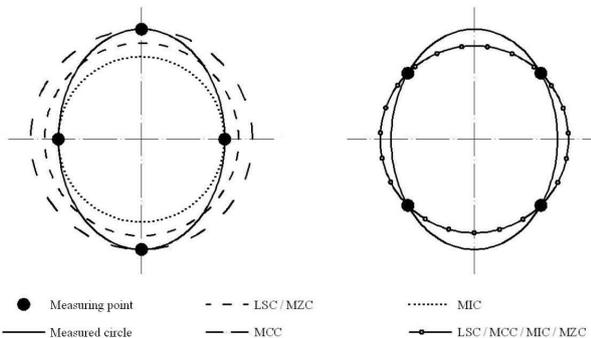
Najczęściej stosowanym elementem odniesienia jest okrąg średniokwadratowy. Można zauważyć, że dla połączeń ruchowych o wąskim polu tolerancji, wynik uzyskany za pomocą okręgu średniokwadratowego może być niewłaściwy. Uzyskany rezultat jest wartością „uśrednioną” rzeczywistego kształtu. Właściwszy opis, z punktu widzenia współpracy elementów, daje maksymalny okrąg wpisany lub minimalny okrąg opisany.

Dla wałków powinno się stosować minimalny okrąg opisany, a dla otworu maksymalny okrąg wpisany. Tak zastosowane elementy odniesienia dają informację o położeniu środka badanego okręgu, a przede wszystkim o rzeczywistej średnicy wpływającej na możliwość połączenia i współpracy badanych elementów. W skrajnych przypadkach zalecane jest równoczesne stosowanie wszystkich trzech wymienionych okręgów odniesienia. W takiej sytuacji zatwierdzenie części jako dobrej następuje wtedy, gdy wszystkie trzy przypadki spełniają zadane parametry

### 3. Dobór liczby punktów pomiarowych

#### 3.1. Minimalna liczba punktów pomiarowych

Z matematycznego punktu widzenia wystarczająca jest znajomość położenia współrzędnych trzech punktów w przestrzeni by wyznaczyć okrąg. W metrologii dla zwiększenia pewności pomiaru przyjęto za wartość minimalną cztery punkty. Prowadzone badania wykazały, że w wielu przypadkach jest to wartość niewystarczająca (rys. 5).



Rys. 5. Wpływ rozmieszczenia punktów pomiarowych i doboru elementu odniesienia na wyniki pomiaru okręgu

Fig. 5. The measurement results dependent on the distribution of points and used fitting element

Mierząc z wykorzystaniem minimalnej liczby punktów pomiarowych występuje znaczne oddalenie punktów pomiarowych od siebie. Ułożenie przedmiotu, rozumiane jako położenie odchyłek kształtu względem układu współrzędnych, jest przypadkowe. Tak więc, również losowa jest detekcja współrzędnych punktów. W przypadku pomiaru 4 punktami okręgu obarczonego błędem kształtu – owalem – można uzyskać znacząco różną wartość. Wpływ na ich wartość ma również zastosowany do oceny element odniesienia (rys. 5) [10].

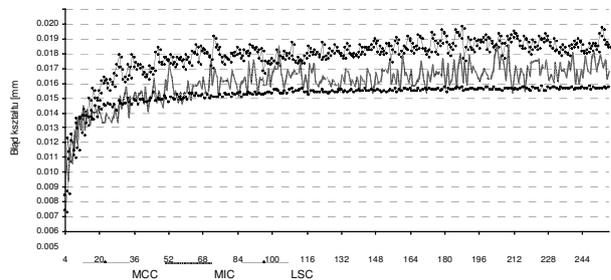
W przypadku, gdy punkty pomiarowe pokrywają się z ekstremami owalu, stosując jako element odniesienia maksymalny okrąg wpisany, można zauważyć jeszcze jeden niekorzystny przypadek. W szczególnym położeniu punktów pomiarowych okrąg wpisany bazuje na 3 punktach pomiarowych. Wpływa to znacząco na wartość współrzędnych położenia środka okręgu, a co ważne nie zależy od średnicy badanego elementu, a jedynie od wartości błędów kształtu.

### 3.2. Impulsowy pomiar okrągłości na CMM

Jak wykazano pomiar okręgu z użyciem minimalnej liczby punktów pomiarowych jest niewłaściwy. Zatem do efektywnego wykorzystania współrzędnościowej maszyny pomiarowej niezbędne jest opracowanie właściwej metodyki pomiarów. Należy m.in. dobrać odpowiednią liczbę punktów pomiarowych w zależności od przeznaczenia i parametrów badanego elementu (tolerancja wykonania, model błędów kształtu). Dobór liczby punktów pomiarowych zapewnia uzyskanie poprawnych wyników, z uwzględnieniem błędów maszyny pomiarowej, przy jak najkrótszym czasie pomiaru (rys. 7). Liczba punktów powinna być uzależniona od średnicy okręgu, modelu błędów kształtu wynikającego m.in. z technologii wykonania oraz od przyjętego elementu odniesienia [7]. W wyniku prowadzonych badań opracowano program do wyznaczania najkorzystniejszej liczby punktów pomiarowych w zależności od parametrów okręgu.

Rys. 6. Okno decyzyjne opracowanego programu

Fig. 6. The window of the worked out program



Rys. 7. Przykładowy rezultat symulacji – wartość błędów kształtu dla różnych elementów odniesienia [7]

Fig. 7. Example of the simulation result – the achieved form deviation for various fitting elements [7]

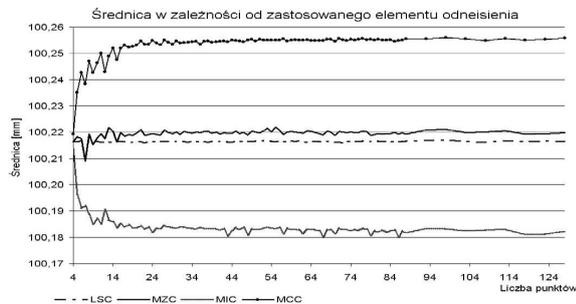
Przeprowadzone badania potwierdzają, że pomiar okręgu przy użyciu minimalnej pomiarowej liczby punktów nie jest właściwy. Równocześnie, w przypadku pomiarów impulsowych, nadmierne zwiększanie liczby punktów pomiarowych nie jest celowe, gdyż: zmiana współrzędnych środka, wartości promienia i błędów okrągłości jest znacząco mniejsza od dokładności współrzędnościowej maszyny pomiarowej.

### 3.3. Wyniki badań laboratoryjnych

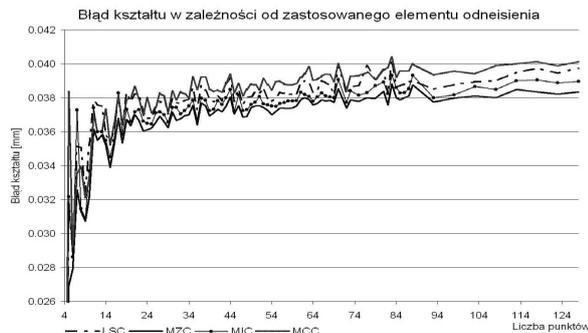
Badania symulacyjne zostały potwierdzone badaniami laboratoryjnymi. Do badań wykorzystano współrzędnościowe maszyny pomiarowe będące na wyposażeniu Zakładu Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej. Są to maszyny: DEA Image Clima 7.7.5 o błędzie  $MPE_E = 1,5 + L/333$  [μm] wyposażona w głowicę skanującą Renishaw SP25M; Wenzel LH54 o  $MPE_E = 2,4 + L/350$  [μm]

wyposażona w głowicę Renishaw TP200 oraz Sheffield Discovery II –  $MPE_E = 5 + L/200$  [μm] wyposażona w głowicę Renishaw TP20.

Badania na maszynach współrzędnościowych w pełni potwierdziły wyniki symulacji (rys. 8 i rys. 9). Dodatkowo w celu potwierdzenia uzyskanych wyników dokonano na maszynie DEA pomiarów skaningowych z różną gęstością próbkowania (od 1 do 100 punktów/mm). Uzyskane wyniki potwierdziły rezultaty uzyskane w pomiarach impulsowych.



Rys. 8 Wpływ liczby punktów pomiarowych na wyznaczenie średnicy przy zastosowaniu różnych elementów odniesienia  
Fig. 8. The influence of measuring points number on radius for different fitting elements



Rys. 9 Wpływ liczby punktów pomiarowych na wyznaczenie wartości błędu kształtu przy zastosowaniu różnych elementów odniesienia  
Fig. 9. The influence of measuring points number on form deviation value for different fitting elements

### 3.4. Zalecenia pomiaru

Do doboru odpowiedniej liczby punktów pomiarowych można zastosować dwa kryteria:

**Kryterium „ $MPE_E$ ”** – wynikające z dokładności maszyny współrzędnościowej. Wyniki pomiaru można uznać za poprawne i równe, jeśli ich wartości zmieniają się na poziomie dokładności urządzenia. W przypadku maszyn pomiarowych jako dokładność przyjmujemy zgodnie z normą ISO 10360 wartość  $MPE_E$ .

**Kryterium „0,1T”** – wynikające z niepewności pomiarowej stosowanego urządzenia. By pomiar był metrologicznie poprawny niepewność urządzenia powinna zawierać się w 10% wielkości pola tolerancji.

Tab. 2. Zalecana liczba punktów pomiarowych dla określonych postaci błędu kształtu

Tab. 2. Recommended number of points for various types of form deviation

Średnica okręgu [mm]	Postać błędu kształtu					
	Owal		Trójgraniastość		Złożenie owal + trójgraniastość	
	$MPE_E$	0,1T	$MPE_E$	0,1T	$MPE_E$	0,1T
Ø10	29	79	28	79	49	104
Ø25	34	59	30	49	59	84
Ø50	35	46	29	44	68	94
Ø100	34	28	39	35	78	70
Ø250	34	30	34	24	82	60
Ø500	36	24	36	29	98	57

## 4. Wnioski

Współrzędnościowe maszyny pomiarowe z ich oprogramowaniem i odpowiednio dobraną metodyką pomiarową mogą w wielu przypadkach zastępować urządzenia specjalizowane. Potwierdzają to prowadzone na Politechnice Poznańskiej badania zarówno w zakresie pomiaru błędów kształtu jak i pomiarów kół zębatych.

Zastosowanie znajdują zarówno głowice mierzące (skaningowe) jak i głowice impulsowe. Pomiar skaningowy pozwala na uzyskanie dużej ilości informacji w relatywnie krótkim czasie. Jednak koszty układu skanującego oraz niższa dokładność powodują, że w wielu przypadkach celowe jest stosowanie pomiaru impulsowego.

Podstawą poprawnego doboru CMM jest spełnienie warunku 0,1T – dokładność maszyny pomiarowej nie powinna przekraczać 10% założonego pola tolerancji wykonania badanego elementu. W przypadkach bardzo dokładnych klas dokładności wykonania warunek ten można rozszerzyć do 20%. W przypadku wąskich pól tolerancji nieodzowne pozostaje nadal wyposażenie laboratorium pomiarowego w specjalizowany przyrząd do pomiaru okrągłości.

Na podstawie analizy wyników badań można stwierdzić, że stosowanie minimalnej metrologicznej liczby punktów pomiarowych (czterech dla okręgu), jest niewystarczające i wywołuje duże rozbieżności uzyskiwanych wyników. Zalecany jest także pomiar w trybie automatycznym, zapewniający równomierne rozłożenie punktów pomiarowych oraz dojazd do mierzonej powierzchni ze stałą siłą, zgodnie z wektorem normalnym w punkcie pomiarowym.

Do oceny elementów pod kątem ich współpracy właściwe jest stosowanie dla wałków minimalnego okręgu opisanego MCC, a dla otworów maksymalnego okręgu wpisanego MIC.

## 5. Literatura

- [1] Ratajczyk E.: *Współrzędnościowa technika pomiarowa*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005
- [2] Adamczak S.: *Odniesieniowe metody pomiaru zarysu okrągłości części maszyn*, Kielce, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 1998.
- [3] Adamczak S., Janusiewicz A., Zybala Z.: "Experimental comparison of shape profiles measured with CMM". V<sup>th</sup> International Scientific Conference: Coordinate Measuring Technique. Bielsko-Biala 2002, pp.17-22.
- [4] ISO 6318: *Pomiar okrągłości. Terminy, definicje i parametry okrągłości*.
- [5] Nuemann H. J.: *Präzisionsmesstechnik in der Fertigung mit Koordinatenmessgeräten*, Renningen, ISBN 3-8169-2211-2, 2004.
- [6] Humienny Z. (praca zbiorowa): *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – podręcznik europejski*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2004.
- [7] Chajda J., Gapiński B.: *Some Aspects of the Roundness Measurement with CMM*, Zeszyty naukowe ATH w Bielsku-Białej Budowa i Eksploatacja Maszyn, Zeszyt Nr 22, ISSN 1644-0269, s. 27-35.
- [8] Hemdt A.: *Mathematische Grundlagen der Koordinatenmesstechnik*. VDI-Bildungswerk, Achen.
- [9] Weckennmann A., Eitzert H., Garmer M., Weber H.: "Functionality-oriented evaluation and sampling strategy in coordinate metrology". Precision Engineering 17/4, 1995, pp.244-252.
- [10] Gapiński B.: *Application of the Coordinate Measuring Technique for Roundness Measurement*, Development of Mechanical Engineering as a Tool for the Enterprise Logistics Progress - SCIENCE REPORT – Project CII-PL-0033-01-0506; Poznan, Poland 2006; s. 257-266.

Prace badawcze prowadzone w ramach grantu promotorskiego nr KBN-22/0570/T02/2006/30 „Dokładność wyznaczania odchyłki okrągłości jako funkcja modelu błędu kształtu, elementu odniesienia i liczby punktów pomiarowych”. Promotor: Prof. dr inż. Jan CHAJDA

Artykuł recenzowany