

# **WYZNACZENIE MINIMALNEJ LICZBY PUNKTÓW POMIAROWYCH W OKREŚLANIU PŁASKOŚCI POWIERZCHNI Z ZASTOSOWANIEM WSPÓLRZĘDNOŚCIOWYCH TECHNIK POMIAROWYCH**

Tomasz BARTKOWIAK<sup>1</sup>, Andrzej GESSNER<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

Współczesny przemysł stawia wysokie wymagania dotyczące dokładności wymiarowo-kształtowej, właściwości materiałowych oraz jakości powierzchni. Istnieje wiele parametrów charakteryzujących przedmiot, z których płaskość odgrywa znaczącą rolę zwłaszcza w kontekście jakości procesu montażu i współpracy elementów [8,9]. Współcześnie, procedury CAI (ang. Computer Aided Inspection) zyskują na coraz to większym znaczeniu w kontroli jakości, wspomagając prawidłową ocenę wyprodukowanych przedmiotów. W ostatnich latach współrzędnościowa technika pomiarowa, zdolna do automatycznego pomiaru z relatywnie niską niepewnością pomiarową, stała się popularna w przemyśle do pomiarów on-line i off-line komponentów. Dane uzyskane w wyniku takich pomiarów muszą jednak zostać poddane dodatkowej obróbce i analizie, aby móc ocenić zgodność danego obiektu z jego specyfikacją techniczną. Producenci maszyn pomiarowych wykorzystują własne algorytmy do analizy chmury punktów pomiarowych i zwykle nie udostępniają ich, traktując je jako tajemnicę handlową. W literaturze [7,10,12] przedstawiono przykłady zastosowania współrzędnościowych technik pomiarowych do wyznaczania płaskości powierzchni.

Normy ASME Y14.5 – 2009 oraz ISO 12781 Płaskość [16,17] definiują sposób określania płaskości przez odniesienie do idealnego odpowiednika geometrii komponentu. Wyszczególnia się w normie ISO, że powierzchnia idealna jest uzyskana na podstawie wyników rzeczywistych pomiarów w taki sposób, że odchyłka pomiędzy nią a rzeczywistą powierzchnią jest jak najmniejsza. W praktyce wykorzystuje się dwie

---

<sup>1</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, ul. Piotrowo3,60-965 Poznań

metody określania powierzchni referencyjnej [15]. Najbardziej znaną jest metoda najmniejszych kwadratów (ang. Least Square Plane), która pozwala na określenie parametrów powierzchni referencyjnej poprzez znalezienie minimum funkcji stanowiącej sumę kwadratów odległości pomiędzy punktami pomiarowymi, a płaszczyzną teoretyczną. Metoda ta w wielu przypadkach nie pozwala na znalezienie powierzchni w taki sposób, aby odległość pomiędzy płaszczyznami równoległymi do niej, pomiędzy którymi znajdują się wszystkie punkty powierzchni rzeczywistej, była jak najmniejsza. Dlatego w ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania problemem znalezienia powierzchni strefy minimalnej (ang. Minimal Zone Plane). Do rozwiązania tego problemu wykorzystuje się metodę Monte Carlo [6] lub metody programowania liniowego [2]. Shunmugam [11] przedstawił nowe podejście – tzw. metodę median, która pozwala na otrzymanie minimalnej wartości błędu. Wykorzystując aproksymację za pomocą wielomianów Czebyszewa, Shunmugam i Danish [3] opracowali skuteczną metodę znalezienia strefy minimalnej. W ostatnich latach, ze względu na popularność metod meta-heurystycznych, coraz częściej pojawiają się publikacje dotyczące optymalizacji przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego [4,14].

Przy określaniu parametru płaskości istotna jest liczba punktów pomiarowych, które reprezentują mierzoną powierzchnię. Optymalna liczba punktów pomiarowych pozwala na skrócenie czasu pomiaru, a co za tym idzie zmniejszenie kosztu całej operacji, oraz na dokładne oszacowanie wartości badanego parametru. Minimalna liczba punktów pomiarowych zależy będzie także od procesu kształtującego topografię powierzchni oraz od metody jej analizy [1]. Zaobserwowano, że przy liczbie punktów większej niż 50 błąd oszacowania stabilizuje się [10]. Podobne obserwacje pojawiają się dla pomiaru średnicy [15]. W praktyce stara się jednakże zebrać jak najwięcej danych pomiarowych, tak aby jak najpewniej oszacować błędy powierzchni. Ustalenie metodyki pomiaru zwłaszcza dla mało stabilnych jakościowo procesów wytwarzania jest bardzo trudne, ze względu na duży rozrzut wyników. W literaturze [5, 13] spotyka się metodę Hammersleya wykorzystywaną przy określaniu współrzędnych punktów pomiarowych. Metoda ta zakłada, że znana jest liczba punktów pomiarowych. Brak jest w literaturze ujęcia problemu minimalnej liczby punktów pomiarowych w sposób statystyczny. Autorzy tego artykułu przedstawiają opis tego problemu przy wykorzystaniu statystyki pozycyjnej.

## 2. PŁASKOŚĆ

### 2.1. MODEL MATEMATYCZNY

Zakłada się, że dla każdego punktu  $P(x,y,z)$  znajdującego się na płaszczyźnie  $\pi$  współrzędna  $z$  jest zależna od pozostałych  $x$  oraz  $y$ . Mając zbiór  $n$  punktów rzeczywistych otrzymanych na podstawie pomiaru współrzędnościowego, należy znaleźć parametry opisujących płaszczyznę. W metodzie najmniejszych kwadratów poszukuje się takich wartości  $a$ ,  $b$  i  $c$ , aby płaszczyzna dana równaniem

$$z = ax + by + c \quad (1)$$

jak najlepiej oddawała powierzchnię rzeczywistą, co rozumie się w takim sensie, że suma kwadratów różnic pomiędzy rzeczywistą wartością współrzędnej  $z_i$ , a wartością  $z=ax_i+by_i+c$  była jak najmniejsza.

Niech  $E(a,b,c)$  oznacza zależność:

$$E(a,b,c) = \sum_{i=1}^n [(ax_i + by_i + c) - z_i]^2. \quad (2)$$

Funkcja ta przyjmuje zawsze wartości dodatnie, a jej wykres ma postać hiperparaboloidy, która osiąga ekstremum, kiedy jej gradient jest wektorem zerowym

$$\nabla E = (0,0,0) = 2 \sum_{i=1}^n [(ax_i + by_i + c) - z_i]^2 (x_i, y_i, 1). \quad (3)$$

Całość sprowadza się więc do układu trzech równań liniowych, które można zapisać w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Rozwiązaniem układu równań jest trójka liczb  $(a,b,c)$ , która stanowi współczynniki stojące przy równaniu (1).

Płaskość definiuje się poprzez odległość punktów ekstremalnych (minimalnego i maksymalnego od powierzchni referencyjnej). Odległość punktu od płaszczyzny danej równaniem (1) wyraża się następująco

$$d_i = \frac{z_i - ax_i - by_i - c}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}. \quad (5)$$

Zatem płaskość dana będzie wzorem:

$$f = d_{max} - d_{min} = \frac{z_{max} - ax_{max} - by_{max} - c}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} - \frac{z_{min} - ax_{min} - by_{min} - c}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}, \quad (6)$$

gdzie  $P_{max}(x_{max}, y_{max}, z_{max})$  oraz  $P_{min}(x_{min}, y_{min}, z_{min})$  są punktami ekstremalnymi, tzn. leżącymi najdalej od powierzchni teoretycznej, znajdującymi się odpowiednio nad

i pod powierzchnią.

Płaszczyzna teoretyczna wyznaczona metodą najmniejszych kwadratów może nie być najbardziej optymalną płaszczyzną ze względu na wyznaczenie płaskości powierzchni, ponieważ mogą istnieć dwie płaszczyzny równoległe do siebie, wewnątrz których znajdują się wszystkie punkty powierzchni, których minimalna odległość między nimi będzie mniejsza niż w przypadku dwóch płaszczyzn równoległych do płaszczyzny wyznaczonej metodą najmniejszych kwadratów spełniających ten sam warunek. Dlatego też wielu badaczy sugeruje korzystanie z innych metod wyznaczania płaszczyzny teoretycznej na podstawie punktów pomiarowych. Poszukuje się zatem takiej trójki parametrów  $(a,b,c)$ , aby wartość funkcji reprezentującej odległość względem rozpatrywanych płaszczyzn osiągnęła minimum, co można zapisać:

$$\begin{aligned} f &= \min(\max(d_i) + \max(d_i)) = \\ &= \min\left(\max\left(\frac{z_i - ax_i - by_i - c}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}\right) + \min\left(\frac{z_i - ax_i - by_i - c}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}\right)\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Do najczęściej stosowanych metod rozwiązania tego zagadnienia zalicza się metody niedeterministyczne takie jak Monte Carlo czy algorytmy genetyczne.

## 2.1. STATYSTYKA POZYCYJNA

Istotnym z punktu widzenia wyznaczenia płaskości, bez względu na metodę wyznaczenia płaszczyzny referencyjnej, jest znalezienie punktów ekstremalnych, tj. najdalej położonych od tej płaszczyzny, leżących odpowiednio nad i pod tą płaszczyzną. Przy znacznej liczbie punktów pomiarowych (co jest częste zwłaszcza przy pomiarach skaningowych), wpływ pojedynczego punktu na wartość parametrów  $(a,b,c)$  jest mało istotny, stąd można rozpatrywać zagadnienie punktów ekstremalnych niezależnie. Do opisanego w sposób statystyczny problemu znalezienia punktów ekstremalnych wykorzystano statystykę pozycyjną.

Zgodnie z przyjętymi wyżej założeniami, punkty tworzące powierzchnie rzeczywistą są oddalone o odległość  $d_i$  od płaszczyzny referencyjnej. Tę sytuację można rozpatrywać tak jak  $n$ -elementową próbę losową.

Niech  $Y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) oznacza odległość  $i$ -tego punktu od płaszczyzny (zmienną losową typu ciągłego). Wszystkie zmienne  $Y_i$  mają jednakowy rozkład. Przyjmując dla dużych prób losowych, że są one określone rozkładem normalnym z gęstości:

$$g(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y - d_m)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (8)$$

gdzie:



$d_m$  – wartość średnia odległości,

$\sigma$  – odchylenie standardowe zmiennej  $Y_i$ .

Zmienne losowe  $Y_i$  tworzą  $z$ -wymiarowy wektor losowy:

$$Y_i = (Y_1, Y_2, \dots, Y_z). \quad (9)$$

Zaobserwowane wartości podziałki dla  $z$  zębów stanowią próbę losową:

$$y_i = (y_1, y_2, \dots, y_z). \quad (10)$$

Standaryzowane zmienne losowe  $X_i$  mają postać:

$$X_i = \frac{Y_i - d_{sr}}{\sigma}. \quad (11)$$

Zmienne  $X_i$  mają rozkład normalny  $N(0, 1)$  o gęstości:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right). \quad (12)$$

Wektorowi losowemu (4) odpowiada wektor losowy standaryzowanych zmiennych:

$$X_i = (X_1, X_2, \dots, X_z). \quad (13)$$

oraz następująca próba:

$$x_i = (x_1, x_2, \dots, x_z). \quad (14)$$

Istotne znaczenie dla określenia płaskości mają maksymalne i minimalne wartości odległości  $d_{\max}$  i  $d_{\min}$  spośród  $n$  zaobserwowanych ich wartości. Jeżeli w każdej próbie losowej (14) uporządkuje się jej elementy  $x_i$  niemalejąco, to uzyska się nowy ciąg w postaci:

$$(x_{r_1}, x_{r_2}, \dots, x_{r_z}), \quad (15)$$

spełniający nierówności:

$$(x_{r_1} \leq x_{r_2} \leq \dots \leq x_{r_m}). \quad (16)$$

Gdy dysponuje się  $N$  próbami w postaci (14), których elementy uporządkuje się niemalejąco, otrzyma się  $z$  nowych statystyk  $\xi_k^{(n)}$  dla  $k=1, 2, \dots, z$  zwanych dalej statystykami pozycyjnymi. Na przykład statystykę  $\xi_1^{(n)}$  będą tworzyć najmniejsze wartości każdej próby losowej (14).

Zgodnie z wprowadzonym pojęciem płaskości, istotna będzie maksymalna

i minimalna wartość odległości w każdej próbie. Wyznaczenie płaskości będzie polegać na określeniu maksymalnej i minimalnej wartości prób (14), czyli rozkładu statystyki  $\xi_n^{(n)}$  oraz  $\xi_1^{(n)}$  określonych dystrybuantami:

$$\Phi(w) = P(\xi_n^{(n)} < w) \quad (17)$$

oraz

$$\Phi(w) = P(\xi_1^{(n)} > w) \quad (18)$$

przy czym P jest prawdopodobieństwem zdarzenia  $\xi_n^{(n)} < w$ , oznaczającego, że w ciągu  $n$  obserwacji ostatnia czyli maksymalna wartość odległości jest mniejsza od pewnej wartości  $w$ . Rozpatrując tylko dla wartości maksymalnej, skoro maksymalna wartość spełnia tę zależność, to znaczy, że wszystkie obserwacje z próby są mniejsze od  $w$ . Dla ustalonego  $w$  prawdopodobieństwo P można wyznaczyć, korzystając ze schematu Bernoullego:

$$\Phi(w) = P(\xi_n^{(n)} < w) = \binom{n}{n} p^n, \quad (19)$$

gdzie  $p$  jest prawdopodobieństwem, że zmienna losowa  $X_r$  przyjmuje wartość mniejszą niż  $w$ . Zgodnie z założeniem o rozkładzie standaryzowanej zmiennej  $X_r$ , prawdopodobieństwo to można przedstawić jako

$$p = P(X_r < w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^w \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx. \quad (20)$$

Po uwzględnieniu we wzorze (19) równania (20) otrzymano następującą postać funkcji gęstości dystrybuanty  $\varphi(w)$ :

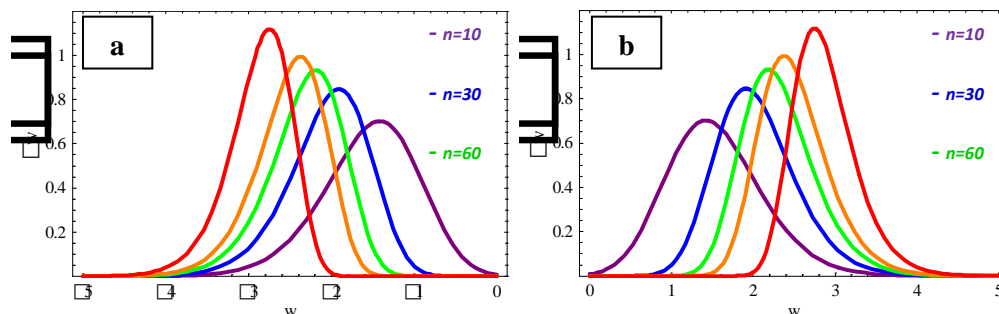
$$\varphi_{max}(w) = \frac{n}{(\sqrt{2\pi})^n} \left[ \left( \int_{-\infty}^w \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \right)^{n-1} \cdot \exp\left(-\frac{w^2}{2}\right) \right]. \quad (21)$$

Rozpatrując wartość minimalną i postępując analogicznie jak dla wartości maksymalnej uzyskuje się funkcję gęstości prawdopodobieństwa daną równaniem:

$$\varphi_{min}(w) = \frac{n}{(\sqrt{2\pi})^n} \left[ \left( \int_w^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \right)^{n-1} \cdot \exp\left(-\frac{w^2}{2}\right) \right] \quad (22)$$

Analogiczne rozważania można przeprowadzić dla innych znanych rozkładów ciągłych opisujących rozkład odległości punktów od płaszczyzny referencyjnej.

Wykresy zależności (21) oraz (22) przedstawiono na rysunkach 1 (a) oraz (b).



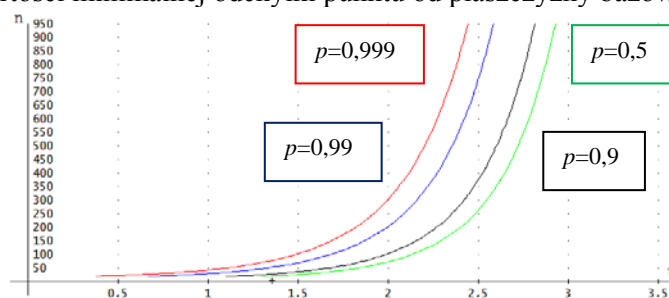
Rys. 1. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa dla wartości minimalnej (a) oraz maksymalnej (b) odległości punktu od powierzchni dla różnej liczby punktów pomiarowych

## 2.1. MINIMALNA LICZBA PUNKTÓW POMIAROWYCH

W przypadku określenia minimalnej liczby pomiarów dla współczynnika problem sprowadza się do określenia, dla jakiego  $n$  można powiedzieć, że z danym prawdopodobieństwem  $p$ , uda się znaleźć wartość maksymalną  $d_{max}$  oraz wartość minimalną  $d_{min}$  odchyłki punktu od płaszczyzny bazowej. Jeżeli rozkład odległości punktów od płaszczyzny bazowej jest dany zależnością (21) to można zapisać, że

$$\Phi(w) = \int_{-\infty}^{d_{max}} \frac{n}{(\sqrt{2\pi})^n} \left[ \left( \int_{-\infty}^w \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \right)^{n-1} \cdot \exp\left(-\frac{w^2}{2}\right) \right] dw \geq 1 - p. \quad (23)$$

Wykres tej zależności w postaci równości  $f(d_{max}, n) = 0$  dla różnych wartości prawdopodobieństwa przedstawiono na rysunku 2, gdzie symbolem  $u$  oznaczono krotność odchylenia standardowego rozkładu normalnego (20). Identyczną zależność otrzyma się w przypadku określenia minimalnej liczby punktów pomiarowych do określenia wartości minimalnej odchyłki punktu od płaszczyzny bazowej.



Rys. 2. Minimalna liczba punktów pomiarowych konieczna do uzyskania z danym prawdopodobieństwem odchyłki maksymalnej punktu od płaszczyzny bazowej w funkcji odchylenia standardowego rozkładu normalnego odchyłek punktów pomiarowych od powierzchni teoretycznej

### 3. POMIAR I ANALIZA WYNIKÓW

W wyniku pomiarów stykowych jak i bezdotykowych powierzchni otrzymuje się chmurę punktów, na podstawie której wyznacza się wielkości charakteryzujące daną powierzchnię bazową. Intuicja podpowiada, że im więcej punktów pomiarowych, tym powierzchnia bazowa będzie wyznaczona w sposób dokładniejszy. Jednakże wprowadzenie kolejnego punktu pomiarowego wymaga:

- w przypadku analizy fotogrametrycznej naklejenia dodatkowego markera w tym punkcie,
- w przypadku skanowania, zwiększenia rozdzielczości skanowania, co powoduje zmniejszenie możliwego skanowanego obszaru,
- w przypadku pomiaru stykowego na maszynie współrzędnościowej, fizycznego dotknięcia końcówki pomiarowej w tym punkcie.

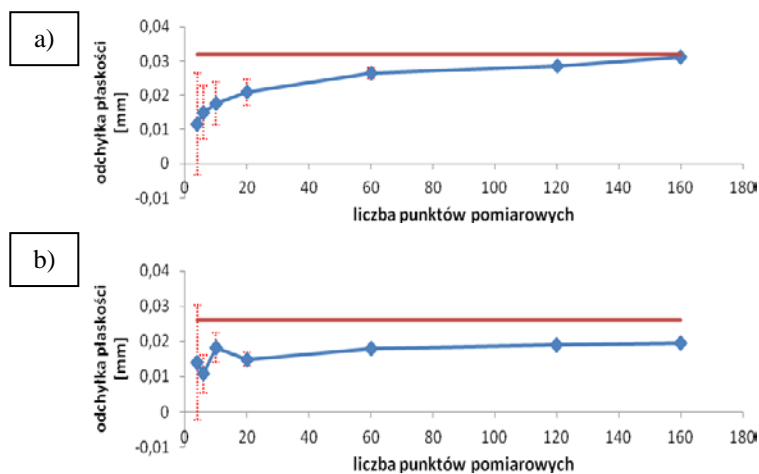
We wszystkich z powyższych metod wprowadzenie nowego punktu pomiarowego wiąże się ze stratą czasową, a w przypadku fotogrametrii również ze zużyciem relatywnie drogiego markera. W związku z tym istnieje potrzeba określenia, ile rzeczywiście powinno być punktów pomiarowych, aby informacja o ich położeniu w przestrzeni w sposób akceptowalnie dokładny określiła charakter płaszczyzny bazowej.

Aby sprawdzić w jaki sposób liczba punktów pomiarowych wpływa na dokładność określenia charakteru płaszczyzny bazowej wykonano analizę fotogrametryczną odchyłki płaskości dwóch stołów z rowkami teowymi, montowanymi na obrabiarkach firmy DMG. Dokumentacja techniczna wymaga, aby stół charakteryzował się odchyłką płaskości nie większą niż 0,01 mm. Na powierzchnię górną każdego ze stołu naklejono markery (rys. 3), a na następnie dokonano pomiarów za pomocą systemu TRITOP<sup>CMM</sup>.



Rys. 3. Pomiary fotogrametryczne odchyłki płaskości powierzchni górnej stołów z rowkami teowymi

Na stół 1 naklejono 221, natomiast na stół 2 216 znaczników. Następnie obliczono odchyłkę płaskości dla każdego ze stołu na podstawie wszystkich punktów, traktując wynik jak rzeczywisty. Następnie losowano bez powtórzeń 30 razy po 4, 6, 10, 20, 60 i 120 punktów spośród wszystkich możliwych i na tej podstawie obliczono średni błąd płaskości dla 30 prób. Otrzymane wyniki w formie wykresu zaprezentowano na rysunku 4 (a) i (b).



Rys. 4. Średnia wartość odchyłki płaskości powierzchni górnej stołu 1 (a) oraz stołu 2 (b) dla 30 prób w funkcji liczby punktów pomiarowych

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że wraz ze wzrostem liczby punktów pomiarowych wzrasta wartość średniej odchyłki płaskości. Im większa liczba punktów tym wartość średnia zbliża się do wartości, którą uznaje się za rzeczywistą. Ponadto, niepewność wyniku rozumiana jako szerokość przedziału ufności dla wartości średniej przy  $\alpha=0,99$  dla małej liczby punktów pomiarowych jest na tyle znacząca, że górna granica tego przedziału jest bliska wartości rzeczywistej natomiast wartość średnia jest około 3-krotnie niższa. Warto zauważyć, że zgodnie z przewidywaniami modelu, wraz ze wzrostem liczby punktów maleje szerokość przedziału ufności.

#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono analizę modelu statystycznego charakterystyk powierzchni pod kątem określenia minimalnej liczby punktów pomiarowych, na podstawie których określa się płaskość badanej powierzchni. Przy powtarzalnych procesach technologicznych znany jest przybliżony rozkład odległości punktów pomiarowych od powierzchni zastępczej (wyznaczonej dowolną metodą). Na podstawie znajomości tego rozkładu wyznacza się statystykę opisującą maksymalną oraz minimalną odchyłkę punktu. Do określenia minimalnej liczby punktów pomiarowych istotnym jest znajomość przybliżonego rozrzutu odchyłek punktów danej powierzchni oraz określenie z jakim prawdopodobieństwem ma się uzyskać wynik. Wyznaczenie minimalnej liczby punktów pomiarowych pozwala na redukcję kosztu oraz czasu przeznaczanego na pomiar przy zachowaniu żądanej niepewności pomiaru.

Badania zostały sfinansowane przez NCBiR w ramach projektu LIDER/07/76/L-3/11/NCBR/2012

#### LITERATURA

- [1] BADAR M.A., RAMAN S., PULAT P.S., *Intelligent search-based selection of sample points for straightness and flatness estimation*. W: Journal of Manufacturing Science and Engineering, 125, 2003, 263–271.
- [2] CHETWYND D.G., *Applications of linear programming to engineering metrology*. W: Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, 199 (B2), 1985, 93–100.
- [3] DANISH P.B., SHUNMUGAM M.S., *An algorithm for form error evaluation using the theory of discrete and linear Chebyshev approximations*. W: Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 92, 1991, 309–324.
- [4] DONG-XIA Wang, XIU-LAN W., FENG-LIN W., *A Differential Evolutionary Algorithm for Flatness Error Evaluation*. W: AASRI Procedia, 1, 2012, 238–243.
- [5] LEE G., MOU J., SHEN Y., *Sampling strategy design for dimensional measurement of geometric features using coordinate measuring machine*. W: International Journal of Machine Tools & Manufacture 37, 1997, 917–934.
- [6] MURTHY T.S.R., ABDIN S.Z., *Minimum zone evaluation of surfaces*. W: International Journal of Machine tool Design and Research, 20, 1980, 123–136.
- [7] PEDONE P., ROMANO D., *Designing small samples for form error estimation with coordinate measuring machine.*, W: Precision Engineering, 35(2), 2011, 262-270.
- [8] PYTLAK B., *The roughness parameters 2D and 3D and some characteristics of the machined surface topography after hard turning and grinding of hardened 18CrMo4 steel*. W: Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, 31 (4), 2011, 49–58.
- [9] PYTLAK B., *Struktura geometryczna powierzchni stali 18CrMo4 w stanie zahartowanym po toczeniu z posuwem wglębnym*. W: Advances in Manufacturing Science and Technology, 38 (1), 2014, 53–62.
- [10] RAGHUNANDAN R., VENKATESWARA RAO P., *Selection of sampling points for accurate evaluation of flatness error using coordinate measuring machine*. W: Journal of Materials Processing Technology, 202, 2008, 240–245.
- [11] SHUNMUGAM M.S. *On assessment of geometric errors*. W: International Journal of Production Research, 24(2), 1986, 413–425.
- [12] WEON-SEOK K., SHIVAKUMAR R., *On the selection of flatness measurement points in coordinate measuring machine inspection*. W: International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40(3), 2000, 427-443.
- [13] WOO T.C., LIAND R., *Dimensional measurement of surfaces and their sampling*. W: Computer Aided Design, 25 (4), 1993, 233–239.
- [14] XIU-LAN W., XIAO-CHUN Z., YI-BING Z., DONG-XIA W., FENG-LIN W., *Flatness error evaluation and verification based on new generation geometrical product specification (GPS)*. W: Precision Engineering, 36, 2012, 70– 76.
- [15] ZHANG Y.F., NEE A.Y.C., FUH J.Y.H., NEO K.S., LOY H.K., *A neural network approach to determining optimal inspection sampling size for CMM*. W: Computer Integrated Manufacturing Systems, 9, 1996, 161–169.
- [16] ANSI Standard Y14.5-2009. Dimensioning and tolerancing.
- [17] ISO/TS 12781-2:2003.

# **POMIARY WIELKOŚCI GEOMETRYCZNYCH MODELI KSZTAŁTOWANYCH PRZYROSTOWO Z ZASTOSOWANIEM SKANERA 3D**

Stanisław ADAMCZAK<sup>1</sup>, Sławomir BŁASIAK<sup>1</sup>, Jerzy BOCHNIA<sup>1</sup>

## 1. WSTĘP

Problem skanowania obiektów technicznych znany był od dawna, gdy jeszcze nie stosowano nowoczesnych technik wspomaganie komputerowego. Za pomocą konwencjonalnych metod pomiarowych otrzymywano dane, które pozwalały wykonać dokumentację wykonawczą obiektu. Dopiero wprowadzenie współrzędnościowych maszyn pomiarowych pozwalało na zbieranie dużej ilości danych 3D umożliwiających odtworzenie z określoną dokładnością kształtu obiektu. Dużym krokiem w rozwoju technik skanowania jest pojawienie się skanerów laserowych i optycznych [1, 2] zbierających odpowiednią chmurę punktów oraz oprogramowania 3D do obróbki otrzymanych danych pomiarowych i utworzenia wirtualnego modelu obiektu. Współczesne skanery optyczne rejestrują do dwóch milionów punktów w trakcie pojedynczego pomiaru trwającego około jednej sekundy. Przy odpowiedniej obróbce danych możliwa jest pełna analiza pomiaru tj. wymiarowanie obiektu, porównanie z danymi CAD, sporządzenie mapy odchyłek, dokonanie inspekcji przekrojów. Stąd coraz większe zastosowanie optycznych skanerów w różnych dziedzinach gospodarki zwłaszcza w przemyśle np. do oceny jakości wyrobów poprzez porównanie z dokumentacją CAD, oceny zużycia elementów po różnych okresach eksploatacji a także ich naprawy wirtualnej i tworzenie ścieżek pracy narzędzi w programach maszyn CNC [3], w inżynierii odwrotnej do projektowania przedmiotu na podstawie uzyskanej chmury punktów oraz w pomiarach [4].

---

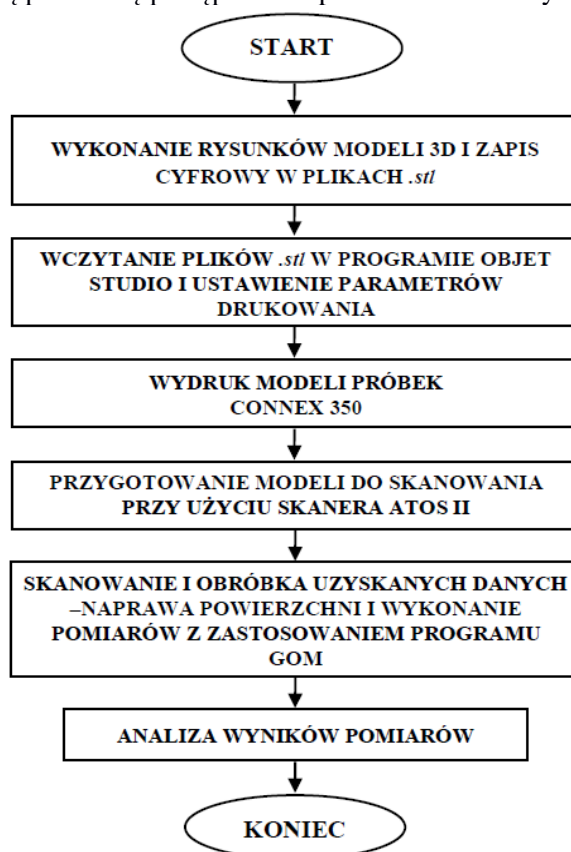
<sup>1</sup> Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, al. 1000-lecia P. P. 7, 25-314 Kielce, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii ([adamczak@tu.kielce.pl](mailto:adamczak@tu.kielce.pl))

Przykładowo w pracy [5] opisano proces optycznego skanowania 3D, inżynierii odwrotnej i szybkiego prototypowania historycznego samochodu Ferrari 250 Mille Miglia z 1953 r. Proces objął akwizycję i wyrównanie chmury punktów, tworzenie plików STL i wygenerowanie repliki pojazdu. Na uwagę zasługuje fakt, że proces ten wykonano z dokładnością odchyłek  $+0,157$  mm i  $-0,363$  mm.

Możliwości wszechstronnego zastosowania skanerów zainspirowały autorów do zastosowania skanera 3D do pomiarów wielkości geometrycznych modeli bryłowych zawierających powierzchnie walcowe zewnętrzne i wewnętrzne, jako pewien problem opisywany pomiarowy opisany w pracy [6]. Modele kształtowane przyrostowo przyrostową PolyJet z żywicy fotoutwardzalnej w dwóch różnych ustawieniach na platformie roboczej maszyny drukującej.

## 2. OPIS ZASTOSOWANYCH MATERIAŁÓW, URZĄDZEŃ I PROCEDUR

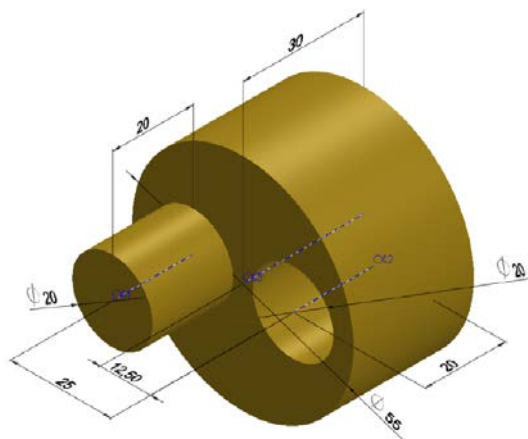
Przeprowadzoną procedurę postępowania przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Procedura wykonania i pomiarów modeli bryłowych.



Model walców 3D zaprojektowano w programie Solid Works w taki sposób, aby na powierzchni czołowej walca umieścić poprzez wyciągnięcie mniejszy walec oraz o takich samych wymiarach obok niego walec poprzez wycięcie tak, aby powstała wewnętrzna powierzchnia walcowa. Model walców 3D przedstawiono na rysunku 2.

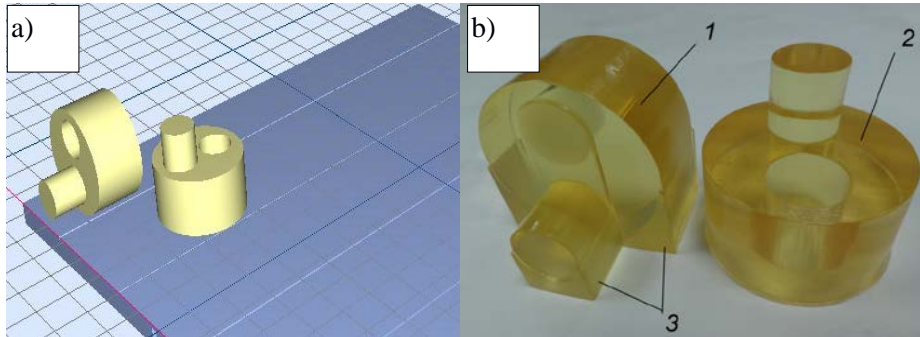


Rys. 2. Model powierzchni walcowych 3D.

Model walca zapisano w pliku cyfrowym z rozszerzeniem *.stl* stosując parametry triangulacji w opcjach eksportu: rozdzielczość – dostosowana, odchylenie – tolerancja 0,01 mm, kąt – tolerancja  $1^{\circ}$ . Trzeba pamiętać, aby nie stosować zbyt małych wartości parametrów triangulacji gdyż nie otrzyma się okrągłych kształtów elementów, ani też zbyt wysokich z uwagi na dużą pojemność plików (*\*.stl*). Następnie używając programu Objet Studio umieszczono (wirtualnie) model walca 3D na platformie roboczej maszyny Connex350 w pozycji pionowej oraz jego kopię w pozycji poziomej, zadając tryb Glossy w celu uzyskania gładkiej powierzchni. Rozmieszczone wirtualnie na platformie roboczej modele walców 3D w programie Objet Studio po komendzie „automatic displacement” przedstawia rysunek 3a.

Rozmieszczenie pionowe i poziome modeli ma na celu sprawdzenie wpływu kierunku nanoszenia poszczególnych warstw na geometrię bryły a ściślej na odchyłki od wymiarów nominalnych. Modele bryłowe wykonano z żywicy fotoutwardzalnej FullCure 720 technologią PolyJet (<http://objet.com/3d-printing-materials>), z zastosowaniem drukarki Connex350 firmy Objet. Wykonane i wyjęte z maszyny modele przedstawiono na rysunku 3b.

Wykonane modele po wyjęciu z maszyny zostały oczyszczone z materiału podporowego i przygotowane do pomiarów wielkości geometrycznych za pomocą skanera optycznego Atos II wyposażonego w oprogramowanie firmy GOM Inspect pozwalające na pełne zwymiarowanie zeskanowanego obiektu. Z uwagi na to, że model wykonano z przezroczystej żywicy o błyszczącej powierzchni bezpośrednio przed skanowaniem obiekt pokryty został matową warstwą antyrefleksyjną.

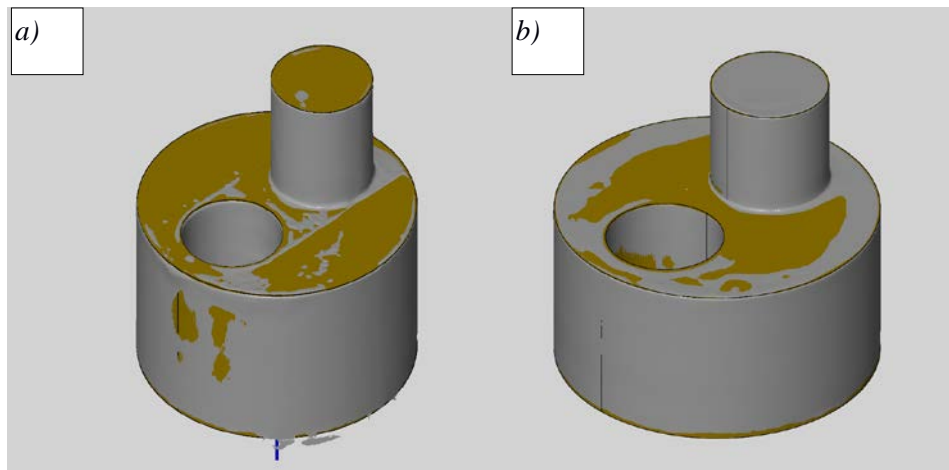


Rys. 3. a) Modele walców 3D rozmieszczone wirtualnie na platformie roboczej maszyny Connex 350 w programie Objet Studio. b) Wykonane modele bryłowe, 1 – model wydrukowany w pozycji poziomej, 2 – model wydrukowany w pozycji pionowej, 3 – materiał podporowy.

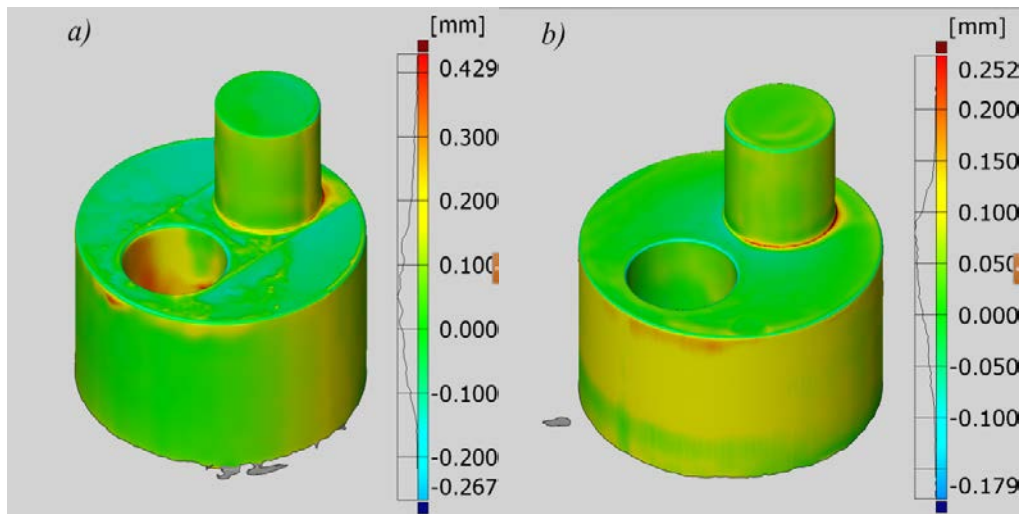
### 3. OTRZYMANE WYNIKI POMIARÓW I ICH ANALIZA

Wyniki skanowania oraz poszczególnych etapów obróbki przedstawiono na rysunkach od 4 do 10.

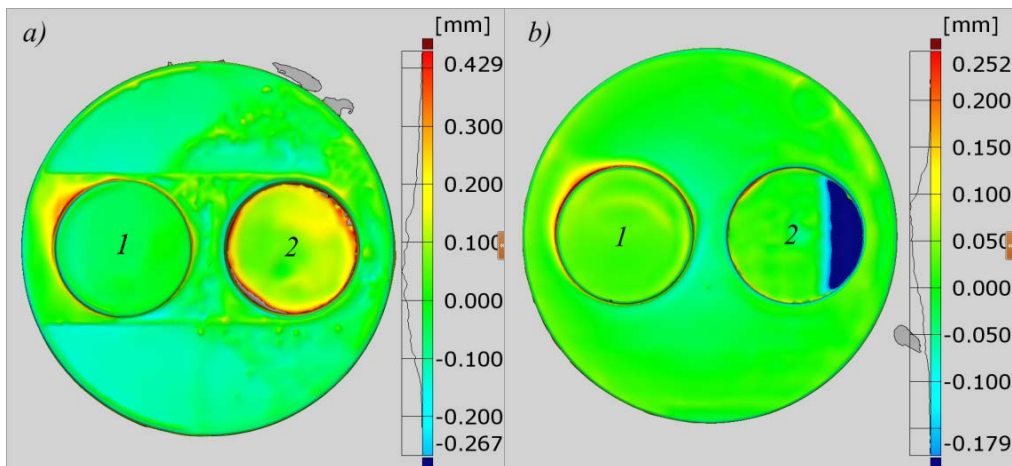
Na rysunku 4 przedstawiono modele bryłowe zeskanowanych elementów uzyskane na podstawie zebranych chmur punktów i poddanych procesowi digitalizacji w oprogramowaniu GOM Inspect. W celu przeprowadzenia szeregu analiz parametrów geometrycznych naniesiono również elementy zaprojektowane w oprogramowaniu SolidWorks.



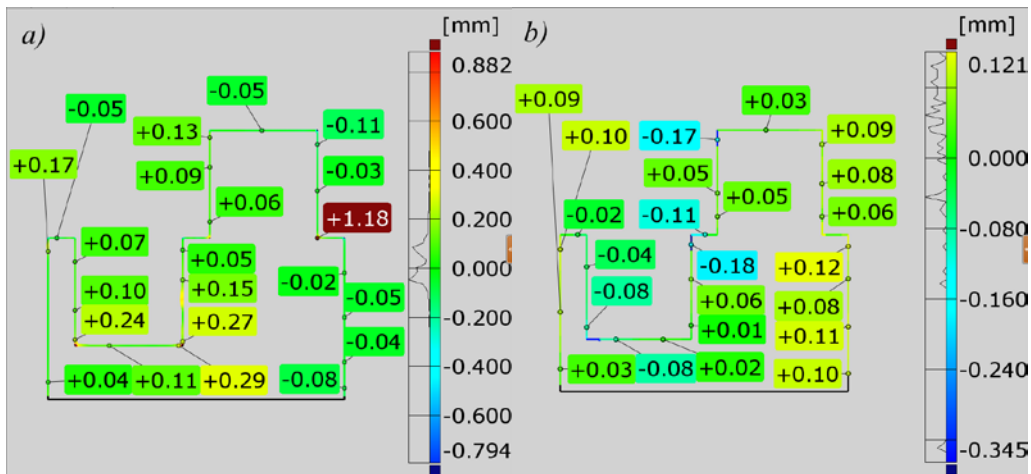
Rys. 4. Modele po digitalizacji z nałożonymi elementami odniesienia, a) model drukowany poziomo, b) model drukowany pionowo.



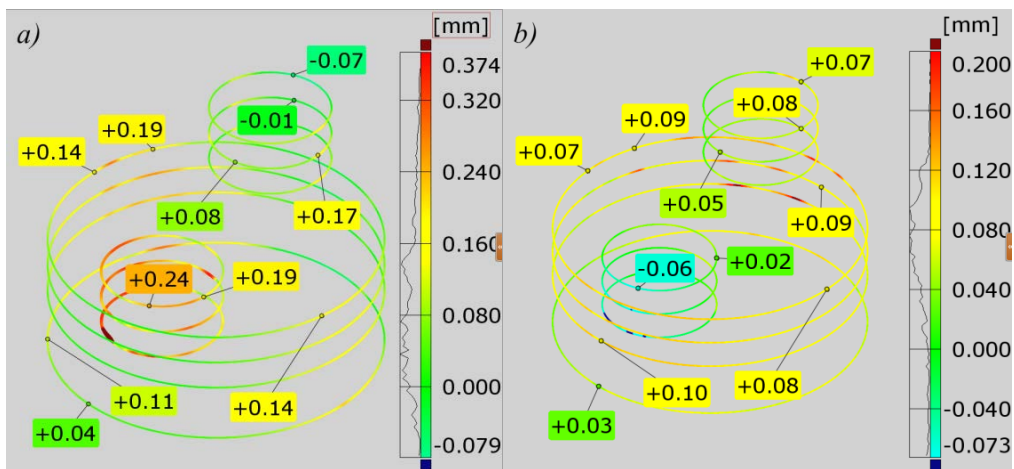
Rys. 5. Odchyłki wymiarowe w zeskanowanych elementach, a) model drukowany poziomo, odchyłki w kolorach: zielonym – 0 mm, żółtym – 0,2 mm, czerwonym – 0,4 mm, niebieskim – 0,25 mm, b) model drukowany pionowo, odchyłki w kolorach: zielonym – 0 mm, żółtym – 0,1 mm, czerwonym – 0,25 mm, niebieskim – 0,15 mm. Widoczne na rysunku 6b czerwono-bordowe plamki (miejsce maksymalnych odchyłek wymiarowych) pochodzą prawdopodobnie od koncentracji środka antyrefleksyjnego).



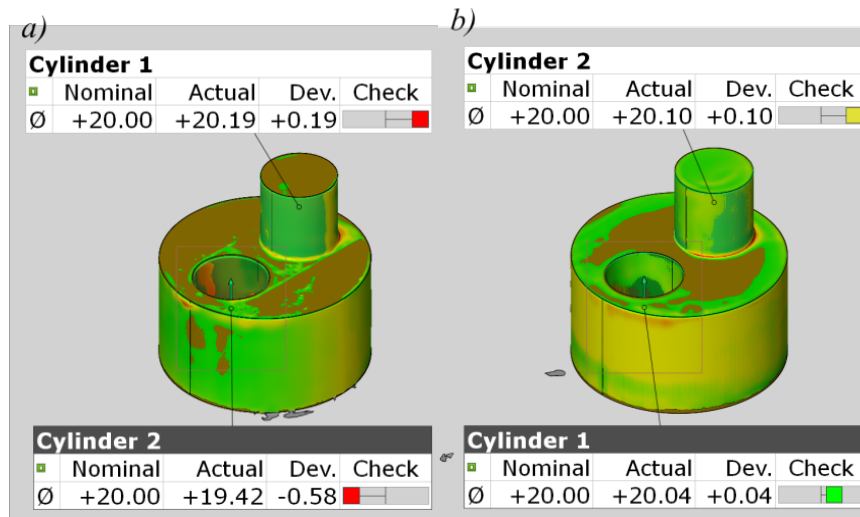
Rys. 6. Odchyłki wymiarowe w zeskanowanych elementach widok z góry, a) model drukowany poziomo, odchyłki w kolorach: zielonym – 0 mm, żółtym – 0,2 mm, czerwonym – 0,4 mm, niebieskim – 0,25 mm, b) model drukowany pionowo, odchyłki w kolorach: zielonym – 0 mm, żółtym – 0,1 mm, czerwonym – 0,25 mm, niebieskim – 0,15 mm, 1 – czoła (dna) powierzchni walcowych wewnętrznych, 2 – czoła powierzchni walcowych zewnętrznych.



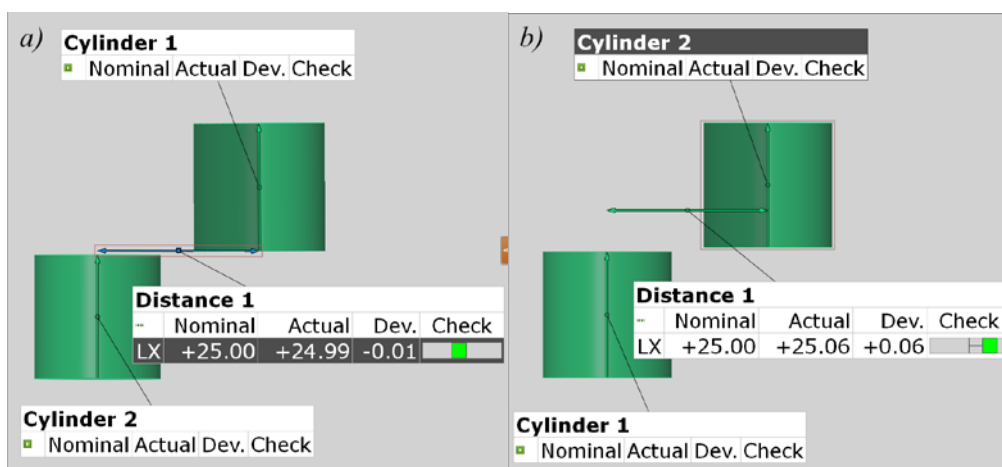
Rys. 7. Odchyłki wymiarowe w zeskanowanych elementach w płaszczyźnie symetrii, a) model drukowany poziomo, odchyłki w kolorach: zielonym  $-0,2\div0,1$  mm, żółtym  $-0,35\div0,45$  mm, pomarańczowym  $-0,61$  mm, b) model drukowany pionowo, odchyłki w kolorach: zielonym  $-0,09\div0,09$  mm, żółtym  $-0,1\div0,12$  mm, czerwonym  $-0,25$  mm, niebieskim  $-0,1\div0,2$  mm.



Rys. 8. Odchyłki wymiarowe w zeskanowanych elementach w rzucie aksonometrycznym przeciętym płaszczyznami równoległymi do płaszczyzny XY, a) model drukowany poziomo, odchyłki w kolorach: zielonym  $-0\div0,05$  mm, żółtym  $-0,1\div0,2$  mm, pomarańczowym  $-0,23\div0,29$  mm, czerwonym  $-0,3\div0,35$  mm, b) model drukowany pionowo, odchyłki w kolorach: zielonym  $-0,2\div0,3$  mm, żółtym  $-0,0\div0,11$  mm, czerwonym  $-0,16\div0,2$  mm, niebieskim  $-0,07$  mm.



Rys. 9. Odchyłki wymiarowe w zeskanowanych elementach dla średnic nominalnych  $d=20$  mm powierzchni walcowych zewnętrznych i wewnętrznych, a) model drukowany poziomo, średnica powierzchni zewnętrznej walcowej  $d_z=20,19$  mm, średnica powierzchni walcowej wewnętrznej  $d_w=19,42$  mm, b) model drukowany pionowo, średnica powierzchni zewnętrznej walcowej  $d_z=20,1$  mm, średnica powierzchni walcowej wewnętrznej  $d_w=20,04$  mm.



Rys. 10. Odchyłki wymiarowe w zeskanowanych elementach dla odległości pomiędzy osiami symetrii powierzchni walcowych zewnętrznych i wewnętrznych, a) model drukowany poziomo, b) model drukowany pionowo,

Za pomocą skanera optycznego Atos II i programu firmy GOM Inspect przeprowadzono pomiary i oszacowano odchyłki od wymiarów nominalnych modelu

w układzie powierzchni zewnętrznych, w przekrojach poprzecznych wzdłuż osi symetrii powierzchni walcowych, w kilku przekrojach normalnych do osi symetrii powierzchni walcowych, dla średnic powierzchni walcowych zewnętrznych i wewnętrznych, dla odległości pomiędzy osiami symetrii powierzchni walcowych zewnętrznych i wewnętrznych.

W układzie powierzchni zewnętrznych (rys. 5 i 6) maksymalna odchyłka dla modelu drukowanego poziomo wyniosła 0,42 mm zaś minimalna (ujemna) -0,26 mm. Dla modelu drukowanego pionowo odchyłki maksymalna i minimalna wyniosły odpowiednio: 0,252 mm i -0,172. Maksymalne odchyłki zaobserwowano na krawędziach wewnętrznych (styk zewnętrznej powierzchni walcowej z płaszczyzną), zaś minimalne odchyłki na krawędziach zewnętrznych (styk tworzącej z płaszczyzną kołową).

W przekrojach poprzecznych (rys. 7) maksymalna odchyłka dla modelu drukowanego poziomo wyniosła 0,61 mm (w wewnętrznym narożu) zaś minimalna (ujemna) -0,11 mm. Dla modelu drukowanego pionowo odchyłki maksymalna i minimalna wyniosły odpowiednio: 0,12 mm i 0,18 mm. Natomiast w przekrojach równoległych (rys. 8) maksymalna odchyłka dla modelu drukowanego poziomo wyniosła 0,3 mm (w wewnętrznym narożu) zaś minimalna (ujemna) -0,07 mm. Dla modelu drukowanego pionowo odchyłki maksymalna i minimalna wyniosły odpowiednio: 0,12 mm i 0,18 mm.

Pomiar średnic powierzchni walcowych wykazał następujące różnice: dla modelu drukowanego poziomo średnica zewnętrzna  $d_z = 20,19$  mm, wewnętrzna  $d_w = 19,42$  mm, zaś dla modelu drukowanego pionowo  $d_z = 20,1$  mm,  $d_w = 20,04$  mm. Odległości między osiami walców zewnętrznego i wewnętrznego wynoszą odpowiednio dla modelu drukowanego poziomo i drukowanego pionowo 24,99 mm i 25,06 mm.

#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy zastosowano technikę pomiarową używaną w inżynierii odwrotnej. Na podstawie chmury punktów uzyskanych przez skaner optyczny Atos II, po naprawie powierzchni otrzymano model wirtualny, na którym dokonano pomiarów odchyłek. Na poszczególnych rysunkach wyeksponowano możliwości tej techniki pomiarowej porównując jednocześnie geometrię brył walcowych wykonanych technologią przyrostową w dwóch różnych ustawieniach na platformie roboczej maszyny drukującej Connex 350.

Pomiary wykazały, że model bryłowy powierzchni walcowych ustawiony poziomo na platformie roboczej wykazywał większe odchyłki od wymiarów nominalnych niż ten sam geometryczny model wykonany w pozycji pionowej. W przypadku średnic powierzchni walcowych zewnętrznych różnica ta wyniosła 0,09 mm, zaś w przypadku średnic wewnętrznych 0,62 mm. Różnica między osiami walców zewnętrznego



i wewnętrznego wyniosła 0,07 mm.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzić można, że poziome ustawienie powierzchni walcowych na platformie roboczej w zastosowanej procesie przyrostowego jest zdecydowanie mniej korzystne (większe odchyłki wymiarowe) niż ustawienie pionowe. Wpływ na pogorszenie jakości powierzchni i wyników pomiarów miał materiał podporowy, który w przypadku powierzchni walcowej wewnętrznej całkowicie wypełniał przestrzeń cylindra w trakcie budowania modelu.

*Pracę wykonano z wykorzystaniem urządzeń i aparatury zakupionej ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007 – 2013, Projekt LABIN Wsparcie Aparaturowe Innowacyjnych Laboratoriów Naukowo – Badawczych Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Oś priorytetowa I – Nowoczesna Gospodarka, Działanie 1.3 – Wspieranie Innowacji oraz Projektu MOLAB pn. „Rozwój bazy badawczej specjalistycznych laboratoriów uczelni publicznych Regionu Świętokrzyskiego” PROGRAM OPERACYJNY INNOWACYJNA GOSPODARKA, Oś priorytetowa 2: Infrastruktura sfery B+R Działanie 2.2 Wsparcie tworzenia wspólnej infrastruktury badawczej jednostek naukowych POIG 02.02.00-26-023/08-00 z dnia 19 maja 2009 r.*

## LITERATURA

- [1] WRÓBEL I.: *Inżynieria odwrotna jako metoda tworzenia cyfrowych modeli przedmiotów o skomplikowanych kształtach*. W: *Mechanik* 3, 2010, 212-214.
- [2] KOWALSKI M., KOWALSKI M., PASZKIEWICZ R., KUCZKO W., WICHNIAREK R., ZAWADZKI P.: *Automatyzacja procesu skanowania na podstawie danych pozyskanych z pomiarów fotogrametrycznych*. W: *Postępy nauki i techniki* 7, 2011, 109-119.
- [3] GAO J., CHEN X., ZHENG D., YILMAZ O., GINDY N.: *Adaptive restoration of complex geometry parts through reverse engineering application*. W: *Advances in Engineering Software* 37, 2006, 592-600.
- [4] ZEXIAO X., JIANGUO W., QIUMEI Z.: *Complete 3D measurement in reverse engineering using a multi-probe system*. W: *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, 2005, 1474-1486.
- [5] SANSONI G., DOCCHIO F.: *Three-dimensional optical measurements and reverse engineering for automotive applications*. W: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 20, 2004, 359-367.
- [6] STĘPIEŃ K., MAKIEŁA W. (2013), *An analysis of deviations of cylindrical surfaces with the use of wavelet transform*, W: *Metrology and Measurement Systems*, No. 1, Vol. XX, 139-158.

# **BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE PRÓBEK KSZTAŁTOWANYCH PRZYROSTOWO Z MATERIAŁU FOTOUTWARDZALNEGO**

Stanisław ADAMCZAK<sup>1</sup>, Jerzy BOCHNIA<sup>1</sup>, Bożena KACZMARSKA<sup>2</sup>

## 1. WSTĘP

Pojawienie się ponad trzydzieści lat temu pierwszej techniki wydruku przestrzennego dało początek nowym technologiom, które początkowo znane jako Rapid Prototyping znalazły zastosowanie w wytwarzaniu modeli bryłowych prototypów zapewniając szybką i niedrogą alternatywę dla produkcji prototypów i funkcjonalnych modeli w porównaniu do konwencjonalnych, pracochłonnych technik wytwarzania. Obecnie coraz częściej używa się terminu technologie przyrostowe (additive manufacturing technology), co ma swoje uzasadnienie, gdyż tworzenie modeli technikami przyrostowymi polega na warstwowym dodawaniu materiału, gdzie każda kolejna warstwa jest dokładnym odzwierciedleniem przekroju modelu w zadanej płaszczyźnie. Rozwój tych technologii oraz poszukiwanie nowych materiałów sprawiły, że znajdują one coraz szersze zastosowanie w wielu obszarach techniki, od różnych gałęzi przemysłu poprzez wzornictwo, architekturę, aż po medycynę [5]. Coraz częściej używa się ich nie tylko do wytwarzania modeli, czy prototypów, ale również gotowych produktów lub półfabrykatów. Stan aktualny i perspektywy rozwoju technologii przyrostowych omówiono między innymi w pracy Campbell'a [3], przedstawiając możliwości aplikacji przemysłowych, rozwoju materiałów i zamierzenia projektowe.

Półfabrykatami dla budowanych technologiami przyrostowymi elementów są:

- ciecze np. żywica fotoutwardzalna w technologii PolyJet,
- proszki (ośrodki sypkie) np. proszek poliamidowy w technologii SLS –

---

<sup>1</sup> Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, al. 1000-lecia P. P. 7, 25-314 Kielce, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii ([adamczak@tu.kielce.pl](mailto:adamczak@tu.kielce.pl))

<sup>2</sup> Katedra Inżynierii Produkcji ([bozena.kaczmarska@tu.kielce.pl](mailto:bozena.kaczmarska@tu.kielce.pl))



- Selective Laser Sintering lub proszek ceramiczny w technologii 3D Printing,  
– ciała stałe (druć, folia) np. drucik ABS w technologii FDM – Fuse Deposition Modeling.

W czasie procesu technologicznego budowania modelu na platformie roboczej maszyny drukującej 3D powstaje bryła (ciało stałe) o zasadniczo innych właściwościach niż właściwości półfabrykatu. Podczas procesu wytwarzania (drukowania) modelu kształtowane są również właściwości mechaniczne materiału, z którego jest zbudowany. Stąd uzasadniona konieczność prowadzenia badań właściwości tych materiałów, zwłaszcza, że są to nowe, innowacyjne materiały.

Wraz z rozwojem materiałów stosowanych w technologiach przyrostowych oraz pojawianiem się na rynku coraz nowszych materiałów o lepszych właściwościach fizycznych i mechanicznych, prowadzi się coraz więcej badań tych właściwości. Warto przytoczyć tu pracę [6], w której przedstawiono wyniki badań wpływu warunków środowiska (starzenia) oraz orientacji (tj. sposobu ułożenia na platformie roboczej drukarki) na właściwości mechaniczne próbek o wymiarach zgodnych z normą ASTM D638 [8], wykonanych metodą stereolitografii. Badania wykazały anizotropię materiałów otrzymywanych technologią stereolitografii, a także zmniejszenie właściwości mechanicznych pod wpływem warunków środowiska. Natomiast w pracy [2] rozważano badanie wpływu kierunku nanoszenia warstw (wirtualnego ułożenia elementu na platformie roboczej) i spiekania laserowego proszków poliamidowych na właściwości mechaniczne otrzymanych materiałów próbek do badań. Stwierdzono istotne różnice, co wskazuje anizotropię otrzymywanych tą technologią materiałów.

W wielu pracach nie podaje się niepewności pomiarów mierzonych wielkości. Również katalogi poszczególnych firm oferujących materiały stosowane w technologiach przyrostowych pomijają niepewność pomiarów ograniczając się do podania informacji o wartości nominalnej lub zakresie danego parametru charakteryzującego właściwość materiału np. wytrzymałość na rozciąganie. Badania właściwości mechanicznych materiałów polimerowych otrzymywanych technologiami przyrostowymi prowadzone są najczęściej w oparciu o normy stosowane do tworzyw sztucznych. Większość firm i ośrodków badawczych amerykańskich wykonuje próbki i przeprowadza badania wg ASTM D638 [4]. Na rynku europejskim stosowane są natomiast normy ISO 527, przy czym próbki do badań wykonywane są wg ISO 527-1 [10]. Normy te w zapisie wyników zalecają podawanie średniej arytmetycznej wyników oznaczeń i jeśli to jest wymagane odchylenia standardowego.

Autorzy tej pracy, biorąc pod uwagę powyżej opisane problemy, dokonali próby oszacowania niepewności pomiarów wytrzymałości na rozciąganie na podstawie statycznego rozciągania próbek kształtowanych przyrostowo z żywicy fotoutwardzalnej FullCure 720 z uwzględnieniem kierunków drukowania. W dalszej części pracy opisano przygotowanie próbek, przeprowadzenie statycznej próby

rozciągania i analizę otrzymanych wyników. Przedstawiono również znaczenie przeprowadzonych badań z punktu widzenia ryzyka innowacyjnego stosowanych metod.

## 2. OPIS PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Próbki do badań wykonano z żywicy fotoutwardzalnej FullCure 720 technologią PolyJet (<http://objet.com/3d-printing-materials>), z zastosowaniem drukarki Connex350 firmy Objet. Do statycznej próby rozciągania użyto próbek o wymiarach zgodnych z normą ASTM D638 [4] o następujących wymiarach: szerokość wąskiej części próbki  $13\pm 0,02$  mm, długość wąskiej części  $57\pm 0,02$  mm, grubość próbki  $4\pm 0,4$  mm, szerokość części chwytowej  $19\pm 0,025$  mm, całkowita długość próbki 165 mm.

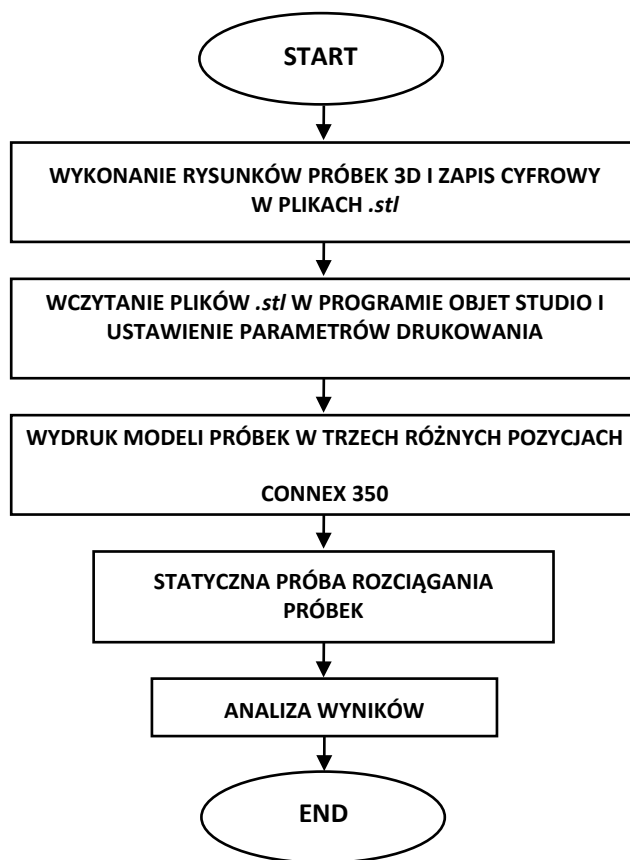
Model bryłowy próbki narysowano w programie CAD 3D i zapisano w pliku cyfrowym z rozszerzeniem *.stl* stosując parametry triangulacji w opcjach eksportu: rozdzielczość – dostosowana, odchylenie – tolerancja 0,016 mm, kąt – tolerancja 5°. Trzeba pamiętać, aby nie stosować zbyt małych wartości parametrów triangulacji, gdyż nie otrzyma się okrągłych kształtów elementów (w tym przypadku promień zaokrąglenia próbki między częścią chwytową a częścią roboczą), ani zbyt wysokich z uwagi na dużą pojemność plików (*\*.stl*). Następnie używając programu Objet Studio umieszczono (wirtualnie) modele próbek na platformie roboczej maszyny Connex350 w trzech różnych pozycjach:

- kierunek X - zgodny z ruchem wzdłużnym głowicy drukującej, próbka boczną stroną umieszczona na platformie roboczej,
- kierunek Y – zgodny z ruchem wzdłużnym głowicy drukującej, próbka płaską stroną umieszczona na platformie roboczej,
- kierunek Z – próbka pionowo umieszczona na platformie roboczej.

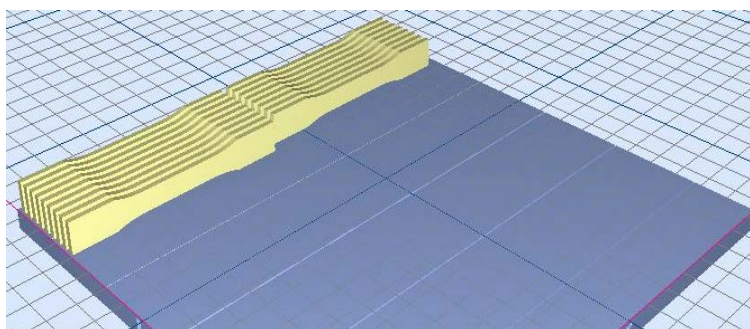
Próbki wykonano w trybie Glossy w celu uzyskania gładkiej powierzchni.

Badania opisane w tej pracy przeprowadzane były według procedury przedstawionej na rysunku 1

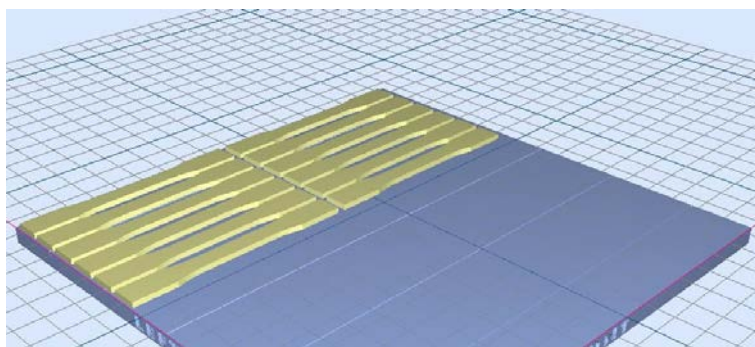
Rozmieszczone wirtualnie na platformie roboczej modele próbek w programie Objet Studio przedstawiają rysunki 2, 3 i 4.



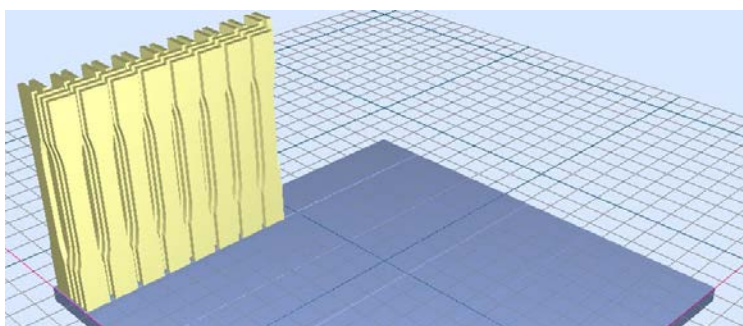
Rys.1. Procedura przeprowadzonych badań



Rys. 2. Rozmieszczenie próbek na platformie roboczej – ustawienie boczne



Rys. 3. Rozmieszczenie próbek na platformie roboczej – ustawienie powierzchnią płaską

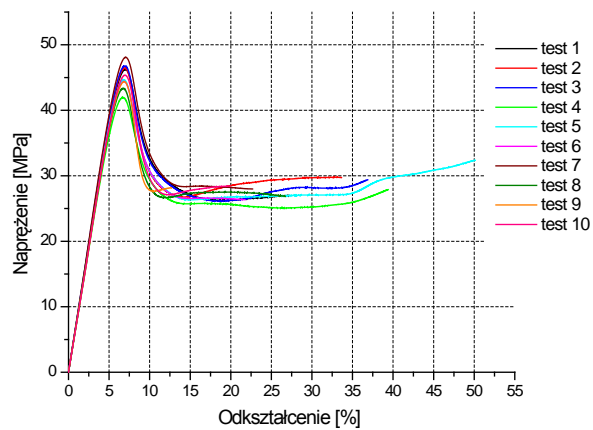


Rys. 4. Rozmieszczenie próbek na platformie roboczej – ustawienie pionowe

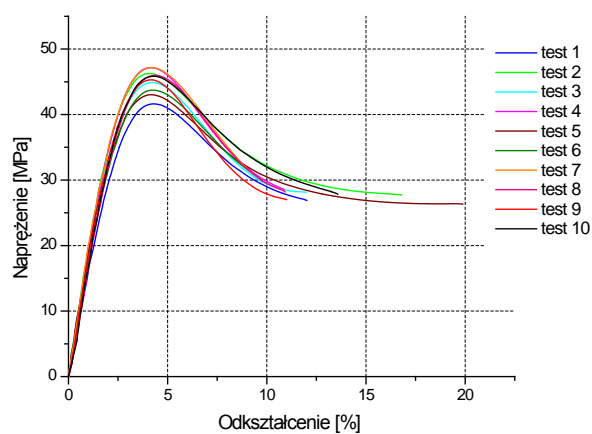
Po wydrukowaniu próbki zdjęto z platformy roboczej maszyny, a następnie usunięto materiał podporowy i przygotowano do przeprowadzenia statycznej próby rozciągania. Badanie wykonano z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej Inspect mini [9] oraz ekstensometru do pomiaru odkształcenia. W programie Labmaster [11], będącym na wyposażeniu maszyny Inspect mini, ustawiono prędkość testu – 5 mm/min.

## 2. OTRZYMANE WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

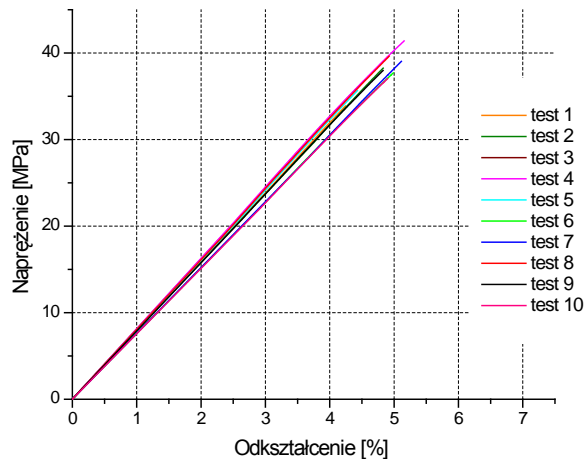
Wykresy zbiorcze rozciągania we współrzędnych: naprężenie – odkształcenie przedstawiono na rysunkach 5, 6 i 7.



Rys. 5. Wykresy rozciągania próbek ustawionych na platformie roboczej boczna stroną w kierunku X zgodnie z ruchem wzdłużnym głowicy drukującej



Rys. 6. Wykresy rozciągania próbek ustawionych na platformie roboczej płaską stroną poziomo w kierunku Y



Rys. 7. Wykresy rozciągania próbek ustawionych na platformie roboczej pionowo w kierunku Z

Program Labmaster po wprowadzeniu danych, takich jak: szerokość i grubość próbki, rejestrując maksymalną siłę rozciągającą oblicza wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ . Wartości wytrzymałości na rozciąganie otrzymane w poszczególnych testach zestawiono w tablicach 1, 2 i 3.

Tablica 1. Wartości wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  i maksymalnej siły  $F_m$  próbek ustawionych na platformie roboczej boczną stroną w kierunku X.

Próbki – kierunek X Numer testu i próbki	Wartość wytrzymałości na rozciąganie $R_{m_i}$ [MPa]	Wartość maksymalnej siły $F_{m_i}$ [N]	$(F_{m_i} - \bar{F}_m)^2$ [N <sup>2</sup> ]
1	2	4	5
Test 1	46,234	2410,2	2744,71
Test 2	46,478	2441,1	6937,22
Test 3	46,770	2456,4	9719,99
Test 4	41,963	2187,6	28971,44
Test 5	44,672	2323,0	1211,74
Test 6	44,400	2314,6	1867,10
Test 7	48,095	2507,2	22317,37
Test 8	43,347	2259,7	9625,57
Test 9	44,377	2313,4	1972,25
Test 10	45,364	2364,9	50,27
$\bar{X}$	<b>45,17</b>	<b>2357,81</b>	
$\Sigma$			<b>85417,67</b>

Tablica 2. Wartości wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  próbek ustawionych na platformie roboczej płaską stroną w kierunku Y.

Próbki – kierunek Y Numer testu i próbki	Wartość wytrzymałości na rozciąganie $R_{m_i}$ [MPa]	Wartość maksymalnej siły $F_{m_i}$ [N]	$(F_{m_i} - \bar{F}_m)^2$ [N <sup>2</sup> ]
1	2	4	5
Test 1	46,074	2395,9	8675,06
Test 2	43,325	2252,9	2486,02
Test 3	44,077	2292,0	115,78
Test 4	43,029	2237,5	4258,87
Test 5	45,853	2384,3	6648,77
Test 6	41,658	2166,2	18648,63
Test 7	44,830	2331,1	803,16
Test 8	43,496	2261,8	1677,72
Test 9	45,632	2372,9	4919,62
Test 10	44,866	2333,0	914,46
$\bar{X}$	<b>44,284</b>	<b>2302,76</b>	8675,06
$\Sigma$			<b>49148,08</b>

Tablica 3. Wartości wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  próbek ustawionych na platformie pionowo w kierunku Z.

Próbki – kierunek Z Numer testu i próbki	Wartość wytrzymałości na rozciąganie $R_{m_i}$ [MPa]	Wartość maksymalnej siły $F_{m_i}$ [N]	$(F_{m_i} - \bar{F}_m)^2$ [N <sup>2</sup> ]
1	2	4	5
Test 1	33,910	1826,5	41918,47
Test 2	38,274	2051,2	398,40
Test 3	36,903	1980,3	2594,89
Test 4	41,423	2228,7	38990,45
Test 5	35,663	1913,8	13792,15
Test 6	37,701	2035,8	20,79
Test 7	39,032	2094,5	4001,83
Test 8	39,633	2126,8	9131,71
Test 9	38,248	2057,6	694,85
Test 10	37,077	1997,2	1158,72
$\bar{X}$	<b>37,786</b>	<b>2031,24</b>	
$\Sigma$			<b>112702,3</b>

Niepewność standardową wyników granicy wytrzymałości  $R_m$  dla próbek wykonanych w poszczególnych pozycjach obliczono metodą typu A ze wzoru [1]:

$$u_{\bar{y}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial \bar{x}_i} \right)^2 \cdot u_i^2} \quad (1)$$

gdzie:  $u_i$  – niepewności standardowe pomiaru wielkości wejściowych obliczone metodą typu A lub B.

Niepewność standardową pomiarów maksymalnej siły  $F_m$  dla próbek wykonanych w poszczególnych pozycjach obliczano metodą typu A ze wzoru [1]:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

gdzie:  $n$  – liczba pomiarów,

$\bar{x}$  – średnia arytmetyczna wszystkich wyników pomiarów w serii.

Niepewność standardową pomiarów szerokości i grubości próbek obliczono metodą typu B ze wzoru [12]:

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

gdzie:  $a$  – połowa szerokości przedziału, w której ma znajdować się błąd graniczny.

Niepewność średniej wartości maksymalnej siły rozciągającej obliczona ze wzoru (2) dla próbek wykonanych w poszczególnych kierunkach wyniosła:

- $u_{F_m} = 30,8$  N – dla próbek drukowanych w kierunku X,
- $u_{F_m} = 23,4$  N – dla próbek drukowanych w kierunku Y,
- $u_{F_m} = 35,4$  N – dla próbek drukowanych w kierunku Z,

Szerokość  $b_0$  próbek zmierzono z dokładnością 0,05 mm, natomiast grubość  $a_0$  zmierzono z dokładnością 0,01 mm zgodnie z zaleceniami [10]. Wartości średnie wyniosły odpowiednio:

- grubość  $\bar{a}_0 = 4,01$  mm, szerokość  $\bar{b}_0 = 13$  mm, dla kierunku X,
- grubość  $\bar{a}_0 = 4$  mm, szerokość  $\bar{b}_0 = 13$  mm, dla kierunku Y,
- grubość  $\bar{a}_0 = 4,065$  mm, szerokość  $\bar{b}_0 = 13,25$  mm, dla kierunku Z.

W związku z tym, że wystąpił bardzo mały statystyczny rozrzut wyników nie szacowano niepewności pomiarów metodą A. Niepewność standardowa obliczona metodą typu B ze wzoru (3) wyniosła:

- dla grubości próbek  $u_{aB} = 0,0029$  mm,
- dla szerokości próbek  $u_{bB} = 0,014$  mm.

Niepewność wartości wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  obliczono ze wzoru (1) odpowiednio go przekształcając:



$$u_{R_m} = \sqrt{\left(\frac{1}{\bar{a}_0 \bar{b}_0}\right)^2 u_{F_m}^2 + \left(\frac{-\bar{F}_m}{\bar{a}_0^2 \bar{b}_0}\right)^2 u_{aA}^2 + \left(\frac{-\bar{F}_m}{\bar{a}_0 \bar{b}_0^2}\right)^2 u_{bA}^2} \quad (4)$$

- gdzie:  $\bar{F}_m$  – średnia wartość maksymalnej siły rozciągającej obliczona dla poszczególnych kierunków drukowania (tablica 1, 2, 3)
- $u_{F_m}$  – niepewność średniej wartości maksymalnej siły rozciągającej,
- $\bar{a}_0$  – średnia grubość próbek,
- $u_{aA}$  – niepewność średniej grubości próbek,
- $\bar{b}_0$  – średnia szerokość próbek,
- $u_{bA}$  – niepewność średniej szerokości próbek.

Podstawiając do wzoru (4) konkretne wartości obliczone ze wzorów (2, 3) i zamieszczone w tablicach 1, 2, 3 otrzymujemy niepewność pomiaru wytrzymałości na rozciąganie dla poszczególnych ustawień próbek na platformie roboczej maszyny drukującej:

- dla próbek drukowanych w kierunku X  $u_A = 0,591$  MPa,
- dla próbek drukowanych w kierunku Y  $u_A = 0,450$  MPa,
- dla próbek drukowanych w kierunku Z  $u_A = 0,657$  MPa.

Z przeprowadzonych badań wynika, że wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  próbek wykonywanych w pozycji pionowej jest o 19,5% mniejsza od wytrzymałości próbek wykonanych w kierunku X i 17,2 % mniejsza od wytrzymałości próbek wykonanych w kierunku Y. Pewnym zaskoczeniem jest, jak pokazuje to rysunek 7, brak typowego odkształcenia plastycznego.

Niepewność pomiarów  $u_A$  dla próbek ustawionych na platformie roboczej pionowo jest o 11,1% większa niż dla próbek wykonanych w kierunku X i o 46% większa niż dla próbek drukowanych w kierunku Y. Wyniki te wskazują na wyraźną anizotropię właściwości materiału w odniesieniu do kierunków wydruku.

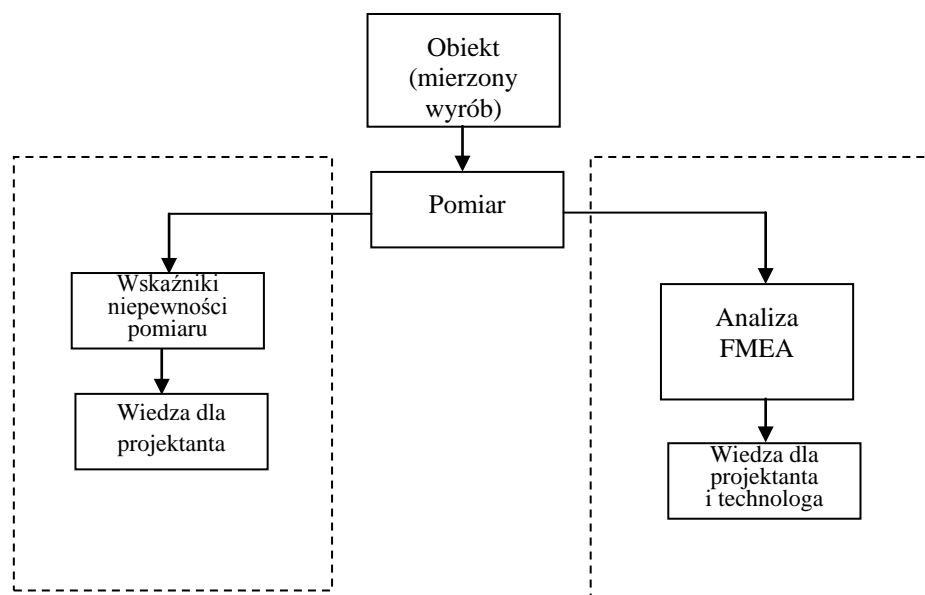
Badanie własności wytrzymałościowych oraz szacowanie niepewności otrzymanych wyników ma znaczenie nie tylko w obliczeniach inżynierskich, ale również w ocenie ryzyka innowacyjnego zwłaszcza w procesie wdrażania innowacyjnych technologii.

### 3. RYZYKO INNOWACYJNE W ASPEKTCIE PRZYROSTOWEGO KSZTAŁTOWANIA ELEMENTÓW

Klasyczna analiza wyników pomiarów obejmuje ocenę niepewności będącej miarą rozrzutu w przedziale, w którym można z zadowalającym prawdopodobieństwem określić wartość mierzonej wielkości. Nie ma natomiast odniesienia do procesu

wytwarzania mierzonego elementu z uwzględnieniem analizy i oceny przyczyn i skutków niezgodności ujawnianych w procesie pomiaru. Takie odniesienie jest szczególnie ważnym elementem w aspekcie ryzyka innowacyjnego i pozwala w innym, znacznie szerszym ujęciu odnosić się do zagadnienia analizy wyników pomiarów.

Narzędziem pozwalającym wykonać tego rodzaju analizę i ocenę jest metoda FMEA (Failure Mode and Effects Analysis, w Polsce funkcjonuje pod nazwą Analiza skutków i przyczyn wad), znana i powszechnie stosowana w wielu zagadnieniach inżynierskich, zaliczana do grupy metod zarządzania jakością [4]. Pozwala ona na pozyskanie dodatkowych informacji obejmujących przyczyny oraz skutki występujących niezgodności identyfikowanych w procesie pomiaru z uwzględnieniem znaczenia oceny niepewności pomiarów (Rys. 8).



Rys. 8. Metoda FMEA w procesie analizy niepewności pomiarów.

Metoda FMEA odnosi się do potencjalnych lub rzeczywiście występujących niezgodności (lub wad). Uwzględniając przyczyny i skutki określa istotność poszczególnych niezgodności, dla której miarą w ujęciu ilościowym jest wskaźnik priorytetu (P) obliczany jako iloczyn trzech wskaźników.

$$P = Z \cdot R \cdot W \quad (5)$$

gdzie:

Z – znaczenie wyrażane poprzez niekorzystne skutki niezgodności podczas

użytkowania wyrobu,

R – ryzyko rozumiane jako prawdopodobieństwo (częstość) powstania niezgodności w procesie wytwarzania wyrobu,

W – wykrywalność określana jako trudność ujawnienia niezgodności przed użytkowaniem wyrobu.

Wartości wskaźników szacowane są na podstawie wiedzy o procesie wytwarzania i wyrobie lub specjalnie w tym celu prowadzonych badań. W klasycznym ujęciu metody przypisywane im są wartości z przedziału (1 – 10), stąd wskaźnik priorytetu przyjmuje wartości z przedziału (1 – 1000). Powstaje w ten sposób pewnego rodzaju lista rankingowa wskazująca na istotność poszczególnych niezgodności. Wysokie pozycje na liście zajmują niezgodności, których skutki są bardzo niekorzystne, istnieje duże prawdopodobieństwo ich wystąpienia oraz są trudne do wykrycia przed użytkowaniem wyrobu. Wysokie wartości wskaźnika priorytetu, a więc i wysokie pozycje na liście rankingowej wskazują na konieczność wprowadzenia działań zapobiegawczych i korygujących w ramach zarządzania ryzykiem innowacyjnym, mniejsze wartości wskaźnika nie wymagają prowadzenia dodatkowych działań.

Wykorzystanie metody FMEA dostarcza projektantom, konstruktorom oraz technologom wiedzę wspomagającą podejmowanie projakościowych decyzji inżynierskich, co jest szczególnie istotne w przypadku stosowania innowacyjnych rozwiązań. Podobnie jak zastosowanie nowoczesnych metod pomiarowych przedstawionych np. w pracy [7] poszerza możliwości stosowania innych technik wytwarzania.

Z uwagi na złożoność zagadnień dotyczących ryzyka innowacyjnego problem ten jedynie wstępnie omówiono w tej pracy wskazując na celowość prowadzenia w tym zakresie dalszych szczegółowych prac.

### 3. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań wynika, że jak pokazują wykresy zbiorcze (rys. 5 i 6) rozciągania próbek wykonanych w pozycji poziomej, uzyskano dobrą powtarzalność wyników w zakresie wytrzymałości na rozciąganie, natomiast po jej przekroczeniu, w obszarze odkształceń plastycznych, próbki pękały przy różnych wydłużeniach. Gorsze właściwości wykazały, jak pokazuje to wykres zbiorczy rozciągania (rys. 7) próbki wykonane w pozycji pionowej. Materiał próbek budowany przyrostowo w kierunku Z (pionowym) nie wykazał właściwości plastycznych, posiadał wytrzymałość na zerwanie mniejszą od materiału próbek budowanych w kierunku poziomym. Również niepewność pomiarów wytrzymałości na rozciąganie próbek pionowych była mniejsza od niepewności próbek budowanych poziomo, co świadczy o większym rozrzucie wyników.

Materiały modelowe otrzymywane technologiami przyrostowymi nie są tak znane jak np. materiały ze stopów metali czy tworzywa sztuczne, używane jako materiały

konstrukcyjne. Stąd konieczność lepszego ich poznania. Z przeprowadzonych badań wynika, że materiał budowany technologią przyrostową posiada wyraźne właściwości anizotropowe determinowane kierunkami przyrostu warstw.

Wyniki badań przedstawione w tej pracy mogą być przydatne w projektowaniu modeli wykonywanych z badanego materiału. W pracy również zwrócono uwagę na problem ryzyka innowacyjności zastosowanej technologii przyrostowej, który będzie wymagał szerszego opracowania.

*Pracę wykonano z wykorzystaniem urządzeń i aparatury zakupionej ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007 – 2013, Projekt LABIN Wsparcie Aparaturowe Innowacyjnych Laboratoriów Naukowo – Badawczych Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Oś priorytetowa I – Nowoczesna Gospodarka, Działanie 1.3 – Wspieranie Innowacji.*

#### LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., MAKIEŁA W., *Podstawy metrologii i inżynierii jakości dla mechaników*, 2010, WNT, 46-47.
- [2] BASSOLI E., GATTO A., IULIANO L., *Joining mechanisms and mechanical properties of PA composites obtained by selective laser sintering*, W: Rapid Prototyping Journal, Vol. 18 Iss: 2, 2012, 100-108.
- [3] CAMPBELL I., BOURELL D., GIBSON, I., *Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age*, W: Rapid Prototyping Journal, Vol. 18 Iss: 4, 2012, 255-258.
- [4] HAMROL A., *Zarządzanie jakością z przykładami*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2005, 327–336.
- [5] OCZOŚ E., *Rosnące znaczenie Rapid Manufacturing w przyrostowym kształtowaniu wyrobów*, W: Mechanik, 4, 2008, 241-257.
- [6] PUEBLA K., ARCAUTE K., QUINTANA R., WICKER, R.B., *Effects of environmental conditions, aging, and build orientations on the mechanical properties of ASTM type I specimens manufactured via stereolithography*, W: Rapid Prototyping Journal, Vol. 18 Iss: 5, 2012, 374-388.
- [7] STĘPIEŃ K., MAKIEŁA W., *An analysis of deviations of cylindrical surfaces with the use of wavelet transform*, W: Metrology and Measurement Systems, No. 1, Vol. XX, 2013, 139-158.
- [8] ASTM, Standard 638, *Standard test method for tensile properties of plastic*, 2010.
- [9] Inspekt Mini, *Universal testing machine Inspekt mini 3kN*, Hegewald & Peschke MPT GmbH, 2011.
- [10] ISO, Standard 527–1, *Plastics - determination of tensile properties - Part 1: General principles*, 2012.
- [11] LabMaster software, Version 2.5.3.21, 2011.
- [12] PN-EN ISO 6892-1 Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej. 2010.

# WIZYJNY SYSTEM POMIAROWY POŁOŻENIA ZŁĄCZA DLA KOREKCJI TRAJEKTORII OPTYCZNEJ GŁOWICY LASEROWEJ W PROCESIE SPAWANIA

Wojciech CIESZYŃSKI<sup>1</sup>, Michał ZIĘBA<sup>1</sup>, Jacek REINER<sup>1</sup>

## 1. WSTĘP

Spawanie laserowe [1] pozwala na uzyskanie spoin o bardzo wysokiej jakości [2] wymaga to jednak precyzyjnego określenia i zachowania założonych parametrów procesu oraz tolerancji wykonania obrabianych elementów. Szczególnie tolerancje łączonych krawędzi są znacznie bardziej restrykcyjne jak w przypadku spawania konwencjonalnego MIG/MAG. Wynika to głównie z niewielkiej średnicy wiązki laserowej (np. 0,8mm), co narzuca znacznie większe wymagania na dokładność realizacji trajektorii wykonywanej spoiny. Dokładność ta zależy nie tylko od układu kinematycznego głowicy spawającej, ale przede wszystkim od rzeczywistego położenia krawędzi do spawania. Na rzeczywistą pozycję krawędzi wpływają zaś tolerancje wykonania elementów oraz tolerancje montażu w uchwycie obróbkowym. W takim przypadku, narzucanie mniejszych tolerancji dla przygotowania części, zwłaszcza przy produkcji seryjnej, podnosi koszty operacji technologicznych. Podobnie jak bardziej precyzyjne mocowanie elementów może degradować wydajność systemu. Odpowiedzią na powyższą sytuację jest paradygmat mechatroniczny – który proponuje, aby niedoskonałości układów mechanicznych korygować za pomocą elektroniki i oprogramowania.

W omawianym przykładzie, uzyskanie prawidłowej dokładności realizacji trajektorii obróbki laserowej może być osiągnięte poprzez integrację systemu laserowego z systemami pozycjonowania, pozwalającymi na wyznaczenie rzeczywistej trajektorii prowadzenia wiązki laserowej. Zastosowanie systemów pozycjonujących zwiększa elastyczność stanowiska obróbkowego, pozwala na

---

<sup>1</sup> Politechnika Włocławska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

zwiększenie tolerancji wykonanych części oraz zmniejszenie nakładów czasowych na dokładny montaż obrabianego elementu na stanowisku [3].

Systemy pozycjonowania w procesach spawania zaczęto stosować od wczesnych lat osiemdziesiątych. Początkowo używane, jako systemy monitorowania i korekcji trajektorii w spawaniu metodami łukowymi MIG/MAG, TIG oraz plazmowymi [4]. Wraz ze spadkiem cen komponentów potrzebnych do ich realizacji oraz postępem badań, systemy te zaczęły stawać się coraz bardziej popularne w różnych gałęziach przemysłu, jak przemysł stoczniowy czy przemysł motoryzacyjny. Ze względu na wysokie wymagania jakościowe związane z prowadzeniem wiązki laserowej wzdłuż krawędzi szczeliny między łączonymi elementami, systemy te znalazły również zastosowanie w procesach spawania laserowego.

Ze względu na tryb pracy systemy pozycjonujące głowicę laserową można podzielić na dwie kategorie:

- off-line: systemy wyznaczające kształt oraz położenie rozpatrywanego złącza przed przystąpieniem do wykonywania spoiny. Praca tych systemów oparta jest na wykonaniu dwóch przejazdów – pomiarowego oraz roboczego. Na podstawie informacji o kształcie i położeniu złącza uzyskanych podczas przejazdu pomiarowego obliczane są poprawki lub rzeczywiste współrzędne ruchu dla sterownika układu kinematycznego głowicy laserowej [5].
- on-line: systemy określające pozycję rozpatrywanego złącza w trakcie wykonywania spoiny. W tym przypadku korekty sterujące ruchem głowicy wyznaczane są w czasie rzeczywistym. W systemach tego typu wyznaczanie sygnałów sterujących głowicą może być realizowane na podstawie wcześniej założonego kształtu złącza (sterowanie predykcyjne) [6] lub iteracyjnego minimalizowania błędów dopasowania, bez znajomości parametrów opisujących kształt wykonywanej spoiny.

W celu poprawy kontroli jakości procesu spawania dąży się do integracji systemów wyznaczania bądź korekcji trajektorii głowicy laserowej z monitorowaniem jeziora ciekłego metalu oraz kontrolą jakości wykonania spoiny [7, 8].

Osiągane dokładności realizacji trajektorii wykonywanej spoiny nie zależą jedynie od wyznaczonych przez system sygnałów korekcyjnych związanych z położeniem oraz kształtem krawędzi łączenia. Istotny wpływ ma tu również dynamika układu kinematycznego, na którym zamontowano głowicę spawalniczą. W zależności od wykorzystywanego układu wykonawczego oraz sterownika tolerancja ruchu może osiągać wartość  $\pm 1.0$  mm dla robotów spawalniczych [9].

W większości rozwiązań korekcja położenia trajektorii odbywa się przez bezpośrednie sterowanie napędami osi robota lub obrabiarki realizującej zadanie technologiczne. W rozwiązaniach pośrednich, nadaje się głowicy laserowej dodatkowy stopień swobody. Regaar i inni [10] opracowali układ optyczny z dodatkowym zwierciadłem o zmiennym kącie nachylenia. W ten sposób osiągnięto zmianę położenia plamki lasera o  $\pm 15$  mm w kierunku prostopadłym do kierunku

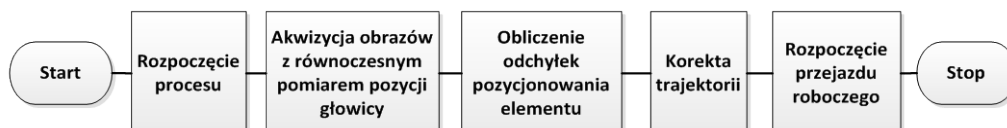
wykonywanej spoiny. Znając wyprzedzenie punktu pomiaru położenia złącza w stosunku do punktu ogniskowania wiązki laserowej uzyskano możliwość nadążnego śledzenia spoiny poprzez odpowiednie odchylenie lustra.

W niniejszym artykule przedstawiono opracowany wizyjny system pomiarowy położenia szczeliny złącza. Pozyskane informacje umożliwiły korekcję trajektorii optycznej głowicy laserowej. W ramach artykułu przedstawiono wyniki badania dokładności pozycjonowania wiązki laserowej oraz wpływ zakłóceń.

## 2. KONCEPCJA UKŁADU POMIAROWEGO I STEROWANIA

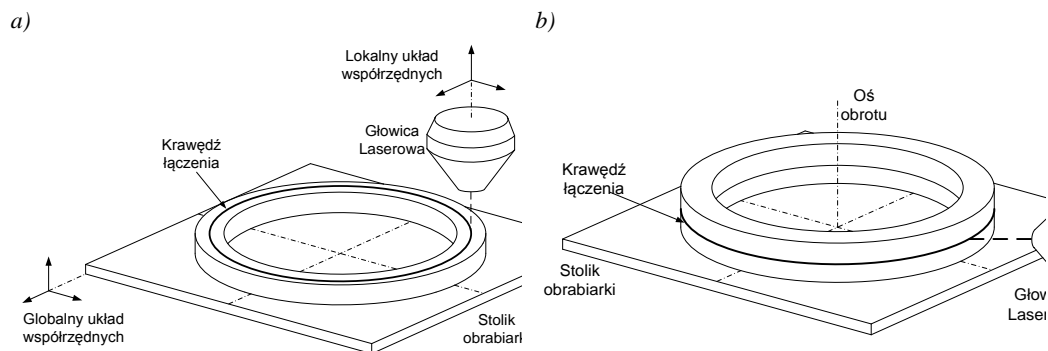
Rozpatrywany system został opracowany na bazie przed-procesowego wyznaczania trajektorii (off-line). Oznacza to, że system dokonuje pomiarów i wyznaczenia poprawek trajektorii przed uruchomieniem procesu spawania. Realizacja takiego działania zakłada wykonanie przez głowicę dwóch przejazdów w każdym cyklu obróbki (rys. 1):

- przejazd pomiarowy – zgodnie z trajektorią nominalną, zadaną do sterownika CNC. Synchronicznie z rejestracją zdjęć obszaru złącza zapamiętywana jest pozycja głowicy. Po zakończeniu przejazdu pomiarowego następuje analiza zebranych obrazów, wyznaczany jest model rzeczywistego złącza, a następnie parametry korekcyjne trajektorii.
- przejazd roboczy – po zakończeniu przejazdu pomiarowego wyznaczone parametry korekcyjne zostają przesłane do sterownika obrabiarki. W trakcie wykonywania spoiny głowica porusza się po trajektorii zmodyfikowanej przez parametry korekcyjne.



Rys. 1. Schemat blokowy poszczególnych etapów działania systemu

System został zaprojektowany do obsługi dwóch typów spoin o kształcie kołowym, wykonywanej na płaskiej powierzchni oraz na powierzchni walcowej. W zależności od rodzaju wykonywanej spoiny dobrane zostały odpowiednie konfiguracje układu kinematycznego obrabiarki, algorytmy pozwalające na wyznaczenie parametrów korekcyjnych trajektorii i metody korekcji przejazdu roboczego (rys 2).



Rys. 2. Konfiguracja układu obrabiarki dla dwóch przypadków obróbki a) złącza na płaszczyźnie, b) złącza na powierzchni walcowej

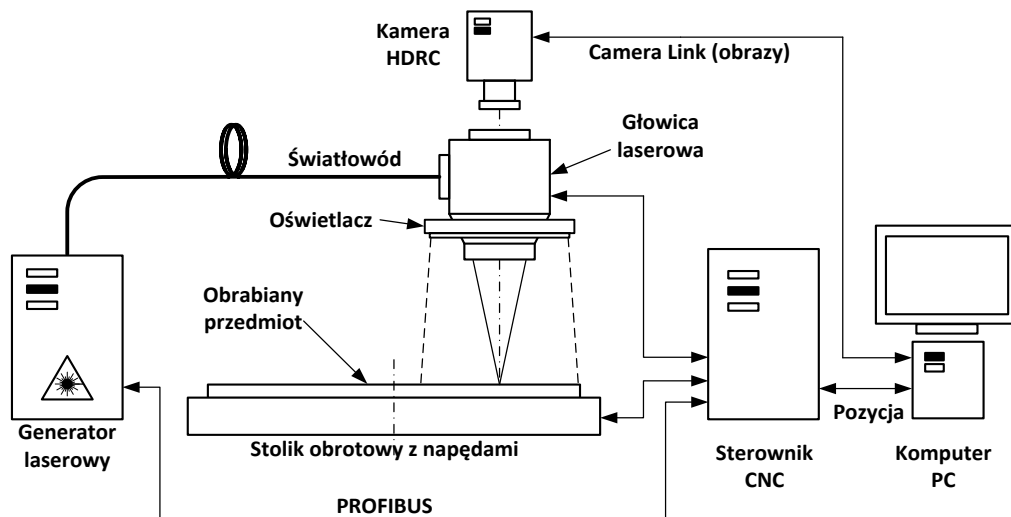
### 3. KONFIGURACJA SPRZĘTOWA SYSTEMU

Na rys. 3 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowo-technologicznego. Głównym komponentem tego systemu jest obrabiarka laserowa TruLaser Cell 3010 (sterownik CNC SINUMERIK 840D, dokładność pozycjonowania  $0,015$  mm), z głowicą laserową i źródłem promieniowania laserowego TruDisk 4008. System pomiarowy opracowano z użyciem kamery o rozdzielczości  $1312 \times 1082$ , o podwyższonej dynamice (HDRC – CMOS), z interfejsem CL (PhotonFocus MV1-D1312-160-CL-12) wraz z dedykowanym układem optycznym oraz oświetlaczem współosiowym. Do akwizycji obrazów użyto karty *frame grabber* (Silicon Software microEnable IV). Funkcjonalność monitorowania procesu i wyznaczania trajektorii, w której skład wchodzi: akwizycja obrazu, rejestrowanie pozycji osi obrabiarki podczas przejazdów pomiarowych oraz przetwarzanie obrazów i wyznaczania trajektorii, została zaimplementowana na komputerze PC.

Komunikacja pomiędzy sterownikiem obrabiarki CNC oraz komputerem PC bazuje na komunikacji OPC. Technika ta pozwala na odczytywanie przez komputer PC stanów programu CNC oraz współrzędnych kolejnych punktów pomiarowych, w których dokonywana jest akwizycja obrazu.

Akwizycja obrazów odbywa się podczas przejazdu pomiarowego po trajektorii nominalnej, bez aktywnej wiązki laserowej. W przypadku złącza wykonywanego na płaszczyźnie XY głowica porusza się w osiach X i Y zakreślając trajektorię o kształcie okręgu. Natomiast w przypadku złącza na płaszczyźnie walcowej głowica jest ustawiona nieruchomo pod kątem prostym do osi obrotu walca, a ruch względny głowicy i elementu obrabianego realizowany jest przez obrót stolika obrabiarki. Synchronicznie z rejestracją obrazów, podczas przejazdu pomiarowego, są odczytywane koordynaty określające położenie głowicy laserowej.





Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowo-technologicznego



Rys. 4. Zarejestrowane obrazy rozpatrywanych krawędzi łączenia a) krawędź rejestrowana na płaszczyźnie, b) krawędź rejestrowana na powierzchni walcowej

#### 4. KALIBRACJA UKŁADU POMIAROWEGO

W celu obrazowania obszaru złącza poprzez układ optyczny głowicy laserowej z soczewką kolimującą  $f_k=200\text{mm}$  i soczewką skupiającą  $f_s=200\text{mm}$  za pomocą w.w. kamery, o wielkości matrycy 1", konieczne było opracowanie dedykowanego toru

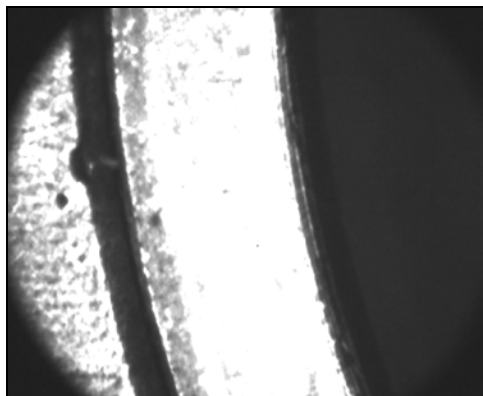
optycznego. Tor optyczny zaprojektowano i zoptymalizowano przy pomocy środowiska symulacyjnego Zemax [11].

Dla wyznaczania pozycji oraz rozmiarów złącza spawanego istotnym było określenie współczynnika skali pozwalającego przeliczyć wymiary rejestrowane na obrazie w pikselach na jednostki długości. Kalibrację skali układu pomiarowego oraz weryfikację skalowania przeprowadzono z użyciem wzorca kalibracyjnego (4X Multifunctional Target on Opal Glass firmy Edmund Optics). Współczynnik skali wyznaczono na podstawie serii trzydziestu prób najazdu głowicy na ustaloną pozycję obrazowania wzorca kalibracyjnego. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że w przypadku rejestrowanych obrazów obejmujących pole widzenia 14.033 mm na 11.573 mm (przy powiększeniu układu optycznego kamery 0.75x) uzyskiwane wartości współczynnika skali zmieniają się maksymalnie o jeden piksel (przy rozdzielczości matrycy 1312x1082 pikseli). Na podstawie pomiarów określono współczynnik skalowania 93.538 [piksel/mm] przy odchyleniu standardowym równym 0.038 [piksel/mm]. Uznano, że zmienność powyższych współczynników może zostać zaniedbana bez utraty założonych dokładności systemu.

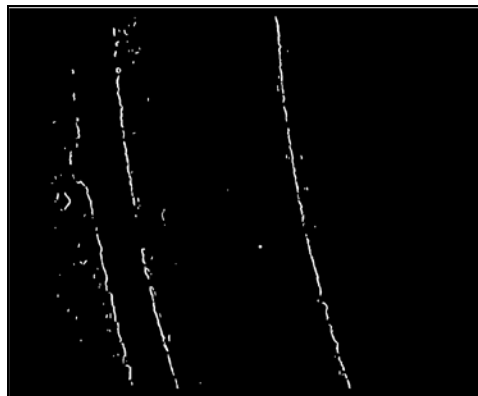
## 5. ALGORYTM WYZNACZANIA ODCHYLEK

Pierwszym zadaniem opracowanego algorytmu przetwarzania obrazów jest wykrywanie krawędzi złącza. Punkty te będą podstawą do późniejszego dopasowania modelu opisującego jego kształt. Detekcję krawędzi przeprowadzono metoda gradientową, stosując filtr z maską Sobela [12]. Uzyskany wynik filtracji pokazano na rys. 6.

a)



b)



Rys. 5. Obrazy złącza a) zarejestrowany, b) po filtracji gradientowej

Z uwagi na ograniczone pole widzenia kamery, zarejestrowany obraz obejmuje jedynie fragment złącza, stąd na obrazie po filtracji gradientowej krawędzie złącza są

widoczne są w postaci zakrzywionych odcinków (rys. 7b). Filtr gradientowy oprócz punktów reprezentujących krawędzie łączonych elementów wykrywa również szereg punktowych zakłóceń, związanych z uszkodzeniami powierzchni. Zakłócenia te obrazują się jako otwarte lub zamknięte krzywe o długościach krótszych niż 30 pikseli. Dla ich filtracji, w pierwszym kroku usuwane są wszystkie krawędzie posiadające kształt krzywej zamkniętej, w drugim, wszystkie krawędzie o długości krótszej niż 30 pikseli.

Następnie, realizowana jest transformacja układu współrzędnych obrazowych do układu metrycznego, z użyciem wyznaczonego współczynnika skali.

Dopasowywanie modelu pełnego złącza (okręgu) jedynie do fragmentu widocznego na pojedynczym obrazie (rys. 6), obarczone jest znacznym rozrzutem w stosunku do całego przejazdu. Stąd, dokonano połączenia poszczególnych widoków cząstkowych, tworząc widok globalny. W tym celu przekształcono współrzędne punktów krawędzi każdego obrazu w układzie lokalnym do globalnego układu współrzędnych, odpowiadającego układowi kinematycznemu obrabiarki. Pierwsza transformacja opisuje przejście z układu współrzędnych obrazu do lokalnego układu współrzędnych głowicy laserowej (równanie 1). Układ optyczny kamery jest na stałe zintegrowany z głowicą laserową, a oś optyczna wiązki laserowej wyznaczającej środek układu współrzędnych głowicy laserowej ma stałe położenie na zdjęciu, dlatego też transformacja układu współrzędnych z układu zdjęcia do układu głowicy ma postać translacji o stałej wartości, dla wszystkich wykonanych zdjęć.

$${}^f_g T(k) = {}^f_g T(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & {}^f_g T_x \\ 0 & 1 & {}^f_g T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:  ${}^f_g T_x, {}^f_g T_y$  - współrzędne x i y początku układu współrzędnych zdjęcia w układzie głowicy,

f – układ współrzędnych obrazu, g – układ współrzędnych głowicy .

W przypadku konfiguracji układu kinematycznego obrabiarki dla złącza na powierzchni walcowej (rys. 2b), stosowana jest transformacja opisana równaniem 2.

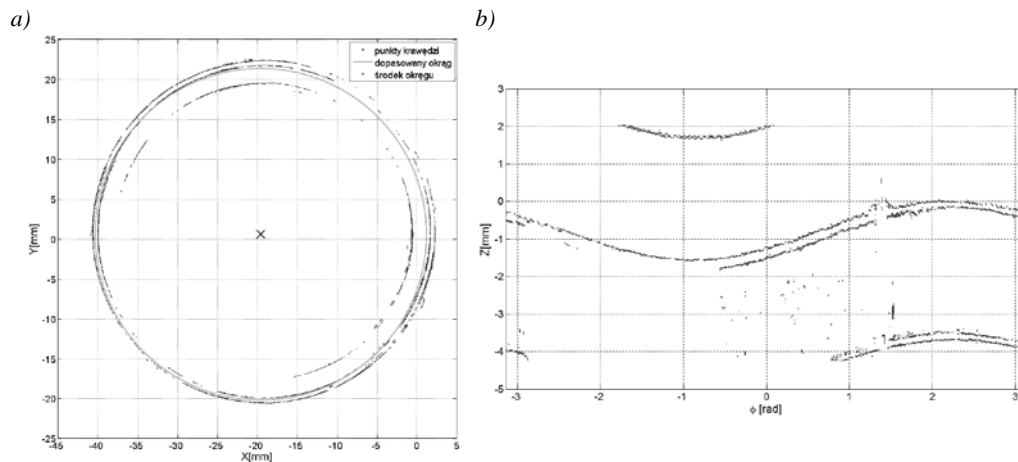
$${}^s_o T(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & {}^s_o T_x(k) \\ 0 & 1 & {}^s_o T_y(k) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie: o – układ współrzędnych obrabiarki.

Oznacza to, że transformacja wyrażona jest wektorem translacji do pozycji obrazowania głowicy. Z kolei transformacja dla spiny na powierzchni walcowej przyjmuje postać obrotu wokół osi Z o kąt równy kątowi obrotu stolika obrabiarki wynikającemu z odległości między poszczególnymi obrazami. Ponieważ dokonywana jest transformacja z dwuwymiarowego układu współrzędnych do układu trójwymiarowego oprócz kąta obrotu stolika obrabiarki wymagana jest również informacja o promieniu  $R$  umieszczenia płaszczyzny obrazowania. Zaproponowany układ pomiarowy nie pozwala na określenie odległości powierzchni obrabianej względem głowicy laserowej, stąd przyjęto wartość nominalną promienia wynikającą z geometrii elementu (równanie 3).

$${}^gT(k) = {}^gT_y {}^gT_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & R \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\varphi_k) & -\sin(\varphi_k) & 1 & 0 \\ \sin(\varphi_k) & \cos(\varphi_k) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Po dokonaniu transformacji układu współrzędnych dla wszystkich obrazów, przed dopasowaniem modelu, punkty wykryte na każdym obrazie zostają połączone tworząc zbiór opisujący całą trajektorię. Otrzymane w ten sposób zbiory, dla obu przypadków wykonywanych złączy, przedstawiono na rys. 7.



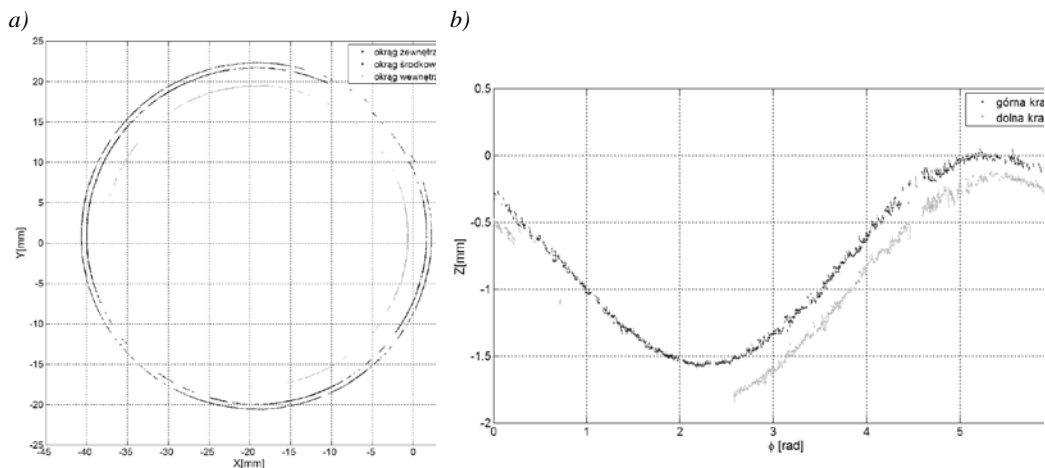
Rys. 6 Zbiór punktów krawędzi złącza o kształcie okręgu a) wykonywanego na płaszczyźnie, b) wykonywanego na powierzchni walcowej

Na wyznaczonych zbiorach (rys. 7) widoczne są zarysy kilku krawędzi pochodzących od każdego z łączonych elementów, jak i zakłócenia związane

z uszkodzeniem powierzchni. Zakłócenia te fałszują prawidłowe dopasowanie modelu matematycznego.

W celu poprawy dokładności dopasowania modeli, opracowano metodę klasyfikacji punktów złącza oraz filtracji zakłóceń. Klasyfikacja konturów na poszczególne zarysy bazuje na automatycznej analizie histogramu reszt. Histogram reszt generowany jest na podstawie niedopasowania każdego z punktów zbioru do globalnego modelu aproksymującego (funkcja okręgu albo sinus). Klasyfikacja bazuje na drzewie binarnym, tj. na podstawie otrzymanych histogramów punkty zbioru dzielone są na dwie klasy. Po osiągnięciu podziału elementarnego, każda z klas zostaje przefiltrowana w celu usunięcia zakłóceń. W tym celu, do każdej z klas dopasowywany jest odpowiedni dla złącza model matematyczny oraz obliczane są residua niedopasowania poszczególnych punktów. Na podstawie obliczonych reszt generowany jest histogram i wyznaczany jego środek ciężkości. Wszystkie punkty znajdujące się w odległości większej niż założony przedział wokół środka ciężkości histogramu zostają odrzucone, natomiast punkty pozostawione służą do ostatecznego dopasowania modelu matematycznego złącza (rys. 8). Trajektorja rzeczywistego prowadzenia wiązki laserowej obliczana jest na podstawie średniej ze modeli matematycznych obu krawędzi złącza.

W przypadku złącza wykonywanego na płaszczyźnie (rys. 2a) parametry korekcji trajektorii podawane są w formie wektora przesunięcia układu współrzędnych na płaszczyźnie, będącego różnicą wyznaczonego środka modelu i środka nominalnej trajektorii głowicy laserowej. Dla złącza wykonywanego na powierzchni walcowej (rys. 2b) parametrami korekcyjnymi są parametry dopasowanej do punktów krawędzi funkcji sinus – amplituda, przesunięcie fazowe oraz translacja w osi Z.

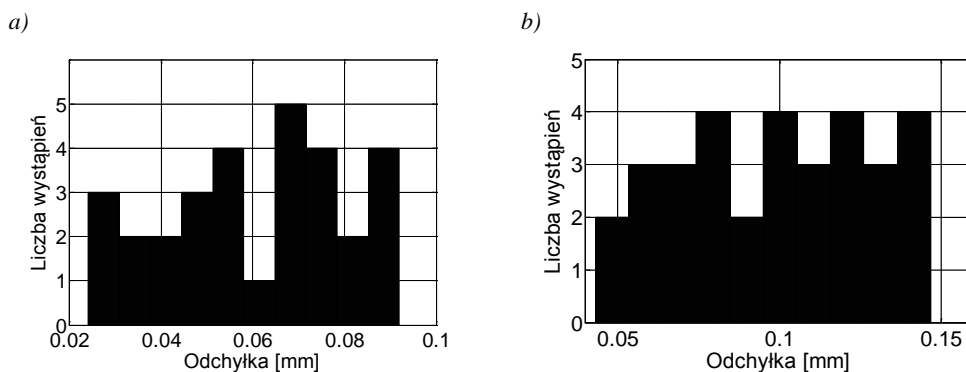


Rys. 7. Zbiór punktów krawędzi złącza o kształcie okręgu po klasyfikacji oraz filtrowaniu a) wykonywanego na płaszczyźnie, b) wykonywanego na powierzchni walcowej

W przypadku złącza na płaszczyźnie układ współrzędnych obrabiarki zostaje przesunięty do punktu wskazanego przez obliczony wektor translacji, natomiast dla złącza na powierzchni walcowej podczas wykonywania spoiny głowica laserowa wykonuje ruch w osi Z zakreślając trajektorię zgodną z wyznaczonymi parametrami funkcji sinus aproksymującej kształt złącza w zależności od kąta obrotu stolika.

## 6. WERYFIKACJA DZIAŁANIA SYSTEMU

Weryfikację poprawności działania układu przeprowadzono poprzez wykonanie serii trzydziestu cykli roboczych systemu. Obrabiane elementy zostały zamontowane w uchwytach montażowych z błędami w stosunku do pozycji nominalnej w zakresie od 0 do 2 mm. Następnie uruchomiono opracowany system pomiarowo-technologiczny korekcji trajektorii spawania laserowego. Wyniki testów przedstawiono na rys 9.



Rys. 8. Rozkłady wyników otrzymanych podczas testów systemu dla złącza na a) powierzchni płaskiej, b) powierzchni walcowej

W rezultacie dla złącza wykonywanego na płaszczyźnie otrzymano maksymalny błąd realizacji trajektorii 0.092 mm. Dla złącza wykonywanego na powierzchni walcowej uzyskano maksymalną odchyłkę 0.147 mm.

## 7. WNIOSKI

W artykule przedstawiono system pomiaru położenia złącza oraz sterowania głowicą obrabiarki przeznaczony dla procesów spawania laserowego. System przygotowany został dla złączy o kształcie okręgu spawanych na powierzchni płaskiej oraz na powierzchni walcowej. Opracowane metody akwizycji danych, przetwarzania i analizy obrazów oraz oświetlenia, tworzą system sterowania adaptacyjnego pozwalający zwiększyć elastyczność stanowiska obróbczego, zwiększyć tolerancje wykonanych prefabrykatów oraz zmniejszyć nakłady czasowe na precyzyjne

pozycjonowanie obrabianego elementu na stanowisku.

W większości aplikacji przemysłowych do spawania laserowego wykorzystywane są głowice laserowe skupiające promieniowanie do plamki o średnicy w zakresie od 0,4 do 1 mm. Wyznaczona poprzez weryfikację dokładność systemu pozycjonowania jest kilkukrotnie większa od wykorzystywanych średnic plamek lasera, co pozwala na dostateczną korektę trajektorii głowicy, przy której możliwe jest wykonanie poprawnego złącza spawanego na całej jego długości.

Przedstawione rozwiązanie charakteryzuje się również możliwością współosiowej integracji układu pomiarowego z torem optycznym głowicy laserowej, dzięki czemu ruchy głowicy nie są w żaden sposób ograniczone.

Istotnymi czynnikami wpływającymi na dokładność pozycjonowania są: dynamika układów kinematycznych obrabiarki, odległość głowicy od elementów, geometria złącza oraz struktura powierzchni elementów spawanych. Tolerancje pozycjonowania układów kinematycznych obrabiarek stanowią podstawowy czynnik wpływający i ograniczający dokładność systemu pozycjonowania. Geometria oraz sposób wykończenia powierzchni elementów są czynnikami, które wymagają opracowania dedykowanych algorytmów oraz modeli matematycznych dla każdego przypadku, w zakresie akwizycji i przetwarzania obrazów, jak również sterowania.

## PODZIĘKOWANIA

*Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Oś priorytetowa 1. Badania i rozwój nowoczesnych technologii, pt. „Zaprojektowanie siedziska samochodowego nowej generacji w firmie Sitech” (WND-POIG.01.04.00-02-067/12).*



## LITERATURA

- [1] POPRAWA R., *Tailored Light 2: Laser Application Technology*, Springer, 2011.
- [2] KLIMPEL A., *Technologie laserowe w spawalnictwie*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- [3] REGAAR B., KAIERLE S., POPRAWA R., *Seam-tracking for high precision laser welding applications—Methods, restrictions and enhanced concepts*, W: *Journal of Laser Applications*, 2009.
- [4] WILSON M., *The role of seam tracking in robotic laser welding and bonding*, *The Industrial Robot*, 2002.
- [5] TSAI M., LEE H., ANN N., *Machine vision based path planning for a robotic golf club head welding system*, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011.

- [6] YE Z., FANG G., CHEN S., DINHAM M., *A robust algorithm for weld seam extraction based on prior knowledge of weld seam*, Sensor Review, 2013.
- [7] BAE K. Y., LEE T. H., AHN K. C., *An optical sensing system for seam tracking and weld pool control in gas metal arc welding of steel pipe*, Jurnal of Materials Processing Technology, 2002.
- [8] DORSCH F., PRITZNER D., BRAUN H., *Improved continuous tube welding due to unique process sensor system and process control*, Physics Procedia, 2013.
- [9] SICILIANO S., KHATIB O., *Springer Handbook of Robotics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [10] REGAAR B., KAERLE S., HEINEMANN S., PATWA R., STEINBRECHER J. P., *Welding head for self-guided laser welding*, ICALEO, 2009.
- [11] GEARY J. M., *Introduction to Lens Design: With Practical Zemax Examples*, Willmann-Bell, 2002.
- [12] R. TADEUSIEWICZ, KOROHONDA P., *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*, Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, 1997.



# ZASTOSOWANIE NOWEJ INTERFERENCYJNEJ METODY POMIARU MIKRO ODCHYLEŃ KĄTOWYCH DO STABILIZACJI KIERUNKU WIĄZKI LASERA

Marek DOBOSZ<sup>1</sup>, Olga IWASIŃSKA-KOWALSKA<sup>1</sup>

## 1. ZNACZENIE POMIARÓW MIKROODCHYLEŃ KĄTOWYCH W PRAKTYCE

### 1.1. ZNACZENIE STABILNOŚCI KĄTOWEJ OSI WIĄZKI LASEROWEJ

Jedną z bardziej użytecznych cech wiązki światła laserowego jest fakt, że może się ona propagować na duże odległości definiując przy pomocy własnej osi linię prostą. Z kolei ta sama wiązka laserowa po zogniskowaniu tworzy przewężenie, którego centrum definiuje w przestrzeni punkt. Obie wymienione cechy wiązki laserowej są ze sobą związane, ponieważ odchylenie kątowe osi wiązki powoduje liniowe przemieszczenia jej przewężenia w płaszczyźnie ogniskowej soczewki.

Wymienione właściwości wiązki laserowej wykorzystywane są w olbrzymiej liczbie układów optycznych zarówno w badaniach naukowych jak i w nowoczesnej technice. Przestrzenny dryft wiązki laserowej określany jest jako „beam pointing stability” [1] lub w odniesieniu do samego lasera jako: „laser pointing”. Wspomniany dryft obejmuje liniowe, poprzeczne przemieszczenia osi wiązki oraz jej odchylenia kątowe. W praktyce czynnikiem najbardziej istotnym są odchylenia kątowe wiązki.

Detekcja odchylenia kątowego wiązki laserowej zwana „optical-beam deflection sensing” (OBDS) - w dzisiejszej praktyce dotyczy wiązki laserowej - stosowana jest w niezwykle szerokiej gamie technik pomiarowych. Do najważniejszych można zaliczyć: wspomniane wyżej pomiary „beam pointing stability”, detekcję wykorzystującą czujniki mikrodźwigniowe (tzw. cantilevers), w mikroskopach sił atomowych, metody fototermiczne wykorzystujące detekcję termicznej zmiany gęstości powietrza (efekt mirażu), profilometrię optyczną, detekcję tworzonych

---

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej,  
ul. Św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa

w powietrzu fal ultradźwiękowych, badania odkształceń elementów mechanicznych maszyn i wiele innych. Ogólnie we wszystkich układach pomiarowych, w których wielkość mierzoną wyznacza się za pośrednictwem pomiaru odchylenia kąтового wiązki laserowej (np. pomiar odchylenia kąтового zwierciadła odbijającego wiązkę), kluczowe stają się dwa elementy: uzyskanie stabilnej kątowno użytej na wejściu wiązki laserowej, oraz zastosowany sposób pomiaru jej odchylenia powstałego w wyniku zadziałania wielkości mierzonej.

## 1.2. METODY POMIARU KIERUNKU OSI WIĄZKI LASEROWEJ

W celu pomiaru położenia kąтового wiązki laserowej stosuje się obecnie tzw. analizatory profilu wiązki („beam profilers”), fotodiody czułe na położenie plamki światła (position sensitive diodes), fotodetektory dzielone (tzw. split detectors lub bicell detector), lub fotodiody kwadrantowe (quadrant photodiodes). Wszystkie wymienione urządzenia pozwalają ustalić pozycję plamki światła na fotodetektorze [2,3].

Znane techniki detekcji odchylenia kąowego wiązki (OBDS), poza wyjątkami, pozwalają uzyskać maksymalną rozdzielczość rzędu 1  $\mu$ rad. Jednak podstawową wadą większości czujników tego rodzaju w szczególności w zastosowaniu do pomiaru niestabilności przestrzennej osi wiązki laserowej są duże wymiary gabarytowe urządzeń mieszczące się w granicach od 100 do 1000 mm. Z reguły im większa czułość metody tym większe wymiary układu pomiarowego. W efekcie systemy te mogą być zastosowane do pomiaru tej cechy wiązki w warunkach laboratoryjnych. Z powodu tego ograniczenia nie ma możliwości użycia tych metod do systemu aktywnej stabilizacji wiązki, który byłby wprowadzony do konstrukcji lasera.

Możliwość uniknięcia wspomnianych ograniczeń opisanych wyżej technik pomiarowych dają czujniki określane jako „*angle sensitive devices*” (ASD). Sensory tego typu są w stanie mierzyć odchylenia kąowe wiązki laserowej bez względu na odległość fotodetektora od punktu obrotu wiązki. Największą grupę tego typu sensorów stanowią urządzenia wykorzystujące kąt graniczny całkowitego wewnętrznego odbicia (w skrócie kąt krytyczny) [4-6]. Podstawowa wersja zawiera prosty pryzmat, na którego jedną z powierzchni pada wiązka pod kątem bliskim wartości granicznej. Stosowany jest pomiar parametrów światła odbitego jak i transmitowanego.

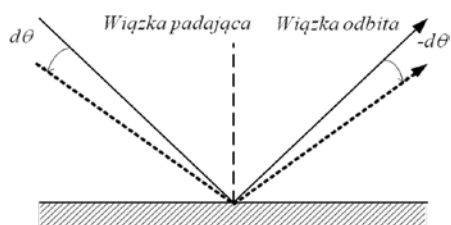
Inną grupę czujników ASD stanowią układy interferencyjne. Do tej klasy jak i równocześnie do poprzedniej można zaliczyć czujnik z rezonatorem, który stanowi szczelina powietrzna w układzie całkowitego wewnętrznego odbicia [7].

Autorzy proponują układ interferencyjny typu ASD [8,9], ale w odróżnieniu od wszystkich dotychczasowych rozwiązań jest to konfiguracja, w której odchylenie kąowe wiązki na wejściu generuje zmianę okresu prążków interferencyjnych. Zmiana ta jest mierzona przez odpowiedni układ fotodetekcyjny.

## 2. NOWA METODA POMIAROWA

### 2.1. IDEA – PODSTAWY TEORETYCZNE

Znane są liczne rodzaje interferometrów dwuwiazkowych do pomiaru różnicy faz między interferującymi falami świetlnymi. We wszystkich tego typu systemach odpowiedni element światłdzielący rozdziela wiązkę lasera na dwie części tworząc dwa tzw. ramiona interferometru. W tak powstałych dwóch torach interferometru wzajemnie koherentne fale świetlne doznają szeregu odbić, najczęściej od płaskich powierzchni zwierciadlanych. Załóżmy, że w obu ramionach interferometru propagowane są wiązki światła o płaskim czole fali. Załóżmy, że wiązka wejściowa interferometru (padająca na pierwszy element światłdzielący), odchyła się o niewielki kąt. W trakcie odbicia wiązki od dowolnej płaskiej powierzchni odbijającej następuje zmiana zwrotu odchylenia wiązki wejściowej na przeciwny co pokazuje rys.1.



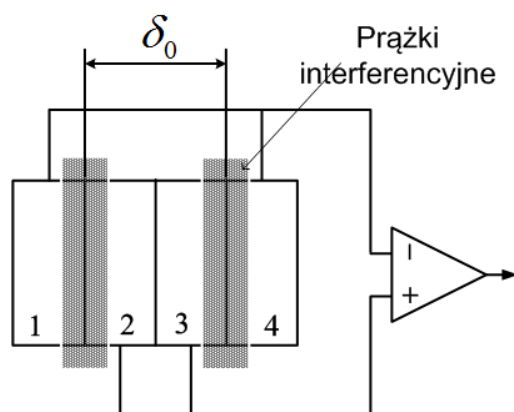
Rys. 1. Zmiana kąta odbicia wiązki świetlnej od płaszczyzny zwierciadła na skutek zmiany kąta padania

Jeżeli w każdym z dwóch ramionach interferometru występuje taka sama liczba odbić i wiązka wejściowa odchyli się kątowno, to w jednakowy sposób odchylią się obie wiązki interferujące na wyjściu takiego układu. W efekcie nie zmieni się kąt interferencji, zatem nie zmieni się okres prążków interferencyjnych. Natomiast jeżeli w jednym torze interferometru występuje parzysta a w drugim nieparzysta liczba odbić, (różnica liczby odbić jest nieparzysta), to odchylenie jednej z interferujących na wyjściu interferometru wiązek, będzie miało przeciwny zwrot niż odchylenie drugiej z interferujących wiązek. W takim przypadku zmieni się kąt interferencji o wartość  $2d\theta$ . Spowoduje to zmianę  $d\delta$  okresu obserwowanych prążków interferencyjnych. Zmianę tę można opisać zależnością:

$$d\theta \approx \frac{\lambda}{2d\delta}. \quad (1)$$

Na podstawie zaobserwowanej zmiany okresu prążków można wyliczyć wartość odchylenia kątownego, co jest istotą opracowanej metody. Zmiana okresu prążków może być zmierzona z wysoką rozdzielczością przy użyciu wielu typów układów fotodetekcyjnych (np. można użyć kamerę CCD z odpowiednim oprogramowaniem

do analizy obrazu, układ odpowiednio połączonych fotoelementów, fotolinijkę). Przykład zastosowanego w badaniach układu fotodetekcyjnego przedstawiono na rys.2.



Rys. 2. Prosty układ fotodetekcyjny do pomiaru zmian okresu prążków

W układzie takim mierzony sygnał można opisać przybliżoną zależnością

$$dI \approx Ad\theta \quad , \quad (2)$$

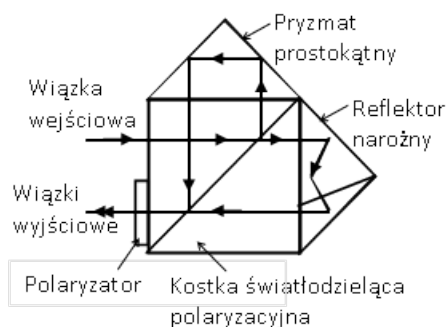
gdzie:  $dI$  jest zmianą wyjściowego sygnału prądowego,  $d\theta$  jest odchyleniem kątowym wiązki,  $A$  jest wartością stałą.

## 2.2. KONFIGURACJA INTERFEROMETRU

Można skonstruować wiele praktycznych układów interferometrycznych realizujących postulat nieparzystej liczby odbić w jednym ramieniu i parzystej liczby w drugim. Rolę zwierciadeł w ramionach interferometru mogą pełnić pryzmaty optyczne z powierzchnią odbijającą lub światłodzielącą, pochyloną odpowiednio do kierunku propagacji wiązek. Układ, w którym realizowano badania wstępne metody przedstawiono na rys. 3. Przedstawia zwarte rozwiązanie, które może być zrealizowany przy użyciu odpowiednio sklejonych ze sobą handlowo dostępnych elementów optycznych.

Składa się on z polaryzacyjnej kostki światłodzielącej rozdzielającej wiązkę wejściową na dwie. Jedna z nich (na rysunku transmitowana przez powierzchnie światłodzielącą) biegnie do reflektora w postaci pryzmatu narożnego, gdzie ulega trzykrotnemu odbiciu. Druga odbita przez powierzchnię dzielnika biegnie do

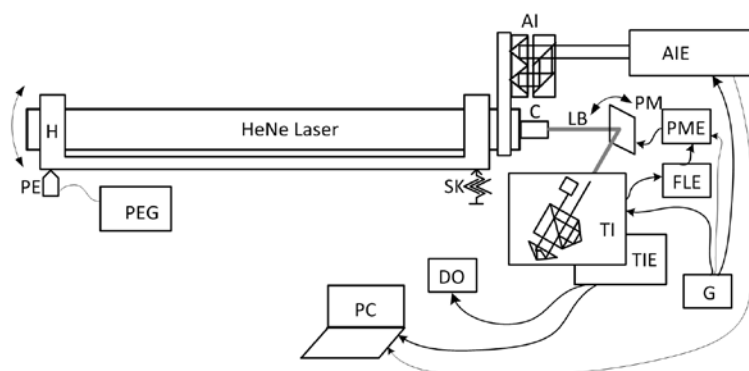
pryzmatu prostokątnego, w którym ulega dwukrotnemu odbiciu. Powracając kierowana jest do strefy interferencji, przez kolejne odbicie na powierzchni światłodzieliącej. Po przejściu przez polaryzator wiązki biegną do układu fotodetektora.



Rys. 3. Propozycja zwartego układu interferometru z nieparzystą liczbą różnicy odbić w ramionach

### 2.3. STANOWISKO DOŚWIADCZALNE I PRZEBIEG BADAŃ

Schemat ideowy zastosowanego układu doświadczalnego przedstawia rys. 4.



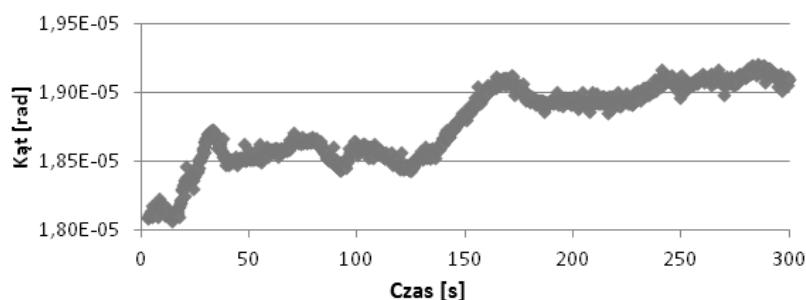
Rys. 4. Schemat układu doświadczalnego

Do generacji odchyłeń wiązki laserowej użyto lasera HeNe. Odchylenia kątowe wiązki zadawane były ręcznie za pomocą śruby mikrometrycznej SK (wstępnie) lub przy użyciu przetwornika piezoelektrycznego PE sterowanego układem elektronicznym PEG. Odchylenia były mierzone interferometrem w konfiguracji do pomiaru kątów składającym się z głowicy AIE oraz zespołu optycznego AI. Wiązka lasera LB kierowana była do interferencyjnego detektora kąтового TI (zbudowanego wg konfiguracji pokazanej na rys. 3) za pomocą zwierciadła PM, sterowanego kątowno

piezoelektrycznie zespołem elektronicznym PME. Zwierciadło PM zostało wykorzystane do korekcji niestabilności osi wiązki lasera w pętli sprzężenia zwrotnego. Sygnał sterujący pętli generowany był przez układ elektroniczny TIE, odbierający sygnał z interferometrycznego detektora przemieszczeń kątowych wiązki TI. Sygnały obserwowano za pomocą cyfrowego oscyloskopu DO a dane pomiarowe rejestrowano w komputerze PC.

#### 2.4. BADANIA NIESTABILNOŚCI KĄTOWEJ WIĄZKI LASERA

Specyfikacje techniczne oferowanych na rynku laserów HeNe wskazują na niestabilność kątowa emitowanej wiązki na poziomie od 0,01 mrad do 0,05 mrad. Szczególnie wysokie wartości „pointing stability” wykazują lasery stabilizowane częstotliwościowo, co wynika z działania ich pętli stabilizacji. W badaniach użyto stabilizowanego lasera HeNe, produkcji firmy Melles-Griot – model 05-STP-903, ze względu na jego wyjątkowo dobrą stabilność kątową wiązki, która zgodnie ze specyfikacją producenta nie powinna być gorsza niż 0,03 mrad/h. W praktyce, w przeciągu jednej godziny mieściła się w zakresie 0,01 mrad. Na rys. 5 pokazano przykład zmierzonych przy pomocy nowej metody fluktuacji kątowych wiązki tego lasera w czasie 5 min. Niestabilność warunków otoczenia nie pozwalała na tym etapie badań na pomiary w dłuższych okresach.



Rys. 5. Przykład fluktuacji kątowych wiązki lasera zmierzony nową metodą w czasie 5 minut

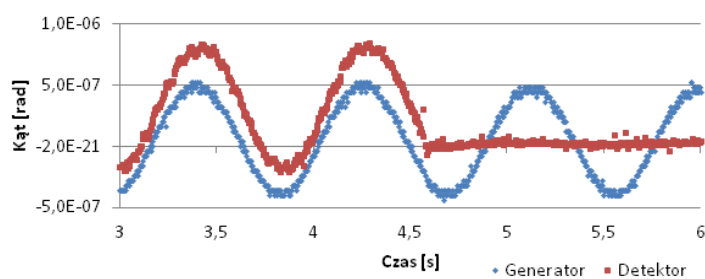
W krótkich okresach czasu obserwowany poziom fluktuacji nie przekraczał wartości 1,5  $\mu$ rad.

#### 2.5. BADANIA MOŻLIWOŚCI STABILIZACJI KIERUNKU OSI WIĄZKI

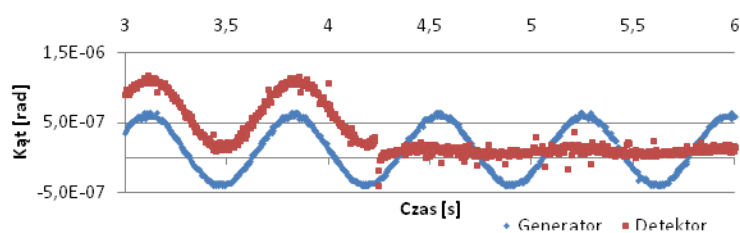
W trakcie badań efektywności stabilizacji lasera zadawano jego odchylenia wraz z wiązką za pomocą przetwornika piezoelektrycznego PE sterowanego sygnałem sinusoidalnym. W pierwszej próbie wprowadzono sinusoidalne zakłócenie kątowe o amplitudzie 1  $\mu$ rad, co ilustruje wykres rys. 6a. Punkty niebieskie reprezentują

zadawane odchylenia kątowe wiązki. Punkty czerwone stanowią wyniki pomiaru za pomocą detektora TI przed i po włączeniu pętli stabilizacji. Współczynnik redukcji wyniósł 0,1 a amplitudę drgań wiązki podczas kompensacji można oszacować na 0,1  $\mu\text{rad}$ . Rys. 6 b pokazuje analogiczne wyniki po ograniczeniu mocy wiązki do 20% wartości pierwotnej. W tym przypadku, ze względu na obniżony stosunek sygnału do szumu, uzyskano współczynnik redukcji 0,2.

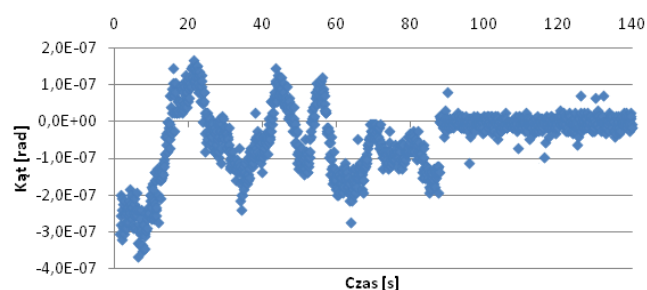
a)



b)



Rys. 6. Przykład uzyskanych wyników stabilizacji kierunku osi wiązki lasera z wykorzystaniem nowej metody pomiaru odchyłeń kątowych wiązki laserowej



Rys. 7. Przykład redukcji pierwotnych fluktuacji wiązki badanego lasera

Na rys. 7 pokazano przykład zastosowania badanej techniki do stabilizacji pierwotnych fluktuacji wiązki lasera. Wykres pokazuje moment przed i po zamknięciu pętli sprzężenia zwrotnego.

### 3. WNIOSKI

Przedstawiono nową niezwykle czułą interferencyjną metodę pomiaru kątowych odchyłeń wiązki laserowej. Proponowana metoda pozwala zbudować układ do pomiaru odchyłeń kątowych wiązki laserowej o rozdzielczości, co najmniej, o rząd wyższej niż obecnie większość stosowanych metod, przy wielkości zespołu pomiarowego mieszczącego się w kilku centymetrach sześciennych. Kompaktowa budowa czujnika predestynuje go do zastosowania w układzie stabilizacji kierunku wiązki lasera.

Przeprowadzone badania próbnego systemu stabilizacji położenia kąowego wiązki potwierdziły skuteczność systemu. Podczas badań, z użyciem nieoptymalizowanych zespołów elektronicznych, osiągnięto współczynnik redukcji równy 0,1 - co oznacza dziesięciokrotne wy tłumienie wprowadzonego zaburzenia kąowego. System pracował z bardzo wysoką rozdzielczością, pozwalając uzyskać stabilność wiązki na poziomie 0,1  $\mu$ rad.

### PODZIĘKOWANIA

*Autorzy dziękują mgr inż. Pawłowi Prawdzikowi za wykonanie pomiarów, których rezultatem są wykresy 5÷7. Praca została wykonana w ramach prac statutowych Wydziału Mechatroniki PW.*

### LITERATURA

- [1] "Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam parameters — Beam positional stability". International Standard ISO 11670, 2003.04.01.
- [2] "Measuring Laser Position & Pointing Stability - Application Note" Photon Inc. Precision Beam Profiling, Photonics Online, 2009;  
<http://www.photonicsonline.com/article.mvc/Measuring-Laser-Position-Pointing-Stability-002>.
- [3] <http://www.ophiropt.com/laser-measurement-instruments/beam-profilers/products/slit-based-profilers/nanoscan>.
- [4] GARCÍA-VALENZUELA A., SANDOVAL-ROMERO G. E., SÁNCHEZ-PÉREZ C., *High-resolution optical angle sensors: approaching the diffraction limit to the sensitivity*. W: Appl. Opt. Vol. 43, Nr22, 2004, 4311-4321, wraz z ze znajdującymi się tam odniesieniami.
- [5] GARCÍA-VALENZUELA A., PEÑA-GOMAR M., and VILLATORO J., *Sensitivity analysis of angle sensitive detectors based on a film resonator*. W: Opt. Eng. Vol 42, 2003, 1084-1092.
- [6] ZHANG A., HUANG P. S., *Total internal reflection for precision small-angle measurement*. W: Appl. Opt. Vol. 40, Nr 10, 2001, 1617-1622.
- [7] GARCÍA-VALENZUELA A., PEÑA-GOMAR M.C., VILLATORO J., *Sensitivity analysis of angle sensitive detectors based on a film resonator*. W: Opt. Eng. Vol. 42, 2003, 1084-1092.
- [8] DOBOSZ M., IWASIŃSKA-KOWALSKA O. *Interference method for ultra-precision measurement and compensation of laser beam angular deflection*. W: Applied Optics Vol. 53, nr1, 2014, 111-122.
- [9] DOBOSZ M., IWASIŃSKA-KOWALSKA O., Zgłoszenie patentowe. P-397925.



# **ANALIZA DOKŁADNOŚCI POMIARU ELEMENTÓW GEOMETRYCZNYCH Z ZASTOSOWANIEM TOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ**

Bartosz GAPIŃSKI<sup>1</sup>, Lidia MARCINIĄK-PODSADNA<sup>1</sup>

## 1. WSTĘP

Kontrola jakości wyrobów jest nieodłącznym elementem każdego procesu produkcyjnego, a w zależności od stawianych wymagań dobierane są odpowiednie urządzenia technologiczne i pomiarowe. Jedną z najsilniej rozwijających się od wielu lat gałęzi metrologii wielkości geometrycznych jest współrzędnościowa technika pomiarowa. Obejmuje ona cały szereg metod i urządzeń stykowych i bezstykowych pozwalających na optymalny dobór niepewności pomiaru przy zachowaniu wymaganego dla niego czasu realizacji.

Ograniczeniem wszystkich dotychczas stosowanych w technice współrzędnościowej urządzeń była konieczność zapewnienia dostępu do mierzonej powierzchni – w przypadku pomiarów stykowych umożliwienie styku końcówki z mierzonym obiektem, a w pomiarach bezstykowych możliwość obserwacji mierzonej cechy. Niedogodność ta została wyeliminowana w momencie pojawienia się na rynku pomiarowych tomografów komputerowych. Urządzenia te pracują w oparciu o promieniowanie rentgenowskie, pozwalające na prześwietlenie mierzonego obiektu. Dzięki temu możliwe jest na przykład wykrywanie wad materiałowych, pęknięć czy porów występujących wewnątrz materiału. Możliwy jest również pomiar przestrzeni zamkniętych, np. kanałów chłodzących w odlewach, a także ocena jakości montażu poprzez kontrolę rzeczywistej współpracy poszczególnych elementów. Znaczącym ograniczeniem dla tomografów jest dopuszczalna wielkość mierzonych obiektów wynikająca z pochłaniania promieniowania rentgenowskiego, a także cena

---

<sup>1</sup> Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych; pl. M. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań  
([bartosz.gapinski@put.poznan.pl](mailto:bartosz.gapinski@put.poznan.pl), [lidia.marciniak-podsadna@put.poznan.pl](mailto:lidia.marciniak-podsadna@put.poznan.pl))

urządzeń.

## 2. PODSTAWY TOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ

Słowo tomografia pochodzi od greckich słów „tomé” (przekrój) oraz „gráfein (zapisywać) [1]. W wyniku złożenia projekcji mierzonego obiektu wykonanych z różnych kierunków możliwe jest utworzenie obrazów przekrojowych (2D) i przestrzennych (3D). Analiza i obróbka poszczególnych projekcji odbywa się za pomocą komputera – stąd tomografia komputerowa (ang. Computed Tomography – CT). Jest ona rodzajem tomografii rentgenowskiej, metodą diagnostyczną pozwalającą na uzyskanie obrazów tomograficznych (przekrojów) badanego obiektu. Podstawy matematyczne tego wynalazku są zasługą austriackiego matematyka Johanna Radona, który w 1917 roku udowodnił, że obraz dwu- i trójwymiarowego obiektu można odtworzyć w sposób zupełny z nieskończonej ilości rzutów tego przedmiotu.

Tworzenie obrazu tomograficznego polega na pomiarze pochłaniania promieniowania przechodzącego przez badany obiekt. Objętość obiektu podzielona jest na małe komórki, zwane wokselaми, w których liniowy współczynnik pochłaniania promieniowania jest taki sam. Zrekonstruowany obraz przekrojowy jest ilościową mapą liniowego współczynnika pochłaniania promieniowania w wokselaх, wchodzących w skład skanowanej warstwy. Podstawowym sposobem badania jest skierowanie na badany obiekt wiązki promieniowania X i rejestracja jego natężenia na detektorze po drugiej stronie. Odkrywcą promieniowania X jest niemiecki naukowiec Wilhelm Röntgen, który w 1895 roku opublikował wyniki swoich badań w czasopiśmie Würzburgskiego Towarzystwa Fizyczno-Medycznego. Za swoje odkrycie Röntgen otrzymał w 1901 roku nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki. Promieniowanie X, przechodząc przez badany obiekt, doznaje osłabienia, które jest funkcją energii promieniowania oraz rodzaju i grubości badanego materiału. Zmiana natężenia promieniowania równoległej wiązki o jednakowej energii, przy przejściu przez obiekt, opisana jest zależnością (1) [2, 3, 4].

$$I = I_0 e^{-\mu g}, \quad (1)$$

gdzie:

$I$  – natężenie promieniowania po przejściu przez obiekt,

$I_0$  – początkowe natężenie promieniowania,

$\mu$  – liniowy współczynnik absorpcji promieniowania charakterystyczny dla danego materiału i określonej długości fali promieniowania X,

$g$  – grubość badanego materiału.

Liniowy współczynnik osłabienia promieniowania jest zależny od liczby atomowej i gęstości materiału obiektu. Jest on opisany przez prawo Bragga i Pierca (2) [2, 3].

$$\mu = k\lambda^3 Z^3, \quad (2)$$

gdzie:

$k$  – współczynnik proporcjonalności,

$\lambda$  – długość fali promieniowania,

$Z$  – liczba atomowa materiału.

Z zebranych danych komputer tomografu oblicza współczynniki pochłaniania dla każdego z wokseli tworzących obraz. Następnie ich wartości zostają przeliczone na tzw. liczby  $CT$  – nazywane czasem jednostkami Hounsfielda (ang. Hounsfield Units –  $HU$ ). Konwersja ta pozwala na przedstawienie obrazu w odcieniach skali szarości. Przeliczenie polega na odniesieniu wyznaczonego współczynnika pochłaniania do jego wartości dla wody:

$$1HU = K \frac{\mu_x - \mu_w}{\mu_w} \quad (1)$$

gdzie:

$K$  – stała wzmocnienia obrazu – stała zależna od systemu tomografu, indywidualna dla każdego urządzenia,

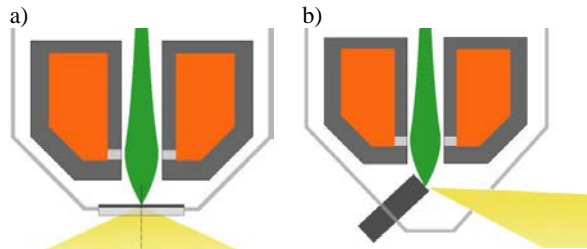
$\mu_x$  – wyznaczony współczynnik pochłaniania dla badanego materiału,

$\mu_w$  – wyznaczony współczynnik pochłaniania wody (wartość odniesienia).

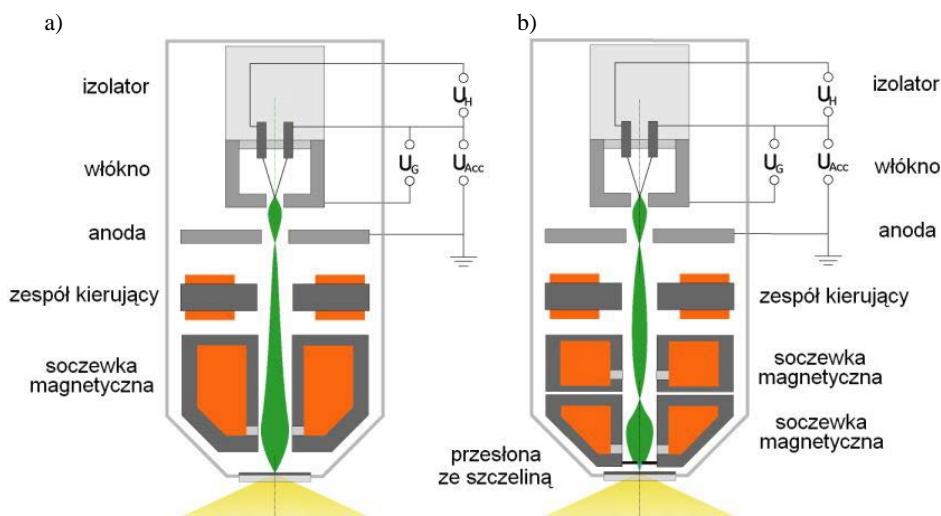
Stała  $K$  pierwszego tomografu „EMI scanner” wynosiła 500, a zakres rejestrowanych liczb  $CT$  wynosił od -500 (dla powietrza) do +500 (dla gęstych kości). Współczesne tomografy mają stałą  $K$  większą od 1000, a zakres liczb  $CT$  jest szerszy od -1000 do +4000 [4].

Źródłem promieniowania  $X$  w tomografach pomiarowych jest lampa rentgenowska. Pierwszą komercyjną lampę skonstruował w 1913 roku W. D. Coolidge. Zastosował on podgrzewanie włókna wolframowego do sformowania wiązki elektronów w szklanej rurce z próżnią. Współcześnie stosowane są dwa podstawowe typy lamp: transmisyjne i kierunkowe. Lampa transmisyjna pozwala na uzyskanie większego powiększenie, a lampa kierunkowa pozwala na uzyskanie większej mocy (rys. 1).

W celu uzyskania lepszej rozdzielczości tomografów stosuje się lampy typu mikrofokus i nanofokus (rys. 2). Zwłaszcza ta druga, wyposażona dodatkowo w przesłonę oraz stabilizację napięcia pozwala uzyskać plamkę o bardzo małej wielkości, nawet poniżej 1 mikrometra.



Rys. 1. Lampy stosowane w tomografach: a) transmisyjna, b) kierunkowa [5]



Rys. 2. Lampy stosowane w tomografach: a) mikrofokus, b) nanofokus [5]

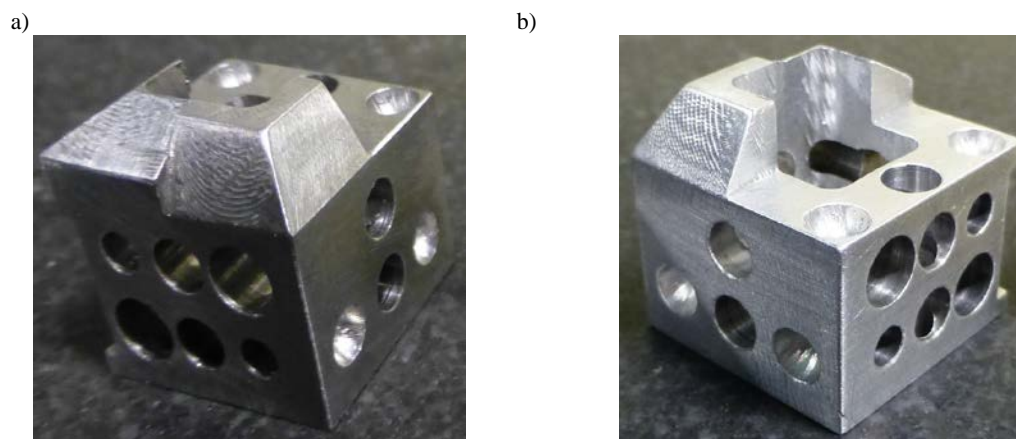
### 3. POMIARY WSPÓLRZĘDNOŚCIOWE Z ZASTOSOWANIEM TOMOGRAFU

Współrzędnościowa technika pomiarowa obejmuje wiele stykowych i bezstykowych metod pomiaru części. Każda z grup charakteryzuje się zaletami i wadami, co powoduje, iż urządzenia te wzajemnie się uzupełniają jeżeli chodzi o zastosowanie. Podobnie jest w przypadku tomografii komputerowej, która daje wiele nowych możliwości z nieniszczącymi pomiarami przestrzeni zamkniętych na czele. Znacznym ograniczeniem tych urządzeń jest możliwość penetracji większych elementów przy zachowaniu wysokiej dokładności pomiaru. W literaturze można znaleźć informacje dotyczące wymaganych parametrów lamp rentgenowskich w zależności od rodzaju materiału i gabarytów penetrowanego elementu. Należy jednak pamiętać, iż w przypadku pomiarów tomografem komputerowym istotna jest suma grubości ścianek przez, którą przechodzi promieniowanie X.

Tab. 1. Zależność pomiędzy napięciem lampy rentgenowskiej, a wielkością i rodzajem materiału obiektu mierzonego. Podane wartości przedstawiają orientacyjną możliwość penetracji mierzonego elementu przez wiązkę promieniowania rentgenowskiego [6].

Napięcie lampy rentgenowskiej	130 kV	150 kV	190 kV	225 kV	450 kV
Stal / ceramika	do 5 mm	do 8 mm	do 25 mm	do 40 mm	do 70 mm
Aluminium	do 30 mm	do 50 mm	do 90 mm	do 150 mm	do 250 mm
Tworzywo sztuczne	do 90 mm	do 130 mm	do 200 mm	do 250 mm	do 450 mm

Dla porównania możliwości urządzeń współrzędnościowych wykonano specjalną kostkę badawczą ze stali i z aluminium. Materiałem wyjściowym był sześcian o boku 20 mm, w którym wykonano otwory przelotowe o średnicach 3, 4 i 5 mm oraz sfery o promieniu 2 mm. Sfrezowano również pod różnymi kątami powierzchnię czołową i wyfrezowano w niej nieprzelotową kieszeń pozwalającą na redukcję grubości badanego materiału w niektórych przekrojach (rys. 3).



Rys. 3. Kostki badawcze: a) stalowa, b) aluminiowa

Tak przygotowane element poddano badaniu na dwóch klasycznych urządzeniach pomiarowych – współrzędnościowej maszynie pomiarowej oraz skanerze optycznym światła strukturalnego. Następnie kostkę poddano pomiarowi na trzech tomografach komputerowych. Ze względu na różną konstrukcję tomografów nie narzucono ścisłych parametrów pomiarowych – założono dokonanie pomiarów dla obu kostek pozwalające na uzyskanie jak najlepszego wyniku pod względem oceny parametrów

geometrycznych. Parametry pomiarowe przestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Zestawienie parametrów pomiarowych dla tomografów stosowanych w badaniach

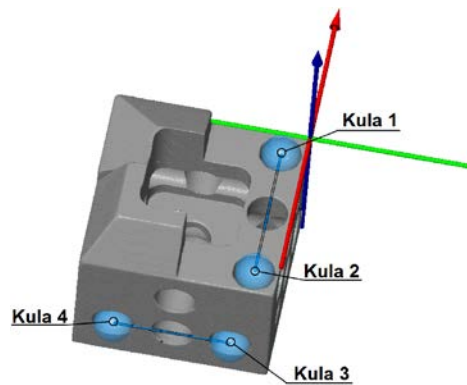
		Napięcie [kV]	Prąd [μA]	Liczba projekcji	Czas pomiaru [min]	Filtr
Tomograf 1	Aluminium	170	230	1000	120	Cu 0,25 mm
	Stal	225	340	1000	90	Cu 0,50 mm
Tomograf 2	Aluminium	155	103	-	53	Cu 1,50 mm
	Stal	225	210	-	150	Sn 2,50 mm
Tomograf 3	Aluminium	200	170	1600	53	Cu 0,50 mm + Sn 1,00 mm
	Stal	200	170	1600	70	Cu 0,50 mm + Sn 1,50 mm

W zależności od rodzaju stosowanego urządzenia realizowane są różne strategie pomiarowe. Pomiar stykowy na CMM może być realizowany w trybie impulsowym lub skaningowym. W praktyce, w zależności od wymagań, czasu i wyposażenia CMM uzyskujemy informację o mierzonym elemencie z kilku lub kilkunastu przekrojów o różnym zagęszczeniu punktów pomiarowych. Powoduje to powstanie luki informacyjnej, która w konsekwencji może spowodować niewykrycie maksymalnych odchyłek mierzonej cechy. Pod względem opisu powierzchni mierzonej korzystniej od CMM wypada skaner optyczny. Pozwala on na pomiar całej powierzchni nawet dla elementów o bardzo skomplikowanych kształtach. Dokładność odwzorowania zależy w większości od zastosowanego układu optycznego oraz rozdzielczości matrycy pomiarowej. Ograniczeniem dla skanera optycznego jest brak możliwości pomiaru powierzchni wewnętrznych (np. głębokich otworów i rowków) oraz mniejsza dokładność niż w przypadku pomiaru na CMM [7].

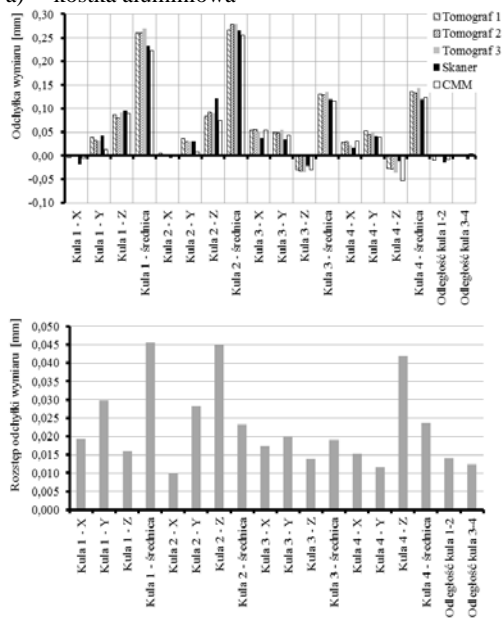
Tego typu problemy nie występują w przypadku pomiaru na tomografie komputerowym. Pozwala on na pomiar zarówno powierzchni zewnętrznych jak i wewnętrznych. W przypadku tomografu ograniczeniem jest wielkość elementu oraz zdolność pochłaniania promieni X przez materiał próbki. Rozwiązaniem dla elementów większych jest zastosowanie tomografu o większej mocy, przekłada się to jednak na spadek dokładności pomiaru.

W celu porównania możliwości pomiarowych CMM, skanera optycznego i tomografów porównano wyniki pomiaru kilku charakterystycznych wielkości dla kostki badawczej. W każdym przypadku wyznaczono układ współrzędnych części tak, by jego początek i kierunek oraz zwrot osi był zdefiniowany tak samo. Po wyznaczeniu układu współrzędnych dokonano oceny położenia i odległości dwóch

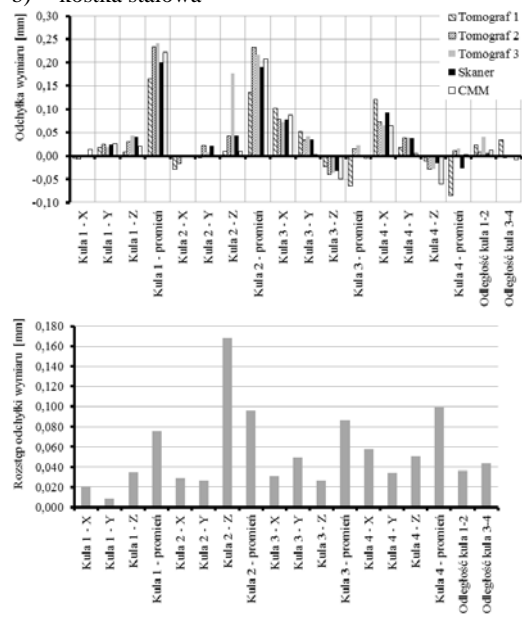
par sfer wewnętrznych, średnicy dwóch otworów oraz kąta pomiędzy nimi, a także wyznaczono kąt pomiędzy dwoma płaszczyznami.



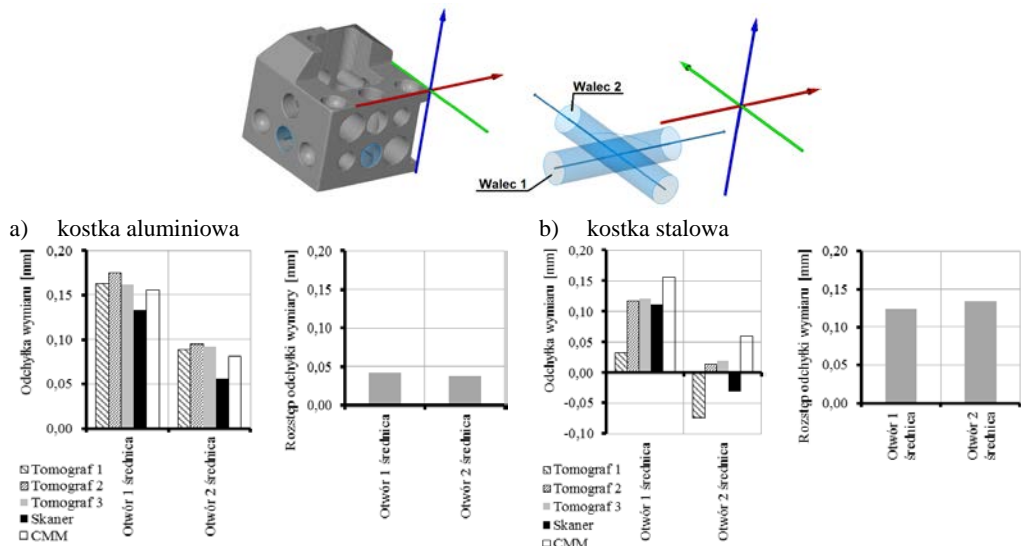
a) kostka aluminiowa



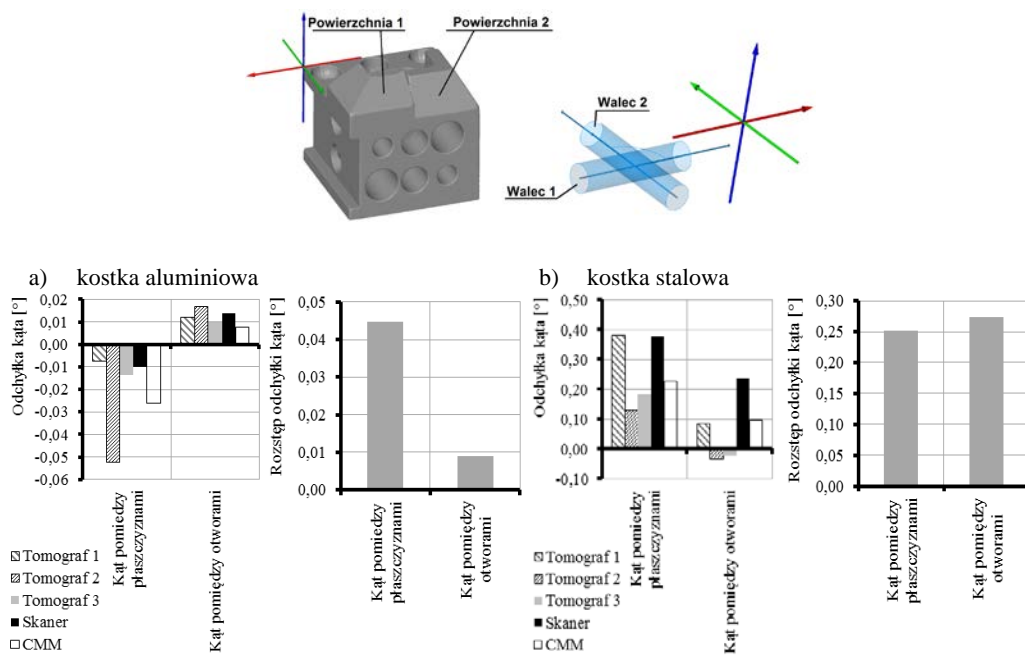
b) kostka stalowa



Rys. 4. Wyniki pomiaru położenia, średnicy oraz odległości kul dla 3 tomografów, CMM i skanera optycznego oraz rozstępu wartości uzyskanych z tych urządzeń: a) kostka aluminiowa, b) kostka stalowa



Rys. 5. Wyniki pomiaru średnicy oraz kąta pomiędzy otworami dla 3 tomografów, CMM i skanera optycznego oraz rozstępu wartości uzyskanych na tych urządzeniach: a) kostka aluminiowa, b) kostka stalowa



Rys. 6. Wyniki pomiaru kąta pomiędzy płaszczyznami oraz kąt pomiędzy osiami otworów dla 3 tomografów, CMM i skanera optycznego oraz rozstępu wartości uzyskanych na tych urządzeniach: a) kostka aluminiowa, b) kostka stalowa



#### 4. WNIOSKI

W artykule zaprezentowano wyniki pomiaru zrealizowanego dla dwóch kostek badawczych – stalowej i aluminiowej. Pomiary wykonano na współrzędnościowej maszynie pomiarowej, skanerze optycznym światła białego oraz trzech tomografach komputerowych. Dokonano oceny różnego typu cech odpowiadających codziennej praktyce pomiarowej, tj. średnica, odległość, kąt i położenie. Badania na CMM realizowane były w trybie impulsowym, zatem każda ze mierzonych cech opisana została kilkudziesięcioma punktami pomiarowymi. Pomiar z zastosowaniem skanera optycznego pozwala na opisanie mierzonego obiektu chmurą punktów, których dla poszczególnych cech jest od kilku do kilkudziesięciu tysięcy. Jednak ze względu na swoją konstrukcję urządzenie nie pozwala na pomiar głębiej położonych fragmentów otworów, co powoduje powstanie luki informacyjnej. Problemu takiego nie obserwuje się dla pomiaru na tomografie komputerowym jeśli dysponuje on odpowiednią mocą do penetracji mierzonego elementu. W omawianym przypadku dla kostki aluminiowej każdy z tomografów dysponował wystarczającą mocą, jednak dla kostki stalowej jeden z tomografów cechował się niewystarczającą mocą, co objawiło się wystąpieniem artefaktów pomiarowych na niektórych krawędziach uzyskanego obrazu przestrzennego. Artefakty te nie pojawiły się na ocenianych w niniejszym artykule powierzchniach, zatem we wszystkich przypadkach przedstawiono pełen zestaw wyników dla 3 tomografów. Wynik pomiaru na tomografie po przetworzeniu na siatkę trójkątów poddano analizie w darmowej wersji oprogramowania GOM Inspect [8].

Uzyskane wyniki pomiarów należy rozpatrywać niezależnie dla kostki aluminiowej i stalowej. Analizując wartości rozstępu dla różnego typu uzyskanych cech pomiarowych można stwierdzić, iż w przypadku kostki aluminiowej wartości te nie przekraczają 0,046 mm oraz 0,045°. Natomiast dla kostki stalowej wartości są znacznie większe i wynoszą 0,170 mm oraz 0,270°. Większe rozrzuty dla kostki stalowej wynikają z trudniejszych warunków penetracji elementu przez promieniowanie X i poprawne odwzorowanie mierzonych powierzchni. W przypadku pomiaru średnicy kul wartości dla skanera optycznego i tomografów różnią się nieznacznie, natomiast wartości dla CMM różnią się bardziej. Wynika to z mniejszej liczby punktów opisujących powierzchnię sfery co powoduje gorsze jej odwzorowanie. Wartości odległości pomiędzy parami kul cechują się nieznacznymi rozstępami wartości w porównaniu z rozstępami dla pozostałych cech. Dla kostki aluminiowej różnice te wynoszą 0,014 mm, a dla kostki stalowej 0,043 mm. Niewielką wartość rozstępu wynika z faktu, że wartości odległości pomiędzy sferami są pochodną wyniku obliczenia położenia tych sfer. W przypadku oceny położenia kąтового pomiędzy dwoma płaszczyznami, jak i osiami otworów można stwierdzić, że wartości rozstępu dla kostki aluminiowej są znacznie mniejsze niż dla kostki stalowej.

Podsumowując można stwierdzić, że wszystkie trzy typy współrzędnościowych urządzeń pomiarowych pozwalają na efektywny pomiar elementu jaki przedstawiono w niniejszym artykule. Nie można również jednoznacznie stwierdzić, które z urządzeń jest bardziej odpowiednie, gdyż każde z nich charakteryzuje szereg zalet oraz wad w zależności od konkretnej aplikacji pomiarowej.

#### LITERATURA

- [1] *Tomografia*. W: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org), 2014.05.
- [2] RATAJCZYK E., *Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych, Cz. I. Idea pomiarów, główne zespoły i ich funkcje*. W: *Mechanik* nr 2, 2011, 112-117.
- [3] LEWIŃSKA-ROMICKA A., *Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii*. WNT Warszawa 2001.
- [4] *Tomografia komputerowa*. W: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org), 2014.05.
- [5] [www.phoenix-xray.com](http://www.phoenix-xray.com), 2014.02.
- [6] Christoph R., Neumann H.J., *X-ray Tomography in Industrial Metrology, Precise, Economical and Universal*. W: Verlag Moderne Industrie 2011, ISBN 978-3-86236-020-8.
- [7] Gapinski B., Wieczorowski M., Marciniak-Podsadna L., Dybala B., Ziolkowski G., *Comparison of Different Method of Measurement Geometry using CMM, Optical Scanner and Computed Tomography 3D*. W: *Procedia Engineering* 69, 2014, 255-262.
- [8] [www.gom.com](http://www.gom.com), 2014.03.

# **METODYKA I WERYFIKACJA TECHNIK POMIAROWYCH ZASTOSOWANYCH W DIAGNOSTYCE AKTYWNEGO ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO**

Małgorzata GIZELSKA<sup>1</sup>

## **1. WSTĘP**

Większość eksploatowanych maszyn w zastosowaniach przemysłowych są to urządzenia zawierające system przekazywania energii mechanicznej w postaci wirującego wału podpartego w łożyskach. Obecność ruchomego, wirującego elementu związanego ze stacjonarną częścią struktury maszyny implikuje dwa podstawowe zjawiska: drgania oraz tarcie w węzłach łożyskowych, które wiążą się z rozpraszaniem strumienia przekazywanej energii oraz zużyciem. Monitorowanie tych zjawisk stanowi jeden z podstawowych problemów w eksploatacji maszyn.

Przykładem węzła łożyskowego, w którym wyeliminowano tarcie i zużycie jest aktywne łożysko magnetyczne. Aktywne, magnetyczne podpory wykorzystują technologie, które zasadniczo różnią się od klasycznych rozwiązań łożyskowania. Mogą pracować w zakresie bardzo niskich lub bardzo wysokich temperatur, w środowiskach agresywnych chemicznie lub w próżni.

Zapewnienie niezawodności pracy maszyny z niekonwencjonalnym systemem łożyskowania, wymaga zaprojektowania specjalistycznych narzędzi diagnostycznych umożliwiających kontrolę jej stanu technicznego i parametrów funkcjonowania łożysk w trybie *on-line*. Kluczowe znaczenie ma zatem pozyskiwanie i przetwarzanie w czasie rzeczywistym informacji pomiarowych, które determinują stan dynamiczny układu wirującego.

W artykule zaprezentowana zostanie metodyka pozyskiwania danych pomiarowych, weryfikacja jej poprawności oraz specjalistyczne procedury informatyczne zastosowane w diagnostyce aktywnego łożyska magnetycznego.

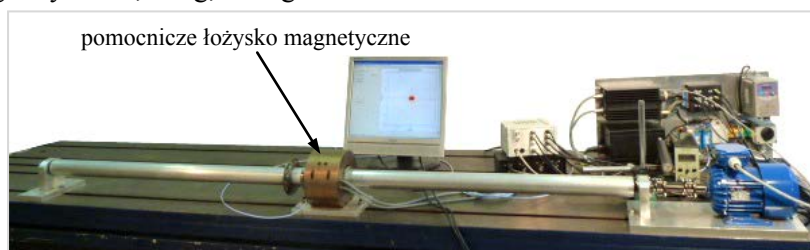
---

<sup>1</sup> Politechnika Łódzka, Instytut Maszyn Przepływowych, 90 - 924 Łódź, ul. Wólczańska 219/223

## 2. STANOWISKO BADAWCZE

Modelowe stanowisko badawcze, dla którego zbudowany został system diagnostyczny, stanowi poziomy, wiotki wał podparty w dwóch łożyskach tocznych montowanych na obu końcach (rys. 1). Między łożyskiem a prawym końcem wału zamontowano system aktywnej magnetycznej podpory pomocniczej. Aktywne łożysko magnetyczne pracuje jako poprzeczne łożysko pomocnicze modyfikujące właściwości dynamiczne linii wału [1, 3].

Strukturalnie wał stanowi cienkościenna rura wykonana z duraluminium o średnicy zewnętrznej 80 mm i grubości ścianki 2,1 mm. Napęd zrealizowano za pomocą silnika elektrycznego z płynną regulacją obrotów, który połączony jest z wałem za pośrednictwem elastycznego sprzęgła membranowego. Masa układu wirującego wynosi 4,85 kg, a długość linii wału 1923 mm.



Rys. 1. Stanowisko badawcze systemu wirującego z aktywnym łożyskiem magnetycznym

## 3. KONCEPCJA BUDOWY SYSTEMU DIAGNOSTYCZNEGO

Specyfika konstrukcji rzeczywistego obiektu – długi wiotki wał transmitujący moc stawia specjalne wymagania związane z budową systemu diagnostycznego [2], który nadzoruje jednocześnie pracę aktywnego łożyska magnetycznego, prawidłowość funkcjonowania układu wirującego oraz efektywność sterowania drganiami poprzecznymi wału. Te uwarunkowania powodują, że elementy wejściowe systemu diagnostycznego stanowią integralną część systemu aktywnej kontroli drgań wału [8].

System diagnostyczny został zaprojektowany w celu analizy i interpretacji danych pomiarowych zbieranych w czasie pracy układu wirującego maszyny z łożyskiem magnetycznym. Źródłem mierzonych sygnałów dla bazy danych systemu diagnostycznego są czujniki pomiarowe zainstalowane w łożysku magnetycznym, które stanowią niezbędną część modułów sterujących pracą łożyska. Dodatkowe układy pomiarowe mierzą wartości prądów w uzwojeniach elektromagnesów łożyska oraz częstość obrotów [4, 5, 6, 7].

Dane pomiarowe zbierane są z czujników:

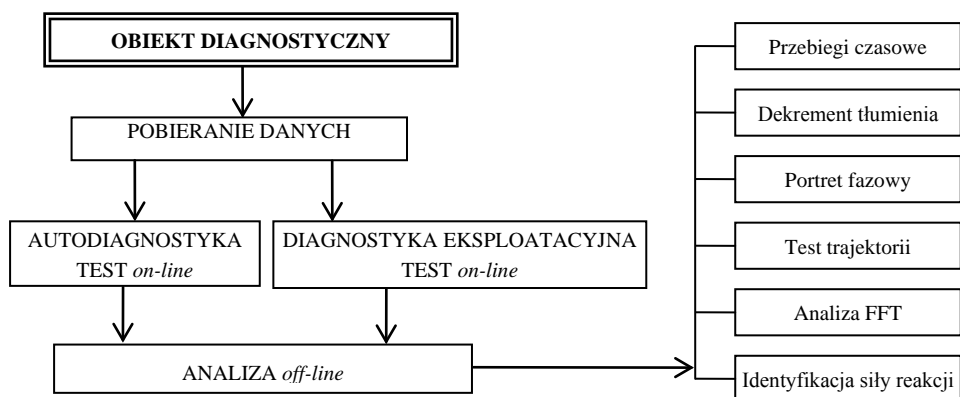
- przemieszczenia wału w osiach sterowania  $X$ ,  $Y$ ,
- prądów w uzwojeniach elektromagnesów  $I_{XT}$ ,  $I_{XB}$ ,  $I_{YT}$ ,  $I_{YB}$ ,
- częstości obrotów  $n$ .

Są one transmitowane poprzez specjalnie skonfigurowany interfejs, który zapewnia akwizycję tych danych dla systemu diagnostycznego.

Praca systemu diagnostycznego jest możliwa w dwóch trybach pracy *on-line* oraz *off-line* a jego oprogramowanie pozwala na realizację funkcji testowych w dwóch fazach pracy mechatronicznego układu wirującego:

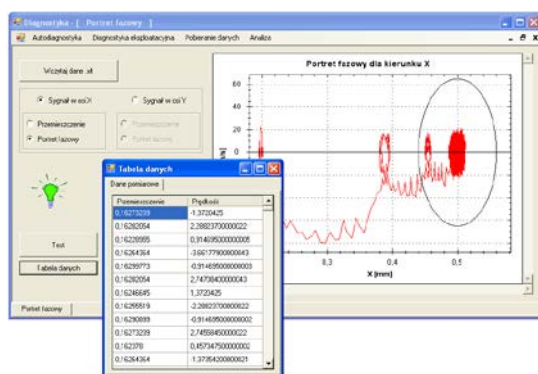
- w fazie zawieszania wału w łożysku magnetycznym – realizowana opcja - AUTODIAGNOSTYKA,
- po uruchomieniu napędu układu wirującego – realizowana opcja - DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA

Poglądowy schemat budowy systemu diagnostycznego przedstawiony został na rys. 2.



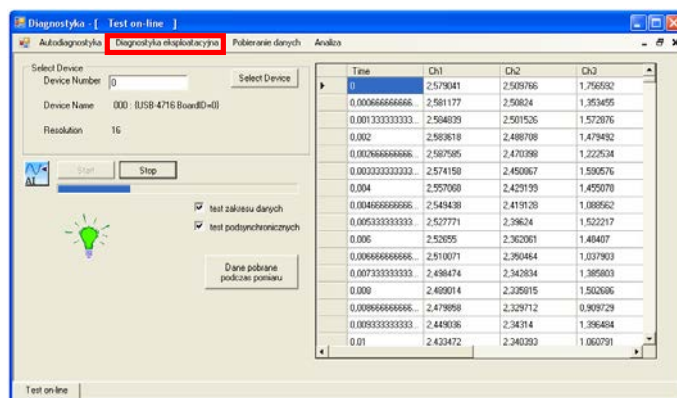
Rys. 2. Schemat koncepcyjny systemu diagnostycznego

W każdej fazie pracy obiektu użytkownik ma dostęp do opcji ANALIZA, która w trybie *off-line* pozwala na wybór formy prezentacji zarejestrowanych danych i ich analizę w postaci: przebiegów czasowych, dekrementu tłumienia, portretu fazowego, testu trajektorii, analizy FFT oraz identyfikacji siły reakcji magnetycznej.



Rys. 3. AUTODIAGNOSTYKA – Analiza off-line – Portret fazowy - zawieszanie wału - tabela danych

Bardzo istotną z punktu widzenia eksploatacji jest opcja – TEST *on-line* – pozwalająca na automatyczne wykonanie w czasie rzeczywistym pomiarów, ich analizę i wygenerowanie informacji dla użytkownika o stanie obiektu diagnostycznego.



Rys. 4. DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA – Test *on-line* – rozruch - pozytywny wynik testu

#### 4. DIAGNOSTYCZNA BAZA DANYCH

Zaprojektowany system diagnostyczny wymaga dostępu do danych pomiarowych generowanych przez diagnozowany obiekt. Zostało to zrealizowane poprzez zaprojektowanie dodatkowego urządzenia, które pozwala na akwizycję i rejestrację tych danych, aby możliwa była ich analiza za pomocą dedykowanych pakietów diagnostycznych.

Do zbierania i rejestracji danych pomiarowych wykorzystano przenośny moduł USB-4716 firmy Advantech wyposażony w interfejs użytkownika USB, który zapewnia odpowiednią szybkość i dokładność transmisji danych w aplikacjach pomiarowych.

Urządzenie wyposażone jest w 16 bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy, który wraz z układami multiplekserów,



programowalnym wzmacniaczem i pamięcią FIFO udostępnia użytkownikowi 16 wejść oraz dwa wyjścia analogowe, 8 wejść i 8 wyjść cyfrowych oraz licznik zdarzeń o pojemności 16 bitów. Moduł USB nie wymaga dodatkowego źródła zasilania. Zaciski do podłączenia wszystkich sygnałów we/wy umieszczone są na obudowie urządzenia.

Przygotowany w ten sposób interfejs pozwolił na transmisję danych diagnostycznych do komputera, na którym realizowane są funkcje diagnostyczne, kontrolujące poprawność funkcjonowania łożyska magnetycznego.

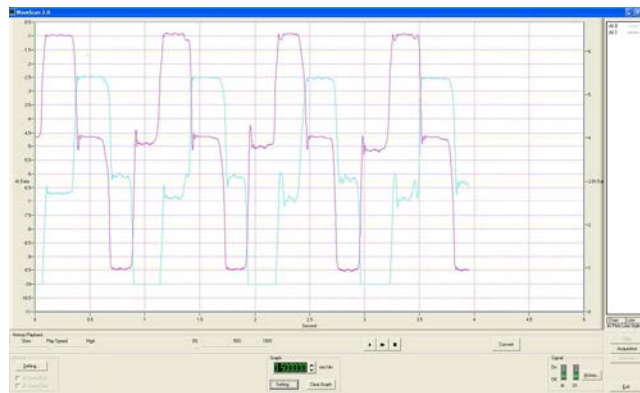
## 5. ARCHIWIZACJA DANYCH POMIAROWYCH

Wraz z modułem USB producent dostarcza pakiet sterowników pozwalających na swobodne wykorzystanie urządzenia we własnych programach tworzonych w środowisku Visual Basic, Visual C++, Visual C#, Delphi, C++ Builder oraz LabVIEW (jedynie dla systemów operacyjnych Windows 2000/XP/Vista). Przed podłączeniem modułu do komputera, zainstalowano menedżer urządzeń (Advantech Device Manager), sterownik oraz pakiet bibliotek dll.

Pakiet firmowy bibliotek *dll* stawia użytkownikowi do dyspozycji szereg funkcji związanych z możliwością realizacji dostępu do modułu, np. w najprostszym przypadku, aby wykonać pojedynczy pomiar analogowy, należy skorzystać z funkcji: wyboru urządzenia, jego otwarcia, pobrania wartości analogowej, dla której parametrem jest numer kanału i zakres wejściowy. W przypadku konieczności skanowania wejść analogowych z dużymi częstotliwościami, struktura programu staje się bardziej rozbudowana.

Do archiwizacji danych służy firmowa aplikacja *Wavescan*, pozwalająca na zapis danych do pliku tekstowego oraz wygenerowania przebiegu graficznego (rys. 6).

Firmowa aplikacja *Wavescan* nie spełniała jednak wymaganych założeń dla projektowanego systemu diagnostycznego i bezpośrednie korzystanie z niej przy archiwizacji danych okazało się mało efektywne ze względu na przygotowanie danych i ich dalszą analizę.



Rys. 6. Przykładowy przebieg graficzny wygenerowany za pomocą aplikacji *Wavescan*

W aplikacji *Wavescan* dane pomiarowe zostają zapisane automatycznie do pliku *wsp* i mogą być odczytane jedynie przez tę aplikację. W kolejnym kroku należy je przekonwertować i zapisać do pliku *xlt*, którego format umożliwia wczytywanie tych danych do plików programu Microsoft Office Excel. Taki sposób zapisu w znacznym stopniu wydłuża procedury i dlatego bardzo ważnym etapem pracy było zaprojektowanie własnej, dedykowanej aplikacji do archiwizacji danych

z możliwością ich zapisu w formacie *xlt* bezpośrednio wykorzystywanego w autorskim oprogramowaniu.

Eliminuje to konieczność korzystania z aplikacji *Wavescan*, aby zapewnić wymaganą szybkość działania systemu diagnostycznego, która pozwala na korzystanie z pakietów w opcji *on-line* oraz zastosowanie dowolnego sprzętu komputerowego do analizy diagnostycznej układu wirującego.

Te uwarunkowania spowodowały, że została zaprojektowana własna aplikacja archiwizacji danych *Diagscan*, którą zaimplementowano w przygotowanym oprogramowaniu diagnostycznym. Do tego celu wykorzystano zestaw funkcji *ActiveX* z pakietu *ActiveDAQ*, udostępnionego przez producenta sprzętu, będący nakładką na zestaw funkcji bibliotecznych *dll*.

Zbieranie i rejestrowanie danych analogowych można było realizować po zaimplementowaniu w programie diagnostycznym funkcji *axAICtrl* umożliwiającej poprawną komunikację aplikacji diagnostycznej z wykorzystywanym interfejsem USB-4716.

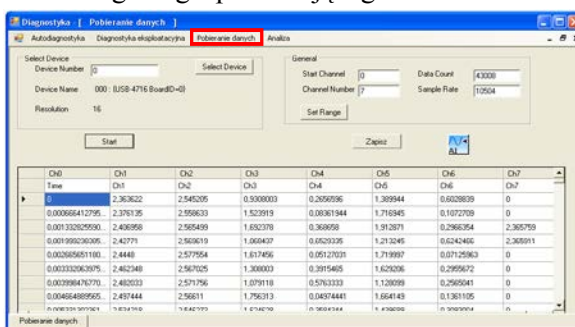
Na bazie funkcji *axAICtrl* przygotowany został program umożliwiający pobieranie danych z kanałów pomiarowych oraz ich zapis dla celów późniejszej analizy pracy układu wirującego z łożyskiem magnetycznym w opcji ANALIZA.

## 6. POBIERANIE DANYCH

Bardzo ważnym etapem pracy, z punktu widzenia prawidłowego funkcjonowania systemu diagnostycznego, był odpowiedni dobór parametrów wejściowych danych niezbędnych do analizy. Wykonano szereg wstępnych badań eksperymentalnych, które pozwoliły sprawdzić, przy jakich nastawach: częstotliwość próbkowania, liczba zebranych próbek, zakres danych wejściowych, wyniki analizy spełniają założone wymagania.

Rozpoczynając pracę z systemem użytkownik wybiera pole POBIERANIE DANYCH i uzyskuje dostęp do okna dialogowego pozwalającego na zdefiniowanie urządzenia (*Select Device*) oraz definiowanie parametrów zbierania danych w postaci:

- liczby kanałów pomiarowych (*Start Chanel*, *Chanel Number* – wybór kanału początkowego oraz ich liczba),
  - liczby próbek (*Data Count*),
  - częstotliwości próbkowania (*Sample Rate*)
- Możliwość definiowania parametrów



Rys. 7. Definiowanie parametrów pobierania danych



pobierania danych można dopasować do zróżnicowanych potrzeb użytkownika i obiektu, ponieważ system jest dostosowany do współpracy z różnymi wariantami stanowisk badawczych układów wirujących z aktywnym łożyskiem magnetycznym.

W pierwszej kolumnie rejestrowanych plików zapisywany jest czas wykonywania pomiaru, który wyliczany jest na podstawie zadeklarowanej częstotliwości próbkowania, kolejne kolumny zawierają dane rejestrujące przemieszczenia wału X, Y, prądy w uzwojeniach poszczególnych elektromagnesów  $I_{XT}$ ,  $I_{XB}$ ,  $I_{YT}$ ,  $I_{YB}$  oraz częstość obrotów  $n$  wirującego wału.

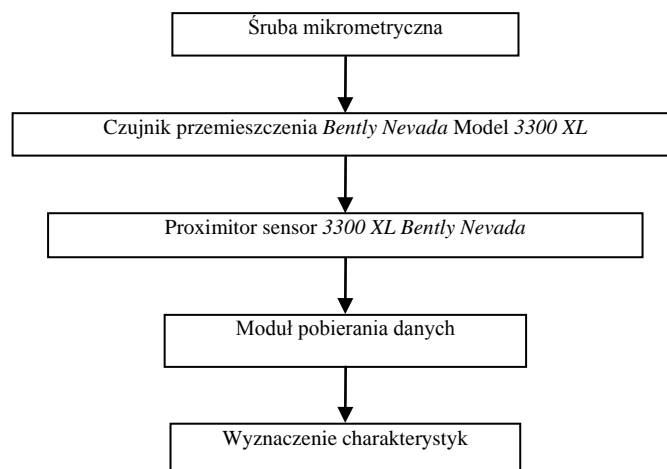
Opcja Start uruchamia procedurę rejestracji danych, które mogą zostać zapisane do pliku *xlt* (opcja *Zapisz*). Można się odwoływać do nich ze wszystkich innych poziomów, dostępnych w modułach diagnostycznych. Format zapisu jest również bezpośrednio odczytywany przez program Microsoft Office Excel.

Z pakietu POBIERANIE DANYCH można korzystać także opcjonalnie, gdy operator chce rejestrować wszystkie dane pomiarowe transmitowane do systemu diagnostycznego przy realizacji pakietu AUTODIAGNOSTYKA lub DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA. Służą one do analizy *off-line* parametrów układu wirującego w różnych fazach jego pracy.

## 7. WZORCOWANIE TORÓW POMIAROWYCH

Przebiegi czasowe wielkości rejestrowanych w zaprojektowanym systemie diagnostycznym: przemieszczenia wału w osiach sterowania X, Y, oraz prądy w uzwojeniach poszczególnych elektromagnesów  $I_{XT}$ ,  $I_{XB}$ ,  $I_{YT}$ ,  $I_{YB}$  stanowiły bazę do opracowania pozostałych form prezentacji wyników jak np.: dekrement tłumienia, portret fazowy, trajektoria, siła reakcji magnetycznej. Dlatego wierna rejestracja ich przebiegów czasowych *on-line* i możliwość ich odtwarzania *off-line* była warunkiem poprawności działania systemu diagnostycznego. W tym celu torzy pomiarowe przemieszczenia w obu osiach sterowania oraz prądów w uzwojeniach elektromagnesów łożyska należało wywzorcować. Celem wzorcowania było wyznaczenie rzeczywistych relacji między wartościami napięcia mierzonymi przez przygotowany do celu współpracy z systemem diagnostycznym moduł akwizycji danych a zadanymi wartościami przemieszczenia, które mieściły się w zakresie luzu łożyska magnetycznego. Wiroprądowe czujniki przemieszczenia czopa łożyska firmy Bently Nevada montowane były w specjalnym uchwycie i za pomocą śruby mikrometrycznej zadawano wzorcowe wartości tego przemieszczenia. Napięcia wyjściowe rejestrowano w torze pomiarowym za pośrednictwem przygotowanego modułu pobierania danych, aby zachować warunki wzorcowania porównywalne z torem transmisji danych przy normalnej pracy systemu łożyskowego i realizacji funkcji diagnostycznych.

Na rys. 8 przedstawiono schemat blokowy metodyki przeprowadzonego wzorcowania dla czujników przemieszczenia.



Rys. 8. Schemat toru transmisji danych przy wzorcowaniu czujników przemieszczenia

W wyniku wzorcowania uzyskano charakterystyki przemieszczenie-napięcie, wyznaczone dla dwóch wykorzystywanych w diagnostyce łożyska magnetycznego kanałów pomiarowych. Równania tych charakterystyk wprowadzono do odpowiednich procedur oprogramowania diagnostycznego, co zapewniło uzyskanie rzeczywistych wartości przemieszczenia rejestrowanych przez system diagnostyczny.

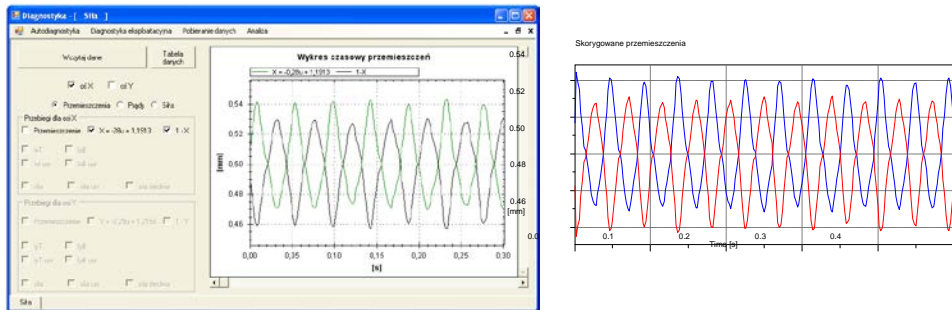
Do pomiaru prądów w uzwojeniach elektromagnesów wykorzystywane są hallotronowe przetworniki typu LEM, które na wyjściu dają sygnał napięciowy. Wzorcowanie torów pomiarów prądu pozwoliło stwierdzić, że współczynnik przetwarzania jest równy jedności, a więc zależność prąd – napięcie jest postaci:

$$I = k U_i, \text{ dla } k = 1A/V.$$

## 8. WERYFIKACJA POPRAWNOŚCI REJESTRACJI PRZEBIEGÓW CZASOWYCH

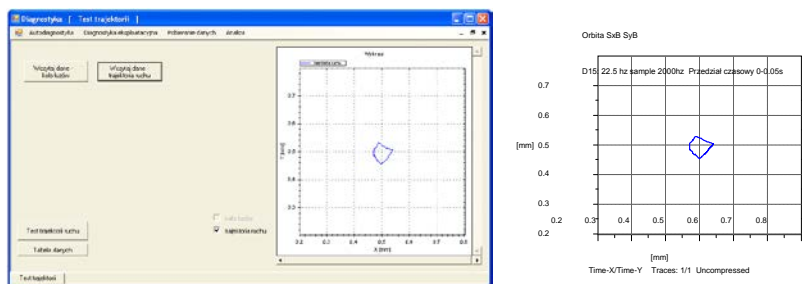
Po wprowadzeniu do procedur programowych charakterystyk przetwarzania, uzyskanych na drodze wzorcowania, torów pomiarowych przemieszczenia w osiach X, Y i prądów w uzwojeniach  $I_{XT}$ ,  $I_{XB}$ ,  $I_{YT}$ ,  $I_{YB}$  dokonano weryfikacji poprawności rejestracji ich przebiegów czasowych.

Rys. 9 prezentuje analizę zarejestrowanych przebiegów przemieszczenia dla osi X oraz Y za pomocą systemu diagnostycznego (lewa część rysunku) i za pomocą systemu pomiarowego LMS TestXpress (prawa część rysunku), przy zachowaniu tych samych warunków rejestracji.



Rys. 9. Czasowy przebieg przemieszczenia dla osi X.  
 Obroty wału: 22,5 Hz, częstotliwość próbkowania: 500 Hz/kanal

Na rysunku 10 pokazano weryfikację przebiegu trajektorii układu wirującego z aktywnym łożyskiem magnetycznym złożonej z przemieszczeń dla osi X oraz Y.



Rys. 10. Trajektoria - obroty wału: 22,5 Hz, częstotliwość próbkowania: 2000 Hz/kanal,  
 przedział czasowy rejestracji: 0-0,05 s

Zamieszczone przykładowe rejestracje przebiegów przemieszczeń oraz trajektorii potwierdzają poprawność opracowanych procedur pomiarowych zastosowanych w zaprojektowanym systemie diagnostycznym. Pozwoliło to na realizację kolejnych procedur diagnostycznych zaprojektowanego systemu, umożliwiających analizę dekrementu tłumienia, portretu fazowego, FFT, siły reakcji magnetycznej.

## 9. PODSUMOWANIE

Zaprojektowane oprogramowanie diagnostyczne zawiera pakiety programowe umożliwiające wykonywanie wielu złożonych procedur, które są odpowiedzialne za diagnostykę *on-line* poprawności działania podpory magnetycznej zarówno przy układzie nieruchomym jak i wirującym. Zapewnia także możliwość analizy, w trybie *off-line*, danych zapisywanych automatycznie do pamięci i związanych z nietypowymi zachowaniami systemu. Kluczowym problemem jest zbieranie danych z torów

pomiarowych przemieszczenia w osiach  $X$ ,  $Y$  i prądów w uzwojeniach  $I_{XT}$ ,  $I_{XB}$ ,  $I_{YT}$ ,  $I_{YB}$ , które determinują poprawność działania systemu.

Zaprojektowany, zbudowany i zweryfikowany na rzeczywistych obiektach system diagnostyczny daje szerokie możliwości analizy poprawności funkcjonowania mechatronicznego układu wirującego przy wykorzystaniu opcji *AUTODIAGNOSTYKA* i *DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA*, w różnych fazach pracy, jakimi są: zawieszanie wału w łożysku, rozruch, wybieg, praca przy nominalnej częstotliwości obrotów.

Zbudowane w skali rzeczywistych układów wirujących stanowiska laboratoryjne mają swoje zastosowanie praktyczne, np. do:

- diagnostyki maszyn przepływowych z aktywnymi łożyskami magnetycznymi
- sterowania drganiami wiotkich wałów maszyn z wykorzystaniem pomocniczej podpory magnetycznej
- eksploatacji tłumików magnetycznych służących bezpiecznemu przekraczaniu częstotliwości krytycznych długich wiotkich wałów maszyn.

Zaprojektowany system diagnostyczny ma duże znaczenie aplikacyjne w przypadku decyzji o zastosowaniu takiego rozwiązania w maszynie przemysłowej.

#### LITERATURA

- [1] SCHWEITZER G., MASLEN E.H., *Magnetic Bearings. Theory, Design and Application to Rotating Machinery*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2009).
- [2] KORBICZ J., KOŚCIELNY J.M., KOWALCZUK Z., CHOLEWA W., *Diagnostyka procesów*, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, (2002), (in Polish).
- [3] KOZANECKA D., *Vibrations Control of the Shaft Line of the Turbomachinery Supported in Active Magnetic Bearings*, Final report on the project no. 4 T10B 044 23, (2005), 153 p. (in Polish)
- [4] GIZELSKA M., *Koncepcja diagnozowania systemu wirującego z aktywnym łożyskiem magnetycznym*, XXXIV Ogólnopolskie Sympozjum „Diagnostyka Maszyn”, Węgierska Górka (2007).
- [5] GIZELSKA M., KOZANECKA D., *Oprogramowanie diagnostyczne systemu wirującego z aktywnym łożyskiem magnetycznym*, Ciepłe Maszyny Przepływowe - Turbomachnery, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Nr 1001 (2007) Łódź, 39-50.
- [6] GIZELSKA M., KOZANECKA D., KOZANECKI Z., *Integrated Diagnostics of the Rotating System with an Active Magnetic Bearing*, Solid State Phenomena, Vol. 147-149, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland ISSN 1012-0394 (2009) 137-142 (Online available since 2009/Jan/06, at <http://www.scientific.net>).
- [7] GIZELSKA M., *Diagnostics of the Rotating System with an Active Magnetic Bearing*, PhD Dissertation (in Polish), Insitute of Turbomachinery, Technical University of Łódź, (2011).
- [8] KOZANECKA D., *Diagnostics of Rotating Machinery Mechatronic System* (in Polish), Monographic Series of Publications: Maintenance Problems Library, Scientific Publishing House of Institute for Sustainable Technologies in Radom, ISBN 978-83-7204 966-7 (2010).

# MODELOWANIE MIKROGEOMETRII POWIERZCHNI POLEROWANEJ STOPU MAGNEZU

Andrzej GOŁĄBCZAK<sup>1</sup>, Andrzej KONSTANTYNOWICZ<sup>1</sup>,  
Marcin GOŁĄBCZAK<sup>2</sup>

## 1. CELE MODELOWANIA MATEMATYCZNEGO POWIERZCHNI

Istnieje wiele sposobów podejścia do modelowania matematycznego struktury geometrycznej powierzchni obrabianych mechanicznie. Zależą one przede wszystkim od celów stawianych przed modelem, którymi są np.: ocena jakościowa i ilościowa struktury geometrycznej powierzchni ukształtowanych w procesach technologicznych, możliwość opisu zjawisk powierzchniowych zachodzących w tych procesach, ocena zakresu i skali ich występowania, prognozowanie wyników ilościowych na podstawie zadanych parametrów wejściowych procesu obróbki [1, 5÷7].

W artykule zaproponowano model matematyczny mający spełnić następujące zadania:

- odzwierciedlać w sposób ilościowy aspekty technologiczne powierzchni stopów lekkich polerowanych do najwyższej klasy chropowatości, w tym parametry statystyczne:  $R_v$ ,  $R_p$ ,  $R_t$ ,  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_{skew}$ ,  $R_{kurt}$  oraz morfologię powierzchni, włącznie z możliwością odtworzenia jej charakterystycznej tekstury;
- umożliwiać precyzyjne modelowanie stopnia rozwinięcia powierzchni, bez zasadniczego wpływu na parametry statystyczne oraz wnikliwą ocenę mechanizmów procesu abrazji powierzchni w mikro- i nanoskali;
- umożliwiać identyfikację parametrów, wynikającą z posiadanej aparatury badawczej (pomiar 2D i 3D), stosowanych metod odwzorowania powierzchni, np. profilometr lub mikroskop AFM;
- umożliwiać weryfikację doświadczalną przewidywań ilościowych.

---

<sup>1</sup> Politechnika Łódzka, Katedra Technologii Maszyn, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

<sup>2</sup> Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i TBM, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

## 2. ZAŁOŻENIA I PROCEDURY DO MODELOWANIA POWIERZCHNI ZŁOŻONEJ

Konieczność odzwierciedlenia (wygenerowania) przez model konkretnej powierzchni, a nie tylko ujęcia wskaźników statystycznych, przy pozostawieniu jednocześnie bardzo dużego stopnia swobody co do konkretnego kształtu, skłania do wyboru generalnego sposobu jakim jest użycie różnorodności ciągłej, niekoniecznie różniczkowalnej, utworzonej z elementów będących różnorodnościami różniczkowalnymi (gładkimi) [8]. Używany jest również termin „powierzchnia złożona”, który jednakże ma nieco szersze znaczenie niż to, które określa powierzchnię proponowaną w tej pracy.

Rolę elementu wiodącego, określającego własności lokalne różnorodności ciągłej, z którego zbudowana jest modelowana powierzchnia, spełnia stożek regularny, o wierzchołku leżącym nad środkiem symetrii podstawy i podstawie eliptycznej (w szczególności kołowej) ze względu na swoje własności topologiczne (rys. 9):

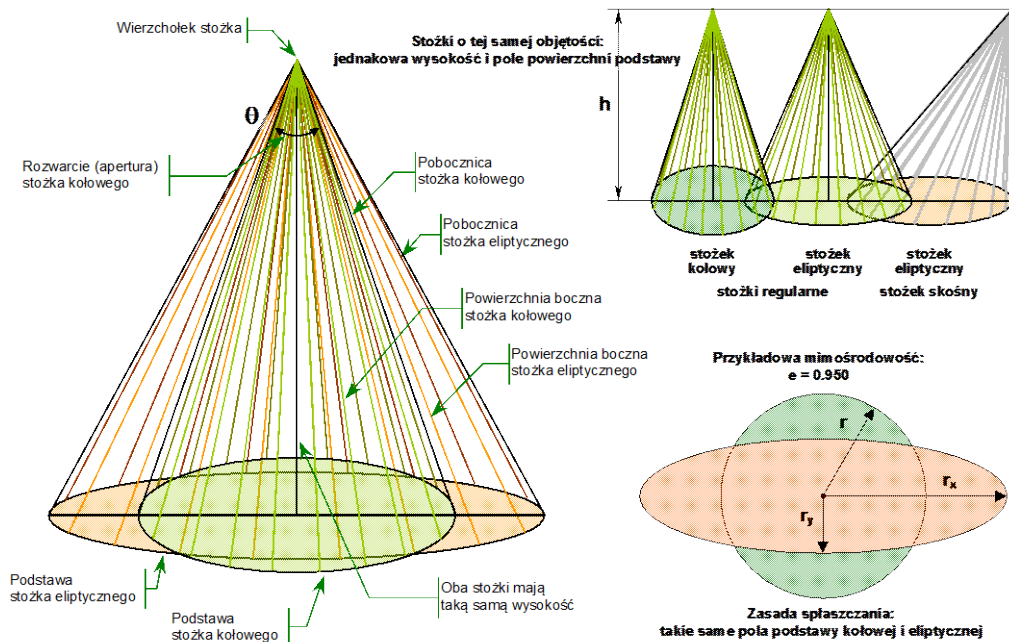
jego powierzchnia jest różnorodnością różniczkowalną (z wyjątkiem wierzchołka) [8], jest bryłą prostokreślną [3], na której można utworzyć dwie rodziny linii ortogonalnych, co pozwala jednoznacznie rozłożyć proces powierzchniowy na elementy składowe,

posiada możliwość deformacji bez zmiany objętości, co pozwala modelować niezależnie od siebie parametry statystyczne powierzchni, jej rozwinięcie i masową wydajność abrazji.

Ta ostatnia własność wynika z bardzo ważnej cechy brył kreślonych pękiem prostych (również wielościanów). Objętość takiej bryły określona zależnością:

$$V = \frac{1}{3} S_B \cdot h \quad (1)$$

nie zależy od kształtu powierzchni stanowiącej podstawę takiej bryły, nie zależy od tego, czy wierzchołek znajduje się nad środkiem ciężkości podstawy (bryła nie musi być regularna), a nawet, czy jest położony nad podstawą – co jakościowo ilustruje rys. 1.



Rys. 1. Stożki regularne, o wierzchołku leżącym prostopadle nad środkiem symetrii podstawy, deformowalnej od koła do elipsy o dowolnej mimośrodkowości, z założeniem stałego pola podstawy

Zapis symboliczny definiujący opisany model, obejmuje zarówno obiekty składające się na powierzchnię wraz z opisującymi je parametrami, jak i sposób operowania nimi i ma postać:

$$S = \left\{ \left\{ P : L, X, Y, N_x, N_y \right\}, \left\{ C : \theta, (h : h_m, h_v), e, \alpha \right\}, [U : O, F_x, F_y, N_c] \right\} \quad (2)$$

- gdzie:
- $P$  - (pojedynczy obiekt) podstawa płaska generowanej powierzchni,  $L$  - umowny poziom zerowy modelowanej powierzchni,  $X, Y$  - wymiary liniowe,  $N_x, N_y$  - rozmiary siatki dyskretnej punktów generacji powierzchni;
  - $C$  - {zbiór obiektów} stożków o parametrach:  $\theta$  - kąt rozwarcia stożka (apertura),  $h$  - wysokość stożka, która może być zadana jednoznacznie, lub być generowana według rozkładu logarytmowo-norma-lnego o parametrach:  $e$  - ekscentryczność (mimośrodkowość) podstawy stożka,  $\alpha$  - kąt obrotu podstawy stożka względem współrzędnych podstawy powierzchni,
  - $U$  - [sposób ułożenia] układ stożków na powierzchni:

- $O$  - orientacja położenia stożków, dodatnia (stożki utworzone na powierzchni) lub ujemna (stożki zagłębione w powierzchnię) od umownego poziomu  $L$ ,
- $F_x, F_y$  - rozkład prawdopodobieństwa położenia współrzędnej na powierzchni,
- $N_c$  - liczba stożków.

Stożki, z których utworzona jest powierzchnia modelowana, mają jednakową rozwartość. Nie jest to sztuczne ograniczenie możliwości modelu, ale wyraz, potwierdzonego eksperymentalnie (rys. 9) przejawu jednorodności przestrzennej parametrów procesu technologicznego polerowania na modelowanej powierzchni. Stożki te można deformować, czyli od podstawy kołowej przechodzić do eliptycznej. Przy założeniu stałości pola powierzchni podstawy, stożki te zachowują również stałą objętość, przy znaczącej różnicy w polu powierzchni bocznej. Ma to znaczenie przy niezależnym modelowaniu rozwinięcia powierzchni i jej parametrów statystycznych oraz dla oceny kształtowanej mikrogeometrii powierzchni przy zadanych warunkach jej tworzenia ze stożków.

Stożki położone są na powierzchni w taki sposób, że w znacznej mierze przekrywają się (rys. 2). Wzajemne przecinanie się pobocznic  $S_L$  stożków na tworzonej powierzchni zawsze generuje linie przecięć w postaci hiperbol o wielkości i nachyleniu pod kątem zależnym od wzajemnej wysokości przecinających się stożków. Również pomiar profilometrem powierzchni utworzonej ze stożków, daje linię profilu składającą się z odcinków hiperbol (np. rys. 7 i rys. 10).

Sposób wzajemnego przekrywania się stożków, czyli sposób tworzenia ze stożków modelowanej powierzchni, określony jest regułą:

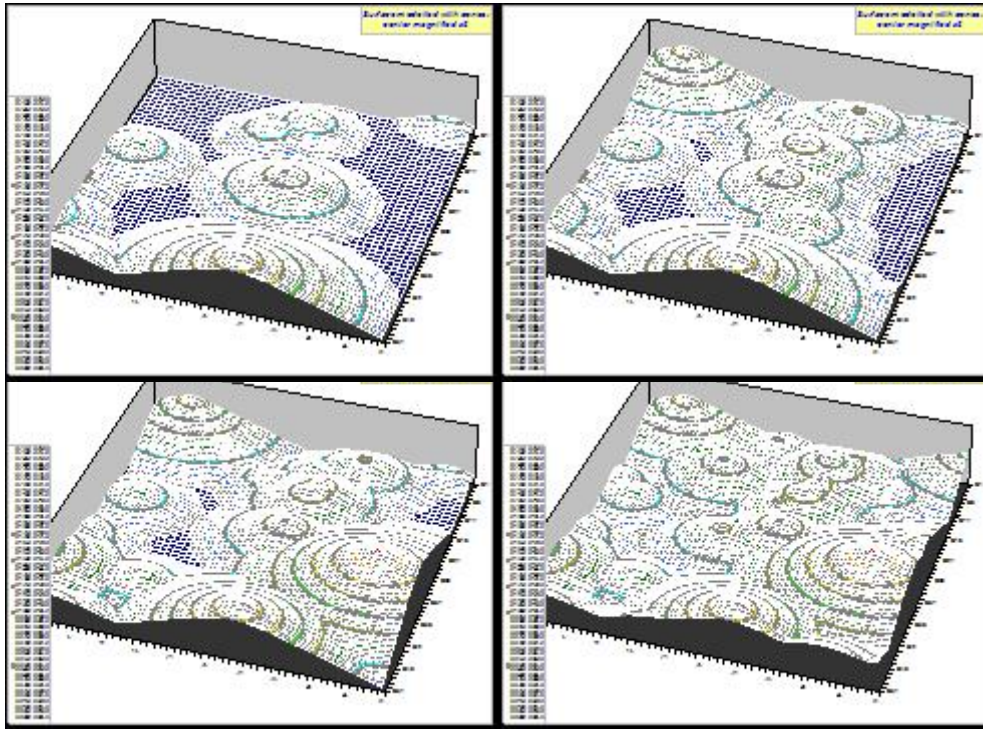
dla „stożków dodatnich” – nadbudowanych na powierzchni określanej jako umowny poziom odniesienia (rys. 2), dla danego punktu  $P(x_i, y_i)$  siatki powierzchni przyjmuje się wartość najwyższej położonej powierzchni bocznej stożka, który przekrywa się z innymi w tym węźle:

$$P(x_i, y_i) = \text{MAX}(\wedge_{k \in N_c} L + S(x_{Ck}, y_{Ck}, x_i, y_i)) \quad (3)$$

dla „stożków ujemnych” – zagłębionych od powierzchni określanej jako umowny poziom odniesienia, dla danego punktu siatki powierzchni przyjmuje się wartość najniższej położonej powierzchni bocznej stożka, który przekrywa się z innymi w tym węźle:

$$P(x_i, y_i) = \text{MIN}(\wedge_{k \in N_c} L - S(x_{Ck}, y_{Ck}, x_i, y_i)) \quad (4)$$





Rys. 2. Kolejne etapy tworzenia powierzchni poprzez przekrywające się stożki, ułożone na umownej płaszczyźnie odniesienia. Wygląd z centrum generowanego obszaru dla kolejno: 50, 100, 200 i 400 stożków

Z rysunku 2 wynika, że przy 200 nałożonych stożkach znacząco zmniejszyły się obszary niepokryte, a jeden z nowych stożków przykrył uprzednio wygenerowane stożki o mniejszej wysokości. Przy 400 stożkach powierzchnia została utworzona całkowicie, a zgrupowania pobliskich, niewielkich stożków zaczęły tworzyć charakterystyczne, spłaszczone, lekko pofalowane obszary (rys. 6. i rys. 9).

Równanie stożka eliptycznego, o wysokości prostopadłej do podstawy ma postać [3]:

$$\frac{(x-x_c)^2}{r_x^2} + \frac{(y-y_c)^2}{r_y^2} - \frac{(z-h)^2}{h^2} = 0 \quad (5)$$

gdzie:  $x_c, y_c$ , – współrzędne środka stożka,  $r_x, r_y$  – promienie,  $h$  – wysokość.

Równanie określające regularny stożek eliptyczny dowolnie obrócony wokół wysokości jako osi, zapisane jest w tzw. pierwszej formie kanonicznej:

$$z = h - \frac{h}{r} \sqrt{A \cdot (x-x_c)^2 + B \cdot (y-y_c)^2 + C \cdot (x-x_c)(y-y_c)} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
A &= \frac{\cos^2(\alpha)}{\sqrt{1-e^2}} + \sin^2(\alpha)\sqrt{1-e^2} \\
B &= \frac{\sin^2(\alpha)}{\sqrt{1-e^2}} + \cos^2(\alpha)\sqrt{1-e^2} \\
C &= -2\cos(\alpha)\sin(\alpha)\left(\frac{1}{\sqrt{1-e^2}} - \sqrt{1-e^2}\right)
\end{aligned}
\tag{7}$$

Taki zapis pozwala na bardzo efektywne obliczenia, pozwalając uniknąć obliczenia funkcji trygonometrycznych wewnątrz funkcji kreślącej stożek, a zatem, przy posiadanych możliwościach obliczeniowych, efektywne generowanie różnych powierzchni, nieraz złożonych z dużej liczby stożków. Współczynnik rozwinięcia powierzchni  $Ru$  jest stosunkiem pola powierzchni bocznej do pola powierzchni podstawy stożka i dla stożka regularnego o podstawie eliptycznej ma postać:

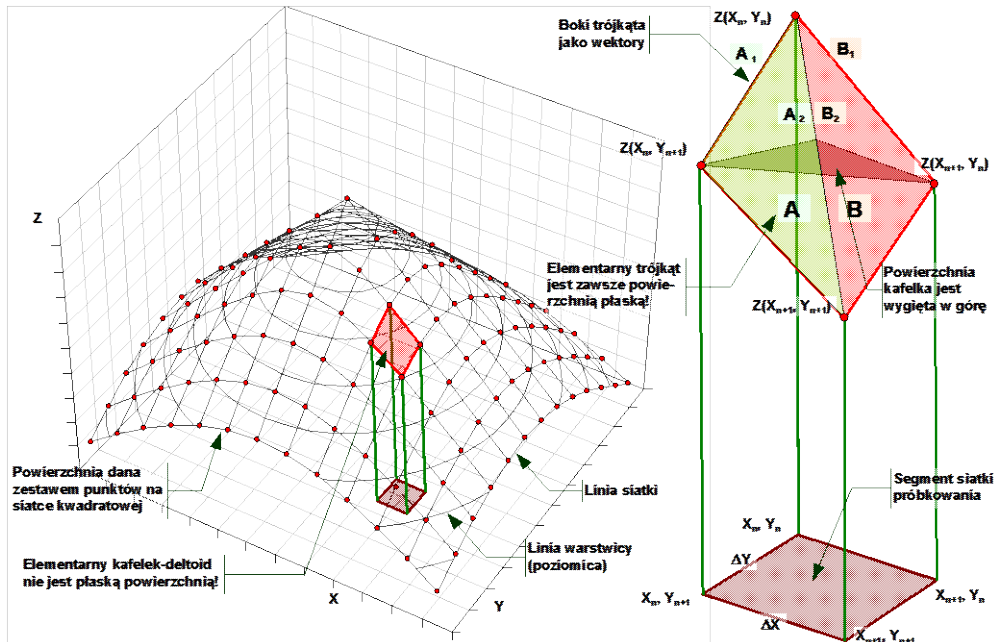
$$Ru = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{1 + \frac{h^2}{r^2 \sqrt{1-e^2}}} \cdot E\left(\frac{e}{\sqrt{1 + \frac{r^2 \cdot \sqrt{1-e^2}}{h^2}}}\right)
\tag{8}$$

gdzie:  $E(\cdot)$  - zupełna całka eliptyczna drugiego rodzaju, nie mająca postaci analitycznej [9].

Kody wszystkich obliczeń zapisane zostały w języku *Visual Basic* będących uzupełnieniem arkusza kalkulacyjnego *Excel* firmy *Microsoft*, w którym zostały wykonane obliczenia i wykresy.

### 3. OBLICZANIE PÓŁ POWIERZCHNI Z DANYCH DYSKRETYNYCH

Wszelkie obliczenia związane z rozwinięciem powierzchni, zarówno w modelu matematycznym jak i dla danych doświadczalnych, wymagają rozwiązania zadania obliczenia pól powierzchni, których analityczna postać jest nie znana. Znane są natomiast wartości wysokości ponad umowny poziom, określone w węzłach siatki prostokątnej, w szczególności kwadratowej. Siatka taka daje naturalny podział płaszczyzny umownej podstawy na prostokąty (kwadraty), a powierzchni na prostokąty (kwadraty) krzywoliniowe, które są w ogólności nieplanarne. Podejściem szeroko stosowanym w grafice komputerowej i metodach MES (Metody Elementów Skończonych), jest podział powierzchni na trójkąty, z definicji planarne, których pole powierzchni jest połową wartości iloczynu wektorowego tworzących je wektorów [2].



Rys. 3. Schemat do obliczania pola powierzchni danej w dyskretnych węzłach metodą triangulacji

Korzystając z przytoczonej reguły, dla siatki kwadratowej (rys. 3), jeżeli  $\Delta X = \Delta Y = \Delta$ , powierzchnie opisują równania:

$$S_A = \frac{\Delta}{2} \sqrt{(Z_{n+1,n+1} - Z_{n,n+1})^2 + (Z_{n,n+1} - Z_{n,n})^2 + \Delta^2} \quad (9)$$

$$S_B = \frac{\Delta}{2} \sqrt{(Z_{n+1,n} - Z_{n,n})^2 + (Z_{n+1,n+1} - Z_{n+1,n})^2 + \Delta^2} \quad (10)$$

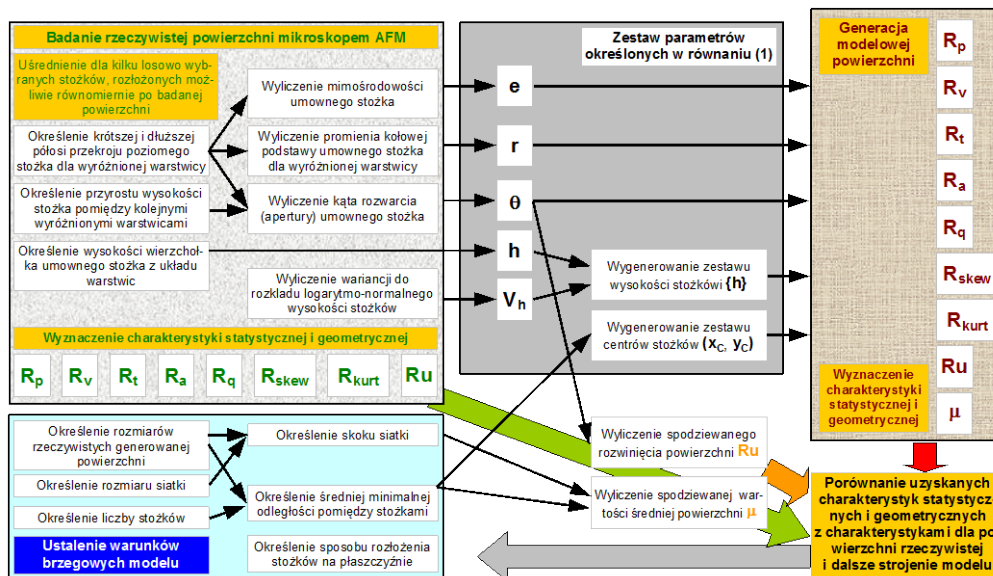
Stąd współczynnik rozwinięcia powierzchni dla elementarnego deltoidu (kafelka) wynosi:

$$Ru_D = \frac{S_D}{\Delta^2} = \frac{1}{2\Delta} \left( \sqrt{(Z_{n+1,n+1} - Z_{n,n+1})^2 + (Z_{n,n+1} - Z_{n,n})^2 + \Delta^2} + \sqrt{(Z_{n+1,n} - Z_{n,n})^2 + (Z_{n+1,n+1} - Z_{n+1,n})^2 + \Delta^2} \right) \quad (11)$$

Kiedy współrzędne z wszystkich punktów są równe, czyli dla powierzchni płaskiej, powierzchnia „kafelka” wynosi  $\Delta^2$ , a współczynnik rozwinięcia powierzchni  $Ru$  wynosi 1, więc wzory (10) i (11) są formalnie poprawne. Tak szczegółowe podejście do obliczania współczynnika rozwinięcia powierzchni, zarówno w modelu jak i uzyskanej eksperymentalnie, ma swoje uzasadnienie w tym, że dla powierzchni modelowej ogólne rozwinięcie powierzchni jest takie samo jak dla pojedynczego stożka, ze względu na prostokreślność stożka.

#### 4. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW MODELU

Przedstawiony w artykule przykład generacji powierzchni modelowej został wykonany dla powierzchni zdefiniowanej w oparciu o sieć działań przedstawioną na rys. 4, wykonanych dla rzeczywistej powierzchni przedstawionej na rys. 9.



Rys. 4. Zasady identyfikacji parametrów modelu z eksperymentalnej powierzchni badanej mikroskopem AFM i siatka działań do generacji powierzchni modelowej

Tabela 1. Parametry modelowanej powierzchni i rozkładu stożków

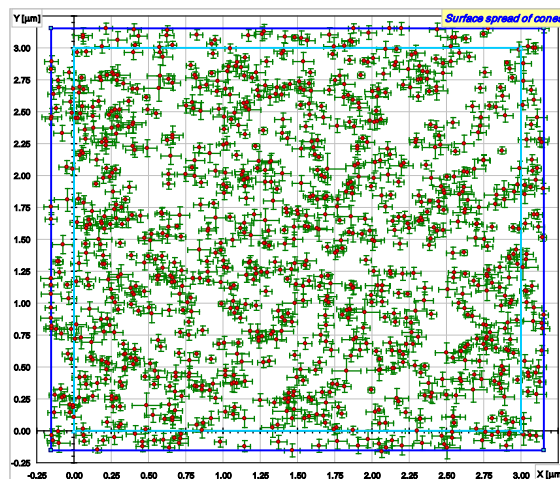
Modelled surface limits				$\mu\text{m}$		Area	$\mu\text{m}^2$
Modelled surface dimensions				Nominal lattice		Total	
$X_{\text{MIN}}$	$X_{\text{MAX}}$	$Y_{\text{MIN}}$	$Y_{\text{MAX}}$	X	Y		
0.000	3.000	0.000	3.000	151	151	9.000	
$\delta x$	0.020	$\delta y$	0.020	Nodes	22801	0.060000	
Total surface of cones' generation				Tiles	22500	Tile	
-0.155	3.155	-0.155	3.155	Diagonal	4.681	0.000400	25.00
$\Delta x$	3.310	$\Delta y$	3.310	Area	10.956	Auxiliary	0.000067

Parametry w tab. 1 wybrano tak, aby można było otrzymaną powierzchnię porównać z powierzchniami otrzymanymi eksperymentalnie, bez skalowania, co mogłoby zniekształcić zarówno parametry statystyczne jak i współczynnik rozwinięcia. Stożki na rys. 5 wygenerowano w nieco większym polu (tab. 1), obejmującym pewien margines dla uniknięcia efektów brzegowych na obserwowanym polu, powodujących zmniejszenie się wartości średniej powierzchni na brzegu. Przyjęto zatem margines, który jest równy promieniowi podstawowego stożka kołowego. Rozpiętość krzyżyków na rys. 5 jest proporcjonalna do promieni stożków na umownej płaszczyźnie, a pole

jasnoblękitne jest obrysem umownej płaszczyzny generacji powierzchni. Przykład wygenerowanej powierzchni przedstawiono na rys. 6, dla której punktem wyjścia był stożek kołowy o zadanej aperturze, przekształcony w stożek eliptyczny leżący poziomo. Parametry pojedynczego stożka do generacji powierzchni przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2. Parametry pojedynczego stożka do generacji powierzchni z rys. 6

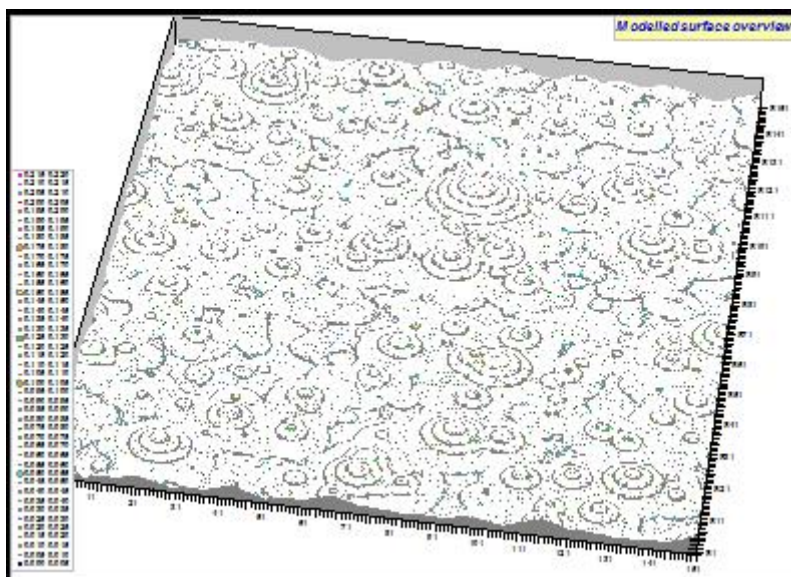
Regular (right) cone parameters							
Base r		0.1550 $\mu\text{m}$	155.00 nm	Base area	0.07548 $\mu\text{m}^2$	Aperture (opening angle)	
Height h	Mean	0.0850 $\mu\text{m}$	85.00 nm	Lateral area	0.08608 $\mu\text{m}^2$	h/r	0.548387 -
	Variance	0.00082 $\mu\text{m}^2$	816.75 nm <sup>2</sup>	-2.518654	Log-Normal distribution	Rugosity	122.52 °
	Deviation	0.028579 $\mu\text{m}$	28.58 nm	0.327261			2.1384 rad
Shaped cone parameters							
Eccentricity e (for equal base area)	0.65000 -	Base axes		a	0.177805 $\mu\text{m}$	177.80 nm	Lateral area
	0.759934	0.346108		b	0.135120 $\mu\text{m}$	135.12 nm	0.08644 $\mu\text{m}^2$
Direction $\alpha$ (clockwise)	1.57080 rad	Directional coefficients	A	0.759934 -	Rugosity	1.14519	$\mu\text{m}^2$
	90.000 °		B	1.315903 -	Proportions b/a		
			C	0.000000 -	0.759934	3/4	19/25



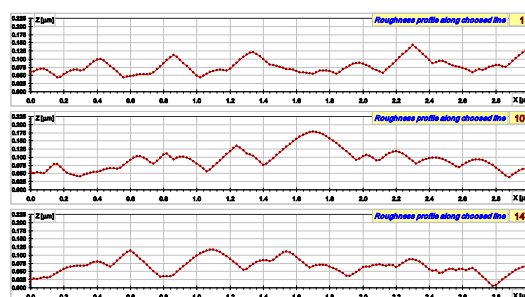
Rys. 5. Rozkład środków stożków, wygenerowany losowym rozkładem równomiernym dla osi X i Y

Do badań wykonano próbki o średnicy 20 mm i grubości 2 mm ze stopu magnezu AZ31, pozyskanego z firmy TECHNO-COAT Oberflächentechnik GmbH, Zittau, Niemcy. Proces szlifowania i polerowania próbek ze stopu magnezu realizowano na dwutarczowej szlifierko-polerce Phoenix Beta 2 produkcji firmy Wirtz Buehler. Obejmował on szlifowanie na krążkach ściernych SiC P600 i SiC P1200, dwuetapowe polerowanie w zawieszynie diamentowej Buehler Metadi<sup>®</sup> 3  $\mu\text{m}$  (I etap) i zawieszynie Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Buehler Masterprep<sup>®</sup> 0,05  $\mu\text{m}$  (II etap) [5]. Podstawowym wymaganiem tego procesu technologicznego było przygotowanie próbek o możliwie małej chropowatości powierzchni oraz usunięcie z ich warstwy wierzchniej (WW) produktów zanieczyszczających.





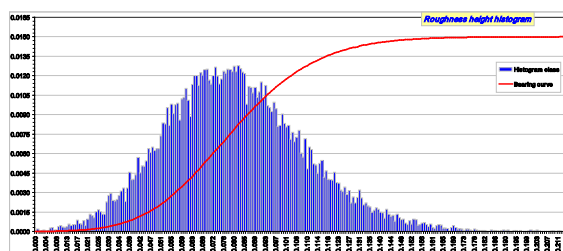
Rys. 6. Powierzchnia wygenerowana wg danych z tab. 1 i tab. 2 oraz rozkładu środków stożków (rys. 5)



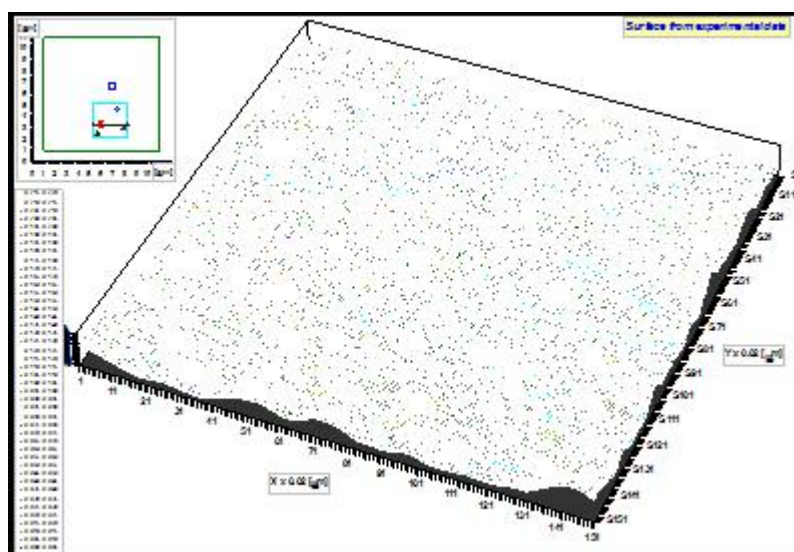
Rys. 7. Przykładowe linie profili chropowatości powierzchni wygenerowanej na rys. 6

Tabela 3. Parametry statystyczne i współczynnik rozwinięcia powierzchni wygenerowanej na rys. 6

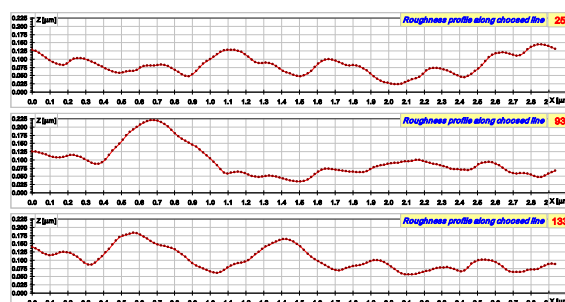
$R_p$	$R_v$	$R_T$	$\mu$	$R_a$	$R_d$	Shape	Peak	$R_{skw}$	$R_{kurt}$	$R_u$
0.2157	0.0000	0.2157	0.0805	0.0225	0.0285	1.2681	3.7866	0.4130	3.4138	1.12858



Rys. 8. Histogram chropowatości i krzywa nośności powierzchni z rys. 6



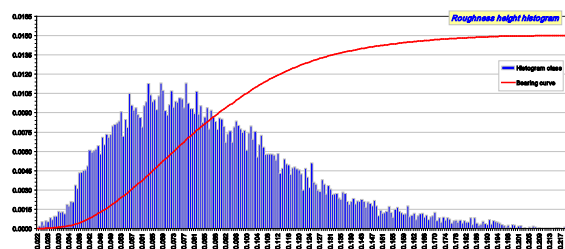
Rys. 9. Wizualizacja powierzchni polerowanego stopu magnezu, zbadanej mikroskopem AFM



Rys. 10. Przykładowe, wybrane linie profilów chropowatości powierzchni pokazanej na rys. 9

Tabela 4. Parametry statystyczne i współczynnik rozwinięcia powierzchni pokazanej na rys. 9

$R_p$	$R_v$	$R_t$	$R_a$	$R_q$	Shape	Peak	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_u$
0.2210	0.0222	0.1988	0.0267	0.0335	1.2578	2.9643	0.8023	3.4755	1.1213



Rys. 11. Histogram chropowatości i krzywa nośności dla powierzchni z rys. 9

Podstawą do oceny nanostruktury WW próbek ze stopu magnezu AZ31 były profilogramy powierzchni w układzie przestrzennym 3D, które uzyskano przy użyciu mikroskopu sił atomowych (AFM) typu VEECO Multimode 5, firmy VEECO, USA. Wykonano profilogramy polerowanej powierzchni stopu magnezu, którą podzielono siatką na pola pomiarowe. Każde pole pomiarowe zawierało  $512 \times 512 = 262144$  punktów pomiarowych. Ze względu na możliwości wizualizacji w arkuszu *Excel*, jednorazowe pole obserwacji mało rozmiary  $151 \times 151 = 22801$  punktów pomiarowych, dla których wykonano obliczenia na modelu matematycznym.

## WNIOSKI

Przeprowadzone badania mikrostruktury geometrycznej powierzchni polerowanego stopu magnezu AZ31 i badania numeryczne przedstawionego modelu potwierdziły jego bardzo dobrą przydatność w modelowaniu powierzchni o zadanym stopniu rozwinięcia. Rozbieżności dla przykładowych powierzchni (rys. 6 i rys. 9) były niewielkie i wyniosły 0,0073, co przy dobrej zgodności pozostałych parametrów statystycznych i geometrycznych (tab. 3 i tab. 4), należy uznać za zadowalające. Największe rozbieżności wystąpiły natomiast w modelowaniu rozkładu (histogramu) wysokości chropowatości (rys. 8 i rys. 11). Szerokie możliwości opracowanego modelu, widoczne w liczbie jego stopni swobody, uzasadniają rozwijanie tej koncepcji modelowania struktury geometrycznej powierzchni oraz eksperymentalną weryfikację modelu w innych procesach obróbki ubytkowej.

## LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., *Pomiary geometryczne powierzchni*. Warszawa, WNT, 2007.
- [2] ANTONIEWICZ J., *Tablice funkcji dla inżynierów*. Warszawa, PWN, 1969.
- [3] BORSUK K., *Geometria analityczna wielowymiarowa.*, Warszawa, PWN, 1977.
- [4] GOŁĄBCZAK M., *Polerowanie stopów magnezu*. W: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2009, 517-526.
- [5] GRIFFITHS B., *Manufacturing Surface Technology*. London, Penton Press, 2001.
- [6] GRZESIK W., *Wpływ obróbki sekwencyjnej na topografię powierzchni stali utwardzonej*. W: *Mechanik*, nr 5-6, 2014, 350-363.
- [7] OCZOŚ K., LUBIMOW V., *Struktura geometryczna powierzchni*. Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2003.
- [8] SCHWARTZ L., *Kurs analizy matematycznej*. Warszawa, PWN, 1980.
- [9] WHITEHOUSE D. J., *Handbook of Surface Metrology*. Institute of Physics, Bristol, 1994.



# **NADZOROWANIE WYPOSAŻENIA DO MONITOROWANIA I POMIARÓW WEDŁUG WYMAGAŃ WYBRANYCH NORM ORAZ PRZEPISÓW PRAWNYCH**

Piotr GRUDOWSKI<sup>1</sup>, Andrzej KWINTOWSKI<sup>2</sup>

## 1. WSTĘP

Przyrządy pomiarowe stanowią zasadniczy element złożonego systemu oceny jakości wyrobów na wszystkich etapach produkcji. Odpowiednio zaprojektowane procedury opisujące procesy kontrolne i pomiarowe, sprawnie zorganizowane i przeprowadzane operacje monitorowania i pomiarów parametrów procesów i produktów oraz skutecznie funkcjonujący nadzór nad wyposażeniem do monitorowania i pomiarów w organizacji są podstawą do wykazania, że produkty są wykonywane zgodnie z wymaganiami, narzuconymi i kontrolowanymi przez klienta.

Celem tego opracowania jest przedstawienie i pogłębiona interpretacja wymagań zawartych w normach PN-EN ISO 9001 [1] i PN-EN ISO 10012 [2] oraz w ustawie „Prawo o miarach”, dotyczących nadzorowania wyposażenia do monitorowania i pomiarów. Zaprezentowane wnioski i spostrzeżenia są między innymi wynikiem doświadczeń autorów, jako audytorów systemów zarządzania w różnych organizacjach oraz przeprowadzonych przez nich wywiadów bezpośrednich podczas audytów certyfikacyjnych i tzw. audytów nadzoru. Ponadto w artykule przedstawiono specyficzne zasady nadzorowania wyposażenia do monitorowania i pomiarów w firmie produkującej wyroby medyczne. Z uwagi na swoją rangę produkcja wyrobów medycznych jest regulowana dodatkowymi wymaganiami tj. normą PN-EN ISO 13485 [3] oraz zasadami GMP - dobrej praktyki wytwarzania wynikającymi m.in. z ustawy „Prawo farmaceutyczne”.

---

<sup>1</sup> Wydział Zarządzania i Ekonomii, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

<sup>2</sup> Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny w Szczecinie, al. Piastów 19, 70-313 Szczecin

## 2. WYMAGANIA NORMY ISO 9001 DOTYCZĄCE WYPOSAŻENIA POMIAROWEGO

Skuteczne funkcjonowanie każdej organizacji jest możliwe jedynie w ścisłym, opartym na wzajemnych korzyściach powiązaniu z jej klientami i dostawcami. Wszelkie procesy wewnętrzne organizacji powinny mieć na celu spełnianie wymagań stawianych przez głównych jej interesariuszy. Norma ISO 9001 wymaga, by organizacja objęła systemem zarządzania jakością cały cykl życia produktu, od analizy potrzeb rynku, aż po okres posprzedażny. W polskiej wersji językowej normy ISO 9001 angielskie rzeczowniki *device* i *equipment* przetłumaczono tak samo - jako „wyposażenie”. Norma terminologiczna ISO 9000 definiuje wyposażenie pomiarowe (*measuring equipment*) jako „przyrząd pomiarowy, oprogramowanie, wzorzec jednostki miary, materiał odniesienia, aparatura pomocnicza lub ich kombinacja, niezbędne do przeprowadzenia procesu pomiarowego”. Wymagania zawarte w normie ISO 9001 zachęcają do wprowadzania podejścia procesowego podczas opracowywania, wdrażania i doskonalenia systemu zarządzania jakością w celu zwiększenia zadowolenia klientów[4]. Wprowadzenie zarządzania procesowego wymaga identyfikacji procesów. Jednocześnie norma ISO 9001 wskazuje przykładowe możliwości grupowania procesów w celu łatwiejszego ich analizowania.

W następstwie identyfikacji, procesy organizacji należy poddać szczegółowej analizie: prześledzić powiązania między nimi, określić stopień wzajemnego oddziaływania oraz ustalić ważność procesów w odniesieniu do strategii organizacji. Po wykonaniu takiej analizy należy określić optymalny sposób zarządzania każdym ze zidentyfikowanych procesów głównych. Działania takie wymagają:

- 1) Zrozumienia i spełnienia wymagań.
- 2) Oceny procesów w kategorii wartości dodanej.
- 3) Bieżącego dostępu do wyników dotyczących funkcjonowania i skuteczności procesu.
- 4) Ciągłego doskonalenia procesów na podstawie wyników obiektywnych pomiarów.

Przygotowane opisy procesów wraz z mapą procesów mają umożliwić pracownikom zrozumienie istoty procesów, ich umiejscowienie w systemie zarządzania oraz, co jest bardzo istotne, wskazać odpowiednie metody monitorowania i oceny procesów. Wymagania zawarte w punkcie 7.6 normy ISO 9001 mają na celu zapewnienie odpowiedniej jakości pomiarów parametrów produktów i procesów. Jest to konieczne, aby można było określić czy wyrób jest zgodny czy też nie. W tym celu należy wyposażenie pomiarowe regularnie identyfikować, wzorcować, regulować, zabezpieczać przed rozregulowaniem i chronić przed uszkodzeniami. Nadzorem należy także objąć oprogramowanie komputerowe wykorzystywane w procesach pomiarowych.

Nadzór nad wyposażeniem do monitorowania i pomiarów rozpoczyna się w momencie wprowadzenia narzędzia pomiarowego do użytkowania w organizacji, a kończy się w momencie jego wycofania z eksploatacji.

Podstawowymi elementami sformalizowanego systemu nadzoru nad wyposażeniem do monitorowania i pomiarów wg interpretacji wymagań p. 7.6 normy ISO 9001 są:

- ewidencja i oznakowanie przyrządów pomiarowych,
- plany kontroli na podstawie okresów ważności,
- weryfikacja wyników kontroli,
- określenie miejsc i sposobów użytkowania tego wyposażenia,
- dokumentowanie historii przyrządów,
- generowanie i nadzorowanie odpowiednich zapisów i dokumentów, w tym w formie elektronicznej.

Jednostki certyfikacyjne ostrożnie odnoszą się do kuszącej możliwości wyłączenia wymagań punktu 7.6 [5] z zakresu systemu jakości wg normy ISO 9001: 2008, gdyż brak nadzoru nad wyposażeniem do monitorowania i pomiarów prowadzić może m.in. do nieskuteczności nadzoru związanego z:

- monitorowaniem i pomiarami procesów (p. 8.2.3 normy),
- monitorowaniem i pomiarami wyrobu (p. 8.2.4 normy),
- monitorowaniem zadowolenia klienta (p. 8.2.1 normy).

Takie stanowisko jest w zgodne z wytycznymi *Auditing Practices Group* (APG) z 15 maja 2006 r. zawartymi w dokumencie „Audytywanie nadzorowania wyposażenia do monitorowania i pomiarów”, opracowanymi we współpracy z ISO/TC 176 i Międzynarodowym Forum Akredytacyjnym IAF. Wytyczne APG rozróżniają przyrządy (*devices*) od sprzętu (*equipment*), zwracając uwagę, że wiele organizacji usługowych o charakterze publicznym, ze względu na rodzaj oferowanych produktów (usług) przeprowadza monitorowanie i pomiary z wykorzystaniem przeglądów, oględzin, pytań egzaminacyjnych, list kontrolnych, ankiet, raportów statystycznych itp. Według wytycznych APG rolę „przyrządów” do monitorowania i pomiarów pełnią różnego rodzaju formularze. Przykładami formularzy wykorzystywanych do monitorowania lub pomiarów procesów mogą być te dotyczące:

- wyników oceny dostawców,
- skuteczności szkoleń,
- zadowolenia klienta,
- kart kontrolnych procesów (np. wg PN-ISO 7870:2006), za pomocą których zbierane są oraz przetwarzamy informacje o procesach.

Metody nadzorowania wyposażenia pomiarowego uzależnione są od jego zamierzonego użycia i wskazują, w jaki sposób powinno być ono wzorcowane lub walidowane. Jeśli organizacja używa sprzętu pomiarowego, należy wskazać dowody,

że potrzeby metrologiczne zostały prawidłowo powiązane z monitorowanymi/mierzonymi procesami. Szczegółowość dokumentowania nadzoru nad wyposażeniem do monitorowania i pomiarów wg normy ISO 9001 wymaga nie tylko spełnienia wymagań klienta dotyczących wyrobu, ale także „...wymagań mających zastosowanie przepisów” związanych np. z prawną kontrolą metrologiczną (np. legalizacją) określonych rodzajów przyrządów pomiarowych.

### 3. WYTYCZNE DOTYCZĄCE POMIARÓW I SYSTEMÓW POMIAROWYCH ZAWARTE W NORMIE PN-EN ISO 10012

Audytorzy normatywnych systemów zarządzania powinni zweryfikować, czy oprócz zapisów dotyczących wyników wzorcowań i kalibracji sprzętu pomiarowego, określona jest niepewność i spójność pomiarowa oraz, że organizacja jest świadoma wdrożenia, odpowiedniego metrologicznie systemu opisanego w normie ISO 10012.

Norma PN-EN ISO 10012 wskazuje kierunki działań dotyczących zarządzania procesami pomiarowymi i potwierdzenia metrologicznego jakości wyposażenia pomiarowego. Wprowadzenie do tej normy definiuje zadanie systemu zarządzania pomiarami, jako „zarządzanie ryzykiem dotyczącym tego, że wyposażenie pomiarowe i procesy pomiarowe mogłyby doprowadzić do niewłaściwych wyników wpływających na jakość wyrobów danej organizacji” [2].

Według zapisów zawartych w normie PN-ISO 10012, wymagania metrologiczne wobec wyposażenia pomiarowego są określane na podstawie wymagań dotyczących wyrobu lub wyposażenia przeznaczonego do wzorcowania, weryfikowania i potwierdzenia jakości pomiarów.

Ze względów praktycznych, wyposażenie do pomiarów często jest dzielone na wskaźniki i mierniki. Podział taki nie jest narzucony przepisami, ale organizacje mogą taki podział wprowadzić po stworzeniu odpowiednich procedur i umotywowaniu. Wynika on głównie z wymaganej dokładności pomiarowej, jako zasadniczego kryterium zapewnienia wiarygodności otrzymywanych wyników pomiarów.

### 4. WYMAGANIA ZAWARTE W USTAWIE „PRAWO O MIARACH”

Szybki rozwój techniki pomiarowej na początku lat 90-tych XX wieku i innowacje technologiczne we wszystkich dziedzinach, także szeroko pojętej metrologii wymusiły dostosowanie istniejących przepisów do wymagań międzynarodowych. Nowe przepisy uporządkowały istniejący stan rzeczy oraz zharmonizowały go z przepisami unijnymi.

Dokumentem regulującym wymagania metrologiczne w Europie jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2004/22/WE z dnia 31 marca 2004 r w sprawie przyrządów pomiarowych (*MID - Measuring Instruments Directive*) [6]. Wymagania metrologiczne przedstawia dokument lub przepis określający sposoby użytkowania

i sprawdzania przyrządu pomiarowego oraz ich cechy i sposoby konstrukcji zapewniające określoną dokładność pomiarów w obecności zmieniających się w szerokim zakresie czynników zewnętrznych. W Polsce wymagania metrologiczne formułuje Główny Urząd Miar (GUM), który jest naczelnym organem krajowej administracji miar. Prawną podstawę działania krajowej administracji miar określała ustawa z dnia 3 kwietnia 1993 r. o utworzeniu Głównego Urzędu Miar [7].

Ustawa z dnia 11.05.2001 r. „Prawo o miarach” to ustawa, która określa system miar, a także zasady jego stosowania w obrocie publicznym i aktach oraz w czynnościach urzędowych i zawodowych. Znajomość podstawowych pojęć i przepisów zdefiniowanych przez „Prawo o miarach” umożliwia zakup i użytkowanie przyrządów pomiarowych, w odniesieniu do których nie ma zastrzeżeń co do ich użytkowania, mechanizmy zatwierdzania typów, wprowadzania ich do obrotu i zasady ich legalizacji.

Szczegóły postępowania przy wprowadzaniu przyrządów pomiarowych na rynek Polski oraz konkretne metody nadzorowania zostały określone w dwóch rozporządzeniach Ministra Gospodarki [7]:

- 1) Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 7 stycznia 2008 r. w sprawie prawnej kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych.
- 2) Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 27 grudnia 2007 r. w sprawie rodzajów przyrządów pomiarowych podlegających prawnej kontroli metrologicznej oraz zakresu tej kontroli.

Rozporządzenia te regulują kwestie:

- zatwierdzenia typu przyrządu pomiarowego,
- legalizacji pierwotnej i legalizacji jednostkowej,
- legalizacji ponownej.

Ponadto w dokumentach tych szczegółowo określono stosowane wzory obowiązujących dokumentów, wzory oznaczeń, cech legalizacyjnych i okresy ważności poszczególnych typów legalizacji. Wspomniane akty prawne określają też rodzaje przyrządów pomiarowych podlegających prawnej kontroli metrologicznej oraz definiują zakresy tej kontroli.

O ile norma PN-EN ISO 10012 jest rozwinięciem normy PN-EN ISO 9001 w zakresie nadzoru nad wyposażeniem do monitorowania i pomiarów, to ustawa „Prawo o miarach” jest pomostem łączącym obie te normy z przepisami międzynarodowymi. Dopiero połączenie tych trzech dokumentów oraz zastosowanie się do ich wymagań i wytycznych pozwala organizacji na pełne i prawidłowe zajęcie się procesem nadzoru nad wyposażeniem pomiarowym.

## 5. WYMAGANIA DOTYCZĄCE MONITOROWANIA I POMIARÓW W NORMIE PN-EN ISO 13485

Norma PN-EN ISO 13485:2012 *Wyroby medyczne. Systemy zarządzania jakością. Wymagania do celów przepisów prawnych* jest branżowym uszczegółowieniem normy PN-EN ISO 9001:2009. Różnice pomiędzy normami wynikają głównie ze specyfiki produkcji wyrobów medycznych. Norma ta ma za zadanie ułatwienie zharmonizowania przepisów dotyczących wyrobów medycznych z systemami zarządzania jakością. Definicję wyrobu medycznego podaje punkt 3.7 normy PN-EN ISO 13485:

*Wyrób medyczny* to każdy instrument, aparat, narzędzie, urządzenie, implant, odczynnik in vitro lub wzorzec, oprogramowanie, materiał lub inny podobny lub związany artykuł, przeznaczony przez wytwórcę do zastosowania pojedynczo lub w zestawie, u ludzi do jednego celu lub więcej określonych celów:

- diagnozowania, zapobiegania, monitorowania, leczenia choroby lub łagodzenia objawów,
- diagnozowania, monitorowania, leczenia, łagodzenia skutków lub kompensowania skutków urazu,
- badania, zastępowania, modyfikowania lub wspomagania budowy anatomicznej lub procesu fizjologicznego,
- wspomagania lub podtrzymywania życia,
- regulacji poczęć,
- dezynfekcji wyrobów medycznych,
- dostarczania informacji do celów medycznych za pomocą badania in vitro próbek pobranych z ciała ludzkiego,

który nie osiąga swego głównego przewidzianego działania, w ciele ludzkim lub na nim, środkami farmakologicznymi, immunologicznymi lub metabolicznymi, ale którego działanie może być wspomagane tego rodzaju środkami”[3].

Podstawowa różnica dotycząca nadzoru nad wyposażeniem do monitorowania i pomiarów pomiędzy normami PN-EN ISO 13485:2012 a PN-EN ISO 9001:2009, to brzmienie akapitu drugiego punktu 7.6:

„Organizacja powinna ustanowić procesy w celu zapewnienia, że monitorowanie i pomiary mogą być i są wykonywane w sposób, który jest spójny z wymaganiami dotyczącymi monitorowania i pomiarów”. (PN-EN ISO 9001:2009).

„Organizacja powinna ustanowić udokumentowane procedury w celu zapewnienia, że monitorowanie i pomiary mogą być i są wykonywane w sposób, który jest spójny z wymaganiami dotyczącymi monitorowania i pomiarów”. (PN-EN ISO 13485:2012).

W normie PN-EN ISO 9001:2009 zawarta jest uwaga: „Potwierdzenie zdolności oprogramowania komputerowego do zamierzonego zastosowania zwykle obejmuje jego weryfikację i zarządzanie konfiguracją w celu utrzymania jego przydatności do użycia”.

Z powyższego wynika, że najistotniejsza różnica wprowadzona w normie PN-EN ISO 13485:2012, to obowiązek przygotowania udokumentowanych procedur dotyczących procesów monitorowania i pomiarów. Zmiana taka wynika z kwestii używania wyrobów medycznych do bezpośredniej ingerencji w organizm człowieka. Dlatego też, te krytyczne z punktu widzenia bezpieczeństwa uwarunkowania są narzucone przez normę, a nie pozostawione do swobodnego wyboru przez organizację.

Odnosząc się do wymagań tej normy należy wspomnieć o dodatkowych uwarunkowaniach prawnych. Organizacje produkujące wyroby medyczne muszą przestrzegać regulacje narzucone przez systemy GMP - (Good Manufacturing Practice) - Dobrej Praktyki Produkcyjnej, przepisy stworzone na fundamencie „Prawa farmaceutycznego”. W Polsce zasady GMP ~~jest~~ są regulowane Rozporządzeniem Ministra Zdrowia z dnia 1 października 2008 roku [8].

Oba te fragmenty stanowią wymagania, „...których spełnienie jest warunkiem uzyskania zezwolenia na wytwarzanie lub zezwolenia na import produktów leczniczych”. Warto także zauważyć, iż w §2 omawianego rozporządzenia jest zawarta informacja zezwalająca na odstępstwo od w/w zasad, jeżeli wytwórca zastosuje alternatywne metody zapewnienia jakości pod warunkiem ich walidacji\* i zapewnienia, że pozwolą uzyskać zapewnienie jakości na poziomie równoważnym z wymaganiami GMP. Takie odstępstwo pozwala na bezkonfliktowe wprowadzenie i funkcjonowanie obok siebie zasad spełniających wytyczne kilku aktów prawnych, co pozostawia furtkę na wybranie dogodniejszego dla organizacji opcji.

Obydwa przytoczone powyżej akty prawne zajmują się także kwestiami monitorowania i pomiarów. Przykładowo dokument GMP stanowi, że warunki środowiskowe (temperatura i wilgotność) pomieszczeń wykorzystywanych do produkcji i magazynowania muszą być mierzone, a wyniki pomiaru trwale rejestrowane przy pomocy termografów i higrografów (rejestracja na papierze z datą i czasem rejestracji) lub w wersji nowocześniejszej poprzez elektroniczny zapis i odczyt zarchiwizowanych danych w systemie komputerowym. Należy zatem zaimplementować niezależny system nadzorujący, oparty na miernikach, przy czym nie należy korzystać z wskaźników zainstalowanych w klimatyzatorach i systemie ogrzewania. Wszystko to po to, aby mieć niezależny od awarii urządzeń system powiadamiania o niebezpiecznej zmianie parametrów procesów poza granice przyjętych limitów krytycznych.

---

\* Walidacja (validation) – udokumentowany program dający wysoki stopień pewności, że określony proces, metoda lub system będzie w sposób powtarzalny prowadzić do otrzymania wyników, spełniających określone kryteria akceptacji

## 6. PODSUMOWANIE

Nadzór nad wyposażeniem do monitorowania i pomiarów jest kluczowym elementem każdego certyfikowanego systemu zarządzania opartego na kryterium jakości. Nadzór ten wywiera znaczący wpływ na jakość procesu realizacji produktu oraz na produkt końcowy. Zapewnienie wiarygodności pomiarów wymaga odpowiedniego ich zaplanowania, doboru właściwego wyposażenia pomiarowego i dostosowania parametrów metrologicznych tego wyposażenia oraz jego utrzymania w sprawności, odpowiedniego nadzoru nad nim, w tym zapewnienia spójności pomiarowej. Zaufanie do informacji dotyczącej jakości produktów wynika głównie z odpowiednio zaplanowanych i rzetelnie wykonanych działań metrologicznych. Dlatego też należy akcentować rolę tych działań w systemowym zarządzaniu jakością oraz wskazywać kierunki i konkretne metody ich doskonalenia.

### LITERATURA

- [1] PN-EN ISO 9001:2009 „Systemy zarządzania jakością. Wymagania”.
- [2] PN-EN ISO 10012: 2004 „Systemy zarządzania pomiarami. Wymagania dotyczące procesów pomiarowych i wyposażenia pomiarowego”.
- [3] PN-EN ISO 13485:2012 „Wyroby medyczne. Systemy zarządzania jakością. Wymagania do celów przepisów prawnych”.
- [4] GRUDOWSKI P., *Podejście procesowe w systemach zarządzania jakością w małych i średnich przedsiębiorstwach*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej (Seria Monografie), 2007.
- [5] GRUDOWSKI P. *Pomiary, analiza i doskonalenie jako kryteria auditu systemu zarządzania jakością*. W: Problemy Jakości, vol. 38, nr 03/2006.
- [6] Dyrektywa 2004/22/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 31marca 2004 r. w sprawie przyrządów pomiarowych.
- [7] Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. - Prawo o miarach (DU.04.243.2441).
- [8] Rozporządzenie Ministra Zdrowia RP z dnia 1 października 2008 r. W sprawie wymagań Dobrej Praktyki Wytwarzania (DU Nr 184, poz. 1143 z 17.X.2008r.).



# **HYDROSTATIC GAS JOURNAL BEARINGS WITH ASYMMETRICALLY ARRANGED INHERENT ORIFICES TO SUPPORT LARGE-LOAD ROTORS**

Tomohiko ISE<sup>1</sup>, Takaaki ITOGA<sup>1</sup>, Toshihiko ASAMI<sup>1</sup>, Kazuya IMANISHI<sup>1</sup>,  
Fumiyoshi KIMURA<sup>1</sup> and Yoshiyuki YAMAGUCHI<sup>1</sup>

## **1. INTRODUCTION**

Conventional externally pressurized gas journal bearings have been developed for high-precision and high-speed rotating machinery. Different restrictor shapes have been developed by many researchers. Recently, a new type of externally pressurized gas journal bearing for supporting large load rotors was developed by the authors. This bearing has potential applications including vibration exciter rotors, roller pulverizers, weaving machines, and medical devices. The developed bearings have an asymmetrical bearing area or an asymmetrical gas supply mechanism [1–6]. These mechanisms provide large load capacity compared with conventional bearings.

In a previous study, rectangular slot restrictors were used for the bearings since the load capacity is large compared with the other restrictors such as inherent orifices and orifice restrictors. However, the machining of the slot restrictors is difficult, and the manufacturing cost is high. For this reason, it is thought that the use of inherent orifices is suitable for such a bearing since the machining of this restrictor is relatively simple. The restrictors have a simple configuration and are made by drilling. However, the load capacity with inherent orifices is small compared with slot restrictors since the gas pressure is supplied at points as opposed to lines. Thus, in order to obtain a high load capacity, a hydrostatic journal gas bearing with asymmetrically arranged inherent orifices has been developed for large load rotors.

In this study, numerical calculations of the bearing characteristics are conducted, and the results are compared with the conventional and previously researched bearings.

---

<sup>1</sup> Mechanical and system engineering, University of Hyogo, 2167 Shosha, Himeji, Hyogo 671-2280, Japan

Verification tests using manufactured bearings are also conducted to verify the bearing characteristics for practical use.

## 2. CONFIGURATION OF THE PROPOSED BEARING

A schematic of the bearing configuration is shown in Fig. 1. The shaft has notched parts because it produces a large centrifugal force during rotation, which loads the bearing. This bearing has asymmetrically arranged orifices in the circumferential direction to support the centrifugal force. In conventional bearings, inherent orifice restrictors are arranged at equal intervals in the circumferential direction. The restrictors are installed in the bearing. In this study, the orifices are installed in the rotor. The full cylindrical bearing supports the shaft. A single-row admission-type bearing is considered. Three types of restrictor arrangements are considered in this study. The conventional equal interval type is called Type A and is shown in Fig. 2(a). Feed holes are installed in Type B (Fig. 2(b)); here, seven holes are installed in the lower half (loading side), and one hole is installed in the upper half (counter-loading side). Type C (Fig. 2(b)) is the same as Type B, but six holes are installed in the lower half, and two holes are installed in the upper half. The eccentricity ratio of the bearing is defined as shown in Fig. 1, where below the bearing center is positive.

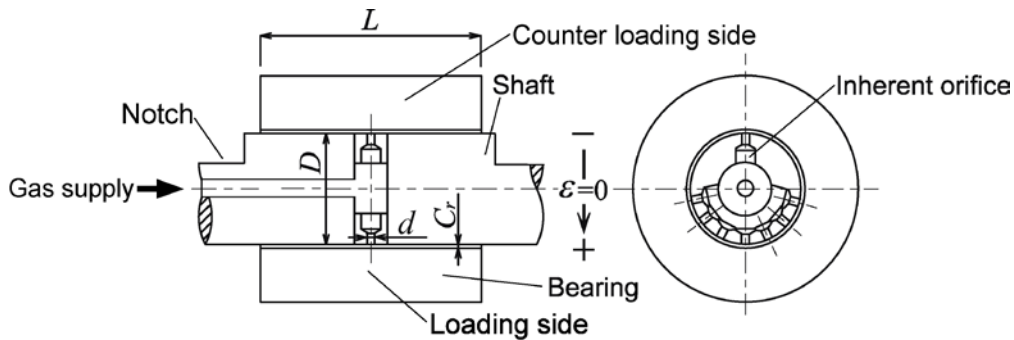


Fig. 1. Configuration of the bearing

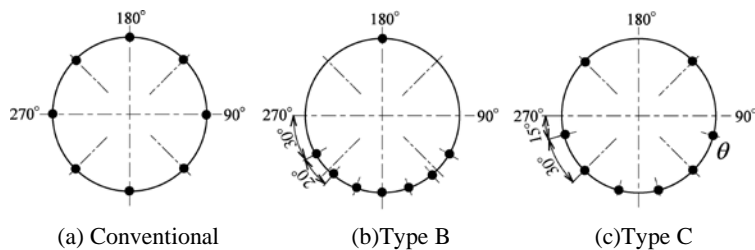


Fig. 2. Arrangement of feed holes in the proposed bearing

### 3. BEARING STATIC CHARACTERISTICS

#### 3.1 NUMERICAL CALCULATION

In this study, numerical calculations of the proposed bearing characteristics are performed using the divergence formulation method [7,8]. The results are compared with the experimental results in the following section. The calculation model conditions are as follows:  $D = 60$  mm,  $L = 120$  mm,  $d = 0.5$  mm, and  $C_r = 0.03$  mm. The supply gas pressure is set at  $p_s = 0.2$  to  $0.7$  MPa with a step of  $0.1$  MPa (gauge). The results are compared with the experimental results.

#### 3.2 EXPERIMENTAL SETUP

Figure 3 shows a schematic of the experimental setup. The test shaft is fixed horizontally to the high-stiffness frame, and the test bearing is set at the center of the rotor. Pressurized air is supplied to the shaft from an external source through a mist separator, an air filter, a regulator, a flow meter, and a pressure meter. Load is added to the bearing housing by a load screw from the lower side. The load values are measured by a load cell set between the load screw and the bearing. The displacement of the bearing is measured by two non-contact type displacement meters set at two separate points on the upper side of the bearing to compensate for the bearing inclination. In order to support the asymmetric load due to rotation, the shaft consists of three parts to supply pressurized air to the bearing surface, i.e., a hollow shaft, a supply ring, and a solid shaft. A gas flow channel is installed in the hollow shaft, and feed holes are machined along the circumference of the supply ring. A rotary joint is attached at the end of the rotor to supply the air.

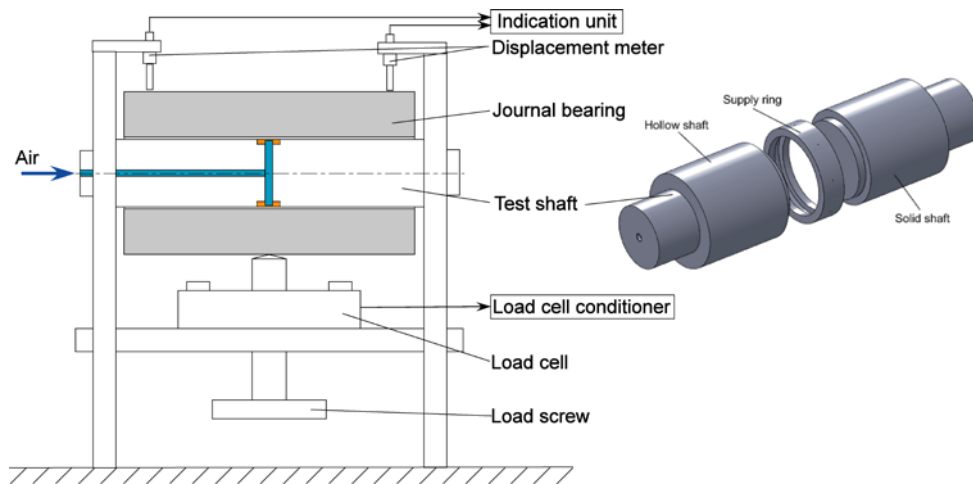


Fig. 3. Experimental setup for the bearing static test

### 3.3 EXPERIMENTAL RESULTS

Figure 4 shows the test results for the load capacities of the three types of bearings. The lines and points represent the calculated values and the experimental results, respectively. The experimental results agree with the calculated values. The load capacity increases according to the supply gas pressure. In addition, it also increases according to the asymmetry of the gas supply holes. These test results show that the asymmetry of the gas supply hole positions provides a high load capacity compared with conventional bearings.

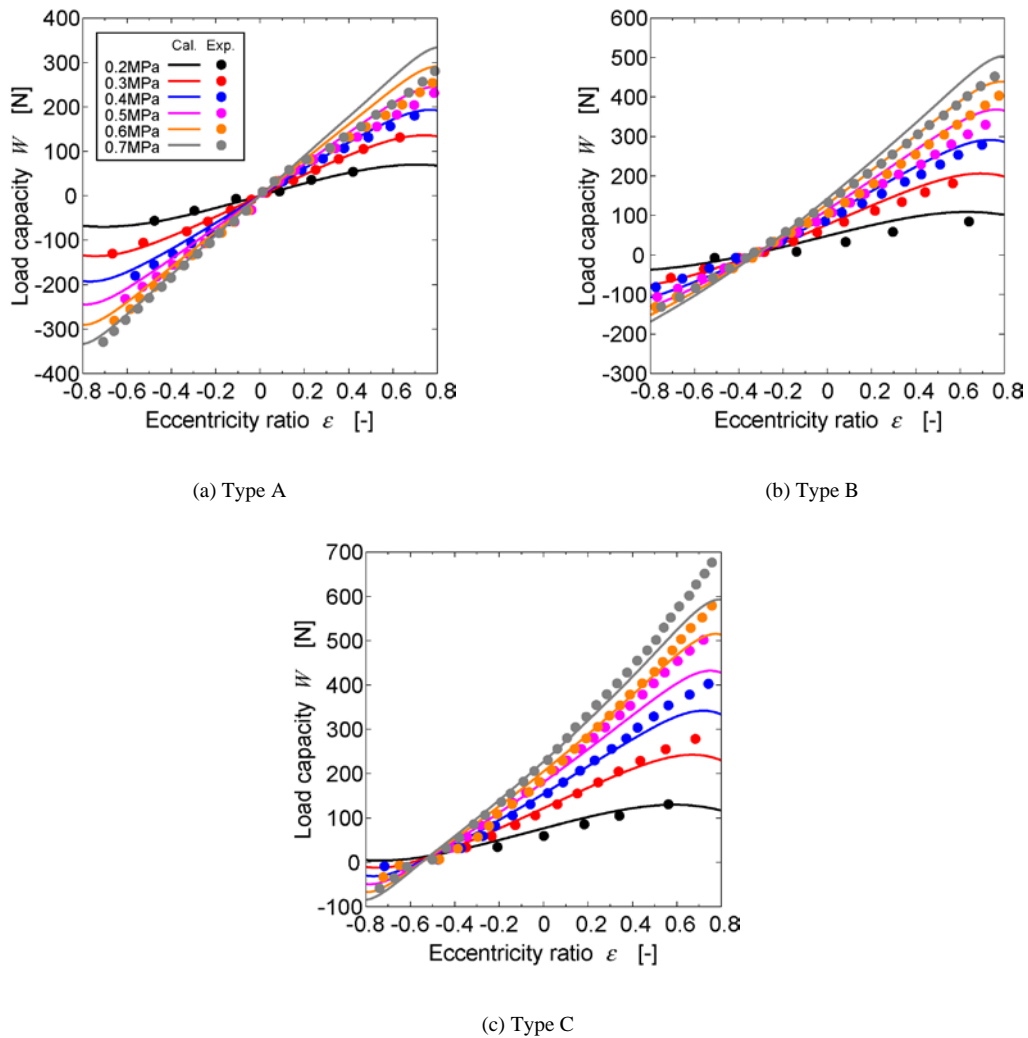


Fig. 4. Experimental results for the load capacity

Figure 5 shows the gas flow rate of the bearings. The legend is the same as described above. The values increase by increasing the supply gas pressure. The gas flow decreases with a high eccentricity ratio in the asymmetric condition. This is caused by an increase in the resistance of gas flow; in other words, a decrease in the eccentric side clearance. This phenomenon is effective for supporting large load rotors because a large load can be achieved with a low gas flow rate; as a result, the power consumption will be reduced in practical use. The measured values of the flow rate differ from the calculated values. It is thought that this difference is caused by the surface roughness, roundness, and cylindricity of the rotor because the rotor consists of three parts, as mentioned above.

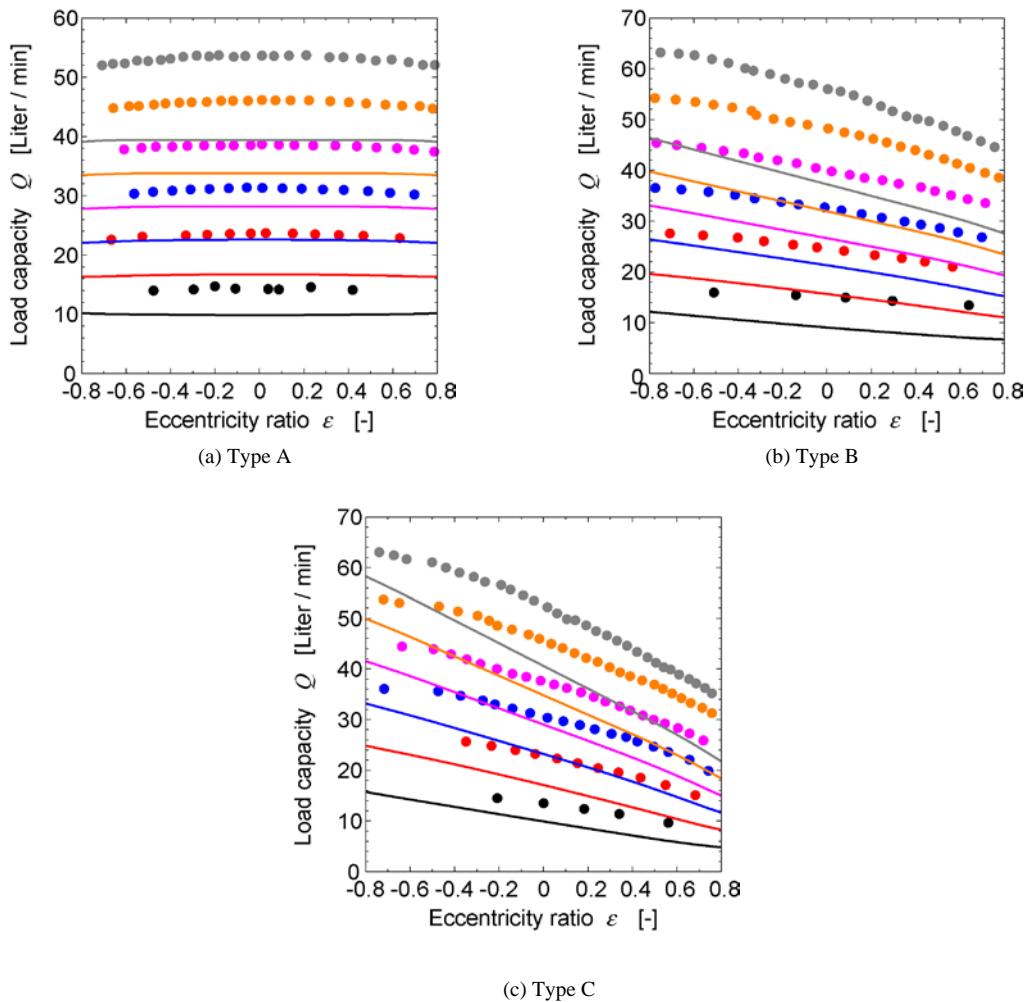


Fig. 5. Experimental results for the gas flow rate

#### 4. CONCLUSION

In order to support large load rotors such as in vibration exciter rotors, roller pulverizers, weaving machines, and medical devices, hydrostatic gas journal bearings with asymmetrically arranged inherent orifices were proposed. The construction and working mechanism of the bearing were explained. The static characteristics were analyzed numerically and compared with those of conventional bearings. The characteristics of the proposed asymmetric bearing were verified experimentally, and the results are listed as follows:

- Asymmetric supply type hydrostatic journal gas bearings have a large load capacity compared with conventional symmetric bearings.
- Asymmetric supply type hydrostatic journal gas bearings support large loads with a lower gas flow rate compared with conventional hydrostatic gas bearings.
- The characteristics of asymmetric supply type hydrostatic journal gas bearings were verified experimentally.

#### REFERENCES

- [1] ISE T., et al., *Hydrostatic Asymmetric Journal Air Bearings for ACROSS Transmitters*. 7th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics, 2006, No.185.
- [2] ISE T., et al., *Asymmetric Supply Type Hydrostatic Journal Gas Bearings to Support Large Load Rotors*. W: Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 6, 1, 2012, 149-157.
- [3] ISE T., et al., *Design and Workout of ACROSS Transmitters Using Air Bearings*. W: Active Geophysical Monitoring, 40, 2010, 193-209.
- [4] ISE T., et al., *Hydrostatic Asymmetric Journal Gas Bearings for Seismic ACROSS Transmitters-Improvement of Safety Operation by Supply Gas Pressure Control under the Rotational Frequency Modulation*. W: Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 1, 5, 2007, 681-689.
- [5] ISE T. et al., *Hydrostatic Asymmetric Journal Gas Bearings for Largely Unbalanced Rotors of Seismic ACROSS Transmitters*. W: Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 1, 1, 2007, 93-101.
- [6] ISE T. et al., *Asymmetric Supply Type Hydrostatic Journal Gas Bearings to Decrease the Driving Power of ACROSS Transmitters*. The 2nd Joint International Conference on Multibody System Dynamics, 2012, No.12345.
- [7] JSME Research Group for Gas Bearings, *Theory, design and application of gas bearings, Text book for the course of gas bearings*. 1973, 80, JSME (in Japanese).
- [8] TOGO S., *Gas Bearing Design Guide Book*, 2002, Kyoritsu Shuppan Co., Ltd. (in Japanese).

# **ANALIZA WPLYWU STRATEGII POMIARU PRZEDMIOTU PRÓBNEGO WG NORMY PN-ISO 10791-7/2000 NA OCENĘ DOKŁADNOŚCI OBRABIARKI**

Elżbieta JACNIACKA<sup>1</sup>, Leszek SEMOTIUK<sup>1</sup>

## **1. WSTĘP**

Obrabiarki sterowane numerycznie stanowią obecnie zdecydowanie największą grupę obrabiarek w wielu przedsiębiorstwach zajmujących się wytwarzaniem elementów maszyn oraz narzędzi. Głównymi zagadnieniami związanymi z ich eksploatacją są: diagnostyka oraz obsługa techniczna. Szczegółowe zalecenia dotyczące obsługi technicznej konkretnej obrabiarki precyzuje dokumentacja techniczno-ruchowa. Bardziej skompilowanym jest proces diagnostyki obrabiarek.

Obecnie jest wiele diagnostycznych systemów pomiarowych. Pozwalają one na szybką diagnostykę stanu technicznego obrabiarki. Można między innymi wymienić takie systemy diagnostyczne jak: interferometr laserowy, QC20-W ballbar, 3D quickSET, R-test. Wiele ośrodków badawczych prowadzi badania diagnostyczne z zastosowaniem wyżej wymienionych systemów pomiarowych.

Te systemy diagnozują stan obrabiarki bez obciążenia próbą pracy. O dokładności obróbki, oprócz stanu geometryczno-kinematycznego obrabiarki, decyduje również jej sztywność. Dlatego też, metoda pozwalająca na diagnostykę stanu obrabiarki uwzględniająca dynamikę procesu skrawania jest uzupełnieniem metod wymienionych powyżej.

Polska norma PN-ISO 10791-7 (tłumaczenie angielskiej normy ISO 10791-7:1998) opisuje warunki badania centrów obróbkowych poprzez sprawdzenie dokładności obrobionego przedmiotu. Podstawową zaletą tej metody jest jej znikomy koszt w porównaniu do innych systemów. Norma opisuje geometrię przedmiotu próbnego, technologię jego wykonania oraz metodykę prowadzenia pomiarów. Zaobserwowane błędy kształtu obrobionego przedmiotu dają obraz stanu technicznego obrabiarki. Na

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38D

podstawie cyklicznie wykonywanych przedmiotów próbnych prezentowanych w normie można zbudować historię stanu technicznego obrabiarki. Trudno tutaj będzie określić bezpośrednie zależności pomiędzy błędami kształtu a stanem obrabiarki, który je wywołuje, natomiast łatwiej będzie zdecydować, w którym momencie przeprowadzić diagnostykę obrabiarki za pomocą odpowiedniego systemu diagnozującego.

Wykonanie przedmiotu próbnego nie jest problemem, natomiast zbudowanie odpowiedniej strategii pomiaru nastręcza pewnych trudności. Norma precyzuje, które wielkości należy zmierzyć, określa bazy pomiarowe, ale już nie określa, które należy wybrać elementy zastępcze.

Jednym z kluczowych etapów prowadzenia procesów wytwarzania jest kontrola wytwarzanych przedmiotów. Jest to proces złożony i dlatego też należy go dokładnie zaplanować.

## 2. STRATEGIA POMIARU

Strategia pomiaru obejmuje wiele czynników, a między innymi:

- dobór przyrządów pomiarowych,
- określenie strategii pobierania próbek z partii kontrolowanych wyrobów,
- sposób mocowania przedmiotu,

a w przypadku techniki współrzędnościowej dodatkowo:

- wybór trzpieni pomiarowych,
- wybór elementów skojarzonych,
- liczbę punktów i strategię próbkowania
- określenie sposobu opracowania wyników.

Pierwszym etapem jest dobór strategii pobierania próbek z partii kontrolowanych wyrobów. Udowodniono, że istnieje ścisły związek pomiędzy doбором strategii pobierania próbek a sposobem oceniania błędów kształtu. Oczywiście liczność próby ma też istotny wpływ na koszty prowadzonych procesów kontroli [7, 8, 11]. Kolejnym istotnym etapem jest (zakładając, że pomiary prowadzone są na maszynie współrzędnościowej) ustalenie ilości punktów pomiaru. Nierozsądne zaplanowanie strategii na tym etapie pomiaru może być czynnikiem generującym największą składową niepewności pomiaru [7]. Punkty powinny być rozmieszczone równomiernie na mierzonym elemencie. Niektórzy proponują jednak, żeby koncentrować punkty pomiarowe w obszarach najbardziej odbiegających od idealnego modelu geometrycznego. Taki wybór punktów pomiarowych powinien zapewnić powtarzalność szacowanych błędów oraz zmniejszyć niepewność pomiaru [1]. Oczywiście ocena błędów kształtu w tym przypadku będzie następstwem stosowania odpowiednich algorytmów obliczeniowych zaimplementowanych do oprogramowania sterującego współrzędnościową maszyną pomiarową. Nie jest to jednak regułą, ponieważ proponowane są inne algorytmy obliczeniowe pozwalające na ocenę błędów

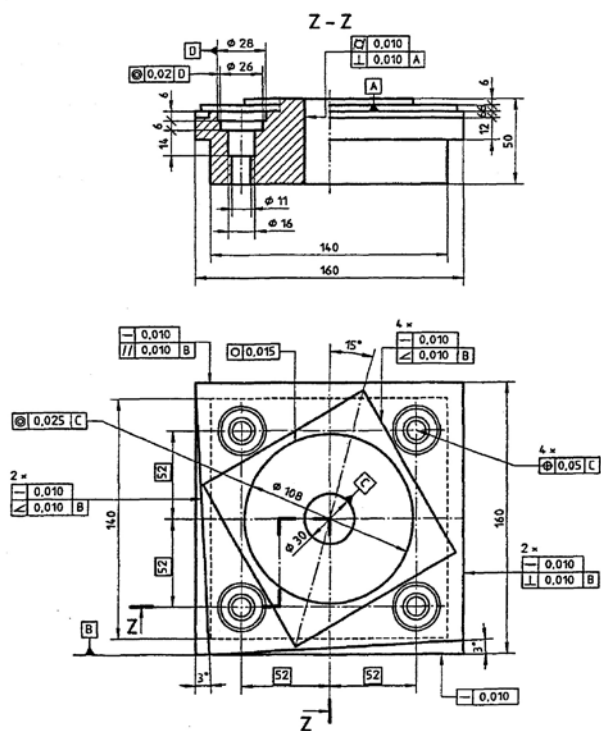


kształtu zgodnie z międzynarodowymi normami. W takim wypadku prowadzenie analizy błędów może odbywać się w postaci off-line (bez kontaktu z maszyną pomiarową) co jest niewątpliwą zaletą tej metody [2, 6].

Niniejszy artykuł ma na celu określenie wpływu doboru elementów skojarzonych na ocenę błędów kształtu. Jest to zagadnienie bardzo istotne w przypadku oceny stanu geometrycznego obrabiarki na podstawie dokładności wykonania przedmiotu próbnego opisanego w normie [9].

### 3. NORMA PN-ISO 10791-7: 2000

Norma PN-ISO 1079-7: 2000 - *Warunki badania centrów obróbkowych, Arkusz 7: Dokładność obrobionego przedmiotu próbnego*, określa dwa typy przedmiotów próbnych. Przedmioty próbne oznaczone jako ISO 10791-7-A160 oraz A320 służą do oceny pozycjonowania i obróbki zarysów, natomiast ISO 10791-7-B80 oraz B160 do oceny płaskości powierzchni po frezowaniu czołowym. Na rysunku 1 przedstawiono przedmiot typu A – mały.



Rys. 1. Mały przedmiot próbny do obróbki zarysów [9]

W tabelicy 3 w/w normy podano sposób sprawdzenia dokładności geometrycznej przedmiotu próbnego po obróbce zarysów. Preferowane są pomiary

współrzędnościowymi maszynami pomiarowymi. Inne techniki pomiarowe są dopuszczane pod warunkiem, że zapewniają taką samą dokładność. Stosowane czujniki pomiarowe powinny mieć rozdzielczość 0,001 mm lub wyższą. Porównując dane zawarte w tabelicy 3 i na rysunku 1 można zauważyć brak konsekwencji. W tab.3 zalecane jest sprawdzenie kąta zawartego pomiędzy przekątną kwadratu górnego i bazą B, kąt ten jest równy  $75^{\circ}$  a jego tolerancja 0,010 mm. Natomiast na rysunku podany jest kąt pomiędzy osią symetrii przedmiotu próbnego i przekątną górnego kwadratu –  $15^{\circ}$  i nie jest tolerowany.

W tabelicy 3 normy PN-ISO jedną z cech sprawdzanych jest współosiowość okręgu zewnętrznego i otworu C. Tak sformułowanie wymagania jest trudne do interpretacji, ponieważ można wyróżnić następujące rodzaje tolerancji współosiowości i współosiowości (na rysunkach oznaczane są takim samym symbolem):

- współosiowość punktu względem punktu,
- współosiowość prostej względem prostej,

Nie przewiduje się przypadku współosiowości prostej i punktu jak to zostało zapisane w tab.3. Na rysunku 1 tolerancja współosiowości została oznaczona na rzucie z góry, co można zinterpretować jako tolerancję współosiowości.

Trudność w interpretacji sprawia także tolerancja położenia otworów pogłębionych względem osi otworu C. Na rysunku została ona oznaczona jako tolerancja pozycji. Nie został jednak określony układ baz. Można przypuszczać, że bazą główną jest płaszczyzna bazowa A.

Norma PN-ISO 10791-7: 2000 nie precyzuje strategii pomiarów współrzędnościowych. Podaje jedynie minimalną liczbę punktów próbkowania dla pomiarów odchyłek kształtu i kierunku.

#### 4. METODYKA BADAŃ I ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

Przedmiotem pomiarów był przedstawiony na rys.1 mały przedmiot próbny oznaczony jako ISO 10791-7-A160. Przedmiot został wykonany ze stopu aluminium 2017 A na frezarskim centrum obróbkowym FV-580A ze sterowaniem numerycznym Fanuc OiMC.

Pomiary mające na celu określenie wpływu strategii na ocenę dokładności przedmiotu próbnego zostały wykonane na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Vista – Zeiss ze sterownikiem Renishaw UCC2 i oprogramowaniem sterująco-pomiarowym Power Inspect.

Jest wiele opracowań opisujących wpływ liczby punktów i strategii próbkowania na niepewność pomiaru techniką współrzędnościową np.: [5, 12], dlatego w niniejszej pracy skupiono się na wpływie wybranych elementów skojarzonych.

Wybór przyrządów pomiarowych jest bardzo ważnym elementem strategii pomiaru. Z tego względu wykonano także pomiary wysokościamiernikiem Tesa MicroHite 350 Plus z końcówką IG13 umożliwiającą pomiar odchyłki

prostoliniowości, prostopadłości, równoległości oraz kątów. Pomiary okrągłości i współśrodkowości przeprowadzono z wykorzystaniem okrągłościomierza Hommel Form Tester 1000.

Współrzędnościową techniką pomiarową wykonano pomiary wszystkich cech wymienionych w tab.3 normy PN ISO PN-ISO 10791-7: 2000 zmieniając, tam gdzie to było możliwe, rodzaj elementu skojarzonego. Za pomocą wysokościomierza wykonano pomiar odchyłki prostoliniowości i prostopadłości na płaszczyźnie prostopadłej do bazy B. Pomiar odchyłki okrągłości okręgu zewnętrznego oraz współśrodkowości okręgu zewnętrznego i okręgu leżącego na walcu wewnętrznym wykonano z zastosowaniem okrągłościomierza. Jako wyniki pomiaru przyjęto średnią arytmetyczną z wykonanej serii. Standardową niepewność pomiaru oszacowano procedurą typu A, dla niepewności rozszerzonej przyjęto współczynnik rozszerzenia  $k = 2$  [10]. Hipotezę o równości średnich arytmetycznych testowano z zastosowaniem testu T-Studenta na poziomie ufności  $\alpha=0,95$  [10]. Wartość krytyczna statystyki T-Studenta dla  $t=2,179$ .

#### 4.1. POMIAR ODCHYLEK KSZTAŁTU

Odchyłka okrągłości okręgu zewnętrznego została wyznaczona techniką współrzędnościową z 15 punktów próbkowania równomiernie rozłożonych na odwodzie. Mierzony okrąg leżał w połowie wysokości walca zewnętrznego. Pomiar okrągłościomierzem wykonano w tej samej płaszczyźnie. W tab. 1 zamieszczono wyniki pomiarów.

Tab. 1. Wyniki pomiarów odchyłki okrągłości

Strategia	Odchyłka [mm]	Niepewność rozszerz. [mm]	Tolerancja [mm]	Ocena
WMP	0,0200	0,0008	0,015	odrzucony
Okrągłościomierz	0,0213	0,0004	0,015	odrzucony

Zmierzona średnia odchyłka okrągłości w obydwu przypadkach przekracza dopuszczalną wartość. Pomiary okrągłościomierzem prowadzone są w sposób ciągły, dlatego zaobserwowano większą wartość odchyłki. Natomiast niepewność jest dwukrotnie mniejsza. Różnica pomiędzy odchyłkami wynosi 1  $\mu\text{m}$ . Wartość statystyki testowej  $t= 2,946$  jest nieco większa od wartości krytycznej, ale nie ma to wpływu na ocenę przedmiotu.

Odchyłkę prostoliniowości mierzono dla linii leżącej na płaszczyźnie prostopadłej do bazy B. Norma PN-ISO 10791-7: 2000 zaleca, aby przy pomiarach współrzędnościowych dotknąć powierzchnię mierzoną w minimum dziesięciu punktach. Podczas pomiarów przy pomocy wysokościomierza przedmiot próbny był ustawiany na płycie pomiarowej na płaszczyźnie oznaczonej jako baza B. W tab.2

zamieszczono wyniki pomiarów prostoliniowości linii leżącej na płaszczyźnie prawej względem bazy B.

Tab. 2. Wyniki pomiarów odchyłki prostoliniowości

Strategia	Odchyłka [mm]	Niepewność rozszerz. [mm]	Tolerancja [mm]	Ocena
WMP	0,0030	0,0005	0,010	zaakceptowany
Wysokościomierz	0,0035	0,0005	0,010	zaakceptowany

Wyniki pomiaru odchyłki prostoliniowości zaprezentowane w tab.2 są równe. Potwierdza to również wartość statystyki testowej  $t = 1,397$ . Nie ma więc podstaw do odrzucenia hipotezy o równości średnich. Podobne rezultaty dała analiza wyników pomiaru prostoliniowości dla lewego boku kwadratu zewnętrznego i czół skośnych powierzchni.

#### 4.3. POMIAR ODCHYŁKI PROSTOPADŁOŚCI

Odchyłkę prostopadłości zmierzono techniką współrzędnościową dla następujących strategii:

- P1 baza B jest płaszczyzną – element sprawdzany - płaszczyzną,
- P2 baza B jest płaszczyzną – element sprawdzany - linią,
- P3 baza B jest linią – element sprawdzany - linią.

Zgodnie z zaleceniami normy zarówno linie jak i płaszczyzny uzyskano z dziesięciu punktów próbkowania. Pomiar wysokościomierzem przeprowadzono ustawiając przedmiot próbny na płycie pomiarowej na płaszczyźnie bazy B. Wyniki pomiarów zaprezentowano w tab.3.

Tab. 3. Wyniki pomiarów odchyłki prostopadłości

Strategia	Odchyłka [mm]	Niepewność rozszerz. [mm]	Tolerancja [mm]	Ocena
WMP P1	0,002	0,001	0,010	zaakceptowany
WMP P2	0,024	0,005	0,010	odrzucony
WMP P3	0,008	0,001	0,010	zaakceptowany
Wysokościomierz	0,034	0,003	0,010	odrzucony

Zaprezentowane w tab. 3 wyniki pomiarów jednoznacznie pokazują, że dobór elementu zastępczego w pomiarach współrzędnościową maszyną ma wpływ na wartość zaobserwowanej odchyłki prostopadłości. Potwierdziła to również analiza statystyczna. Najmniejszą wartość statystyki testowej otrzymano przy testowaniu hipotezy o równości średnich arytmetycznych dla strategii oznaczonych P2 i P3 i wynosiła ona  $t(P2; P3) = 6,070$ , co znacznie przekracza wartość krytyczną. Największą wartość ma odchyłka zmierzona za pomocą wysokościomierza. Przyczyną tego jest odchyłka płaskości płaszczyzny bazy B. W obszarze pomiaru wynosi ona 0,004 mm, jednak na krawędziach przedmiotu występowały zadziory (widoczne przez

lupe). Należy zauważyć, że na różnicę w wynikach pomiarów WMP wg strategii P2 i wysokościomierzem ma wpływ sposób obliczeń. Oprogramowanie Power Inspect do obliczeń odchyłek geometrycznych wykorzystuje algorytmy zgodne z normami ASME, natomiast wysokościomierz z normami ISO. Interpretacja odchyłek kierunku wg norm ASME i ISO różni się znacznie [3, 4].

#### 4.4. POMIAR ODCHYLKI WSPÓŁSIOWOŚCI

W programie sterująco – pomiarowym Power Inspect występuje rozróżnienie pomiaru odchyłki współsiowości i współsiowości. Odchyłkę współsiowości można określić jedynie, gdy element bazowy i element sprawdzany jest walcem. Natomiast odchyłkę współsiowości można wyznaczyć dla walców i okręgów. W celu wyznaczenia odchyłek okrąg zewnętrzny i wewnętrzny na walcu C zmierzono współrzędnościową maszyną pomiarową na tej samej wysokości, każdy w piętnastu punktach próbkowania. Otwór C zmierzono w trzech płaszczyznach, po piętnaście punktów próbkowania. Walec zewnętrzny ze względu na wysokość 6 mm, zmierzono w dwóch płaszczyznach po 15 punktów próbkowania w każdej. Odchyłkę współsiowości wyznaczono także przy pomocy okrągłościomierza. Pomiary przeprowadzono w płaszczyźnie określonej dla WMP. W tab. 4 zamieszczono wyniki pomiarów.

Tab. 4. Wyniki pomiarów odchyłki współsiowości

Strategia	Odchyłka [mm]	Niepewność rozszerz. [mm]	Tolerancja [mm]	Ocena
WMP walec-walec	0,0690	0,0011	0,025	odrzucony
WMP walec-okrąg	0,0210	0,0007	0,025	zaakceptowany
WMP okrąg-okrąg	0,0244	0,0005	0,025	zaakceptowany
Okrągłościomierz	0,0269	0,00004	0,025	odrzucony

Na podstawie wyników zamieszczonych w tab. 4 można stwierdzić, że największą wartość ma odchyłka współsiowości dwóch walców. Walec zewnętrzny ma małą długość. Powoduje to, że oś wyznaczonego elementu zastępczego jest pochylona względem osi walca wewnętrznego C. To może być przyczyną tak dużej wartości odchyłki współsiowości. Najmniejszą wartość ma odchyłka współsiowości walca i okręgu. Odchyłki współsiowości okrąg – okrąg wyznaczone WMP i okrągłościomierzem jak pokazuje tab. 4 i analiza statystyczna różnią się znacznie. Wartość statystyki testowej  $t=11,887$ , więc należy odrzucić hipotezę o równości średnich. Duża wartość odchyłki współsiowości otrzymana na podstawie pomiarów okrągłościomierzem wynika z zastosowania do obliczeń profilu niefiltrowanego.

## 5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy statystycznej otrzymanych

wyników można sformułować następujące wnioski:

- Strategia pomiaru odchyłek kształtu nie ma wpływu na ocenę dokładności wykonania przedmiotu próbnego.
- Dla odchyłek kierunku (prostopadłości) zmiana rodzaju elementu zastępczego znacząco wpływa na wartość odchyłki. Użycie w pomiarach współrzędnościowymi maszynami pomiarowymi elementu bazowego w postaci płaszczyzny i sprawdzanego w postaci linii, odpowiada pomiarowi metodami tradycyjnymi.
- Interpretacja oznaczonej na rys.1 odchyłki współosiowości/współśrodkowości ma wpływ na ocenę dokładności. Odchyłka ta powinna być interpretowana jako odchyłka współśrodkowości dwóch okręgów. Tworząca powierzchni walca zewnętrznego jest zbyt krótka, aby dokładnie wyznaczyć równanie elementu zastępczego.
- Przeprowadzenie pomiarów przedmiotu próbnego zgodnie ze specyfikacją wymaga od operatora dogłębnej znajomości oprogramowania pomiarowego oraz wnikliwej analizy tolerancji geometrycznych umieszczonych na rysunku.

#### LITERATURA

- [1] COLOSIMO B., M., MORONI G., PETRÒ S., *A tolerance interval based criterion for optimizing discrete point sampling strategies*. W: Precision Engineering, nr 34, 2010, 745-754.
- [2] GADELMAWLA E.S., *Simple and efficient algorithms for roundness evaluation from the coordinate measurement data*. W: Measurement, nr 43, 2010, 223-235.
- [3] HUMIENNY Z.: *Tolerancje kształtu, kierunku położenia i bicia. Ustalenia nowej Polskiej Normy cz. I*. W: Mechanik nr 3, 2007, 160-164.
- [4] HUMIENNY Z.: *Tolerancje kształtu, kierunku położenia i bicia. Ustalenia nowej Polskiej Normy cz.II*. W: Mechanik nr 4, 2007, 295-297.
- [5] JACNIACKA E., MARKOWSKI P., JÓZWIK J.: *Analysis of the influence of the inspection strategies on the observed cylindricity deviation*. W: Materiałach konferencyjnych 10<sup>th</sup> International Conference "Automation in Production Planning and Manufacturing", Zilina 2009.
- [6] JAKUBIEC W., PŁOWUCHA W., STARCZAK M., *Analytical estimation of coordinate measurement uncertainty*. W: Measurement, nr 45, 2012, 2299-2308.
- [7] MORONI G., PETRÒ S., *Optimal inspection strategy planning for geometric tolerance verification*. W: Precision Engineering nr 38, 2014, 71-81.
- [8] PEDONEA P., ROMANO D., *Designing small samples for form error estimation with coordinate measuring machines*. W: Precision Engineering, nr 35, 2011, 262-270.
- [9] PN-ISO 1079-7: 2000 - *Warunki badania centrów obróbkowych, Arkusz 7: Dokładność obrobionego przedmiotu próbnego*.
- [10] SZYDŁOWSKI H.: *Niepewność w pomiarach. Międzynarodowe standardy w praktyce*. Poznań, Wydawnictwo Naukowe UAM, 2001.
- [11] VAN VOLSEM S., DULLAERT W., VAN LANDEGHEM H., *An Evolutionary Algorithm and discrete event simulation for optimizing inspection strategies for multi-stage processes*. W: European Journal of Operational Research, nr 179, 2007, 621-633.
- [12] SŁADEK J., *Dokładność pomiarów współrzędnościowych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011.

# WYZNACZANIE NIEPEWNOŚCI POMIARÓW WSPÓLRZĘDNOŚCIOWYCH. ZASTOSOWANIE PRZEDMIOTU WZORCOWEGO

Wojciech PŁOWUCHA<sup>1</sup>, Władysław JAKUBIEC<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Niniejsza publikacja jest trzecią dotyczącą tej tematyki. Wcześniej ukazały się w czasopiśmie *Mechanik* (5-6 i 7 z 2012 roku) [1, 2]. W 2011 roku ukazała się norma ISO 15530-3 [3], która dotyczy eksperymentalnego wyznaczania niepewności pomiaru z użyciem wywzorcowanego przedmiotu wzorcowego lub wzorca. Poprzedziło ją opublikowanie w 2004 roku specyfikacji technicznej ISO/TS 15530-3 [4]. Niestety, o ile w specyfikacji było trochę sformułowań budzących wątpliwości, to norma zawiera wiele błędów i zdaniem autorów w obecnej postaci nie nadaje się do stosowania [5, 6]. Skłoniło to autorów do opracowania i przetestowania procedury możliwej do praktycznego stosowania i równocześnie oddającej ducha wspomnianych dokumentów.

## 2. PODSTAWY TEORETYCZNE

Dysponując przedmiotem o znanych wartościach mierzonych charakterystyk można wyznaczyć niepewność pomiaru eksperymentalnie (wyłącznie metoda typu A) na podstawie wyników dostatecznie licznej serii pomiarów (w normie mówi się o 20 powtórzeniach). Eksperyment powinien być tak zaprojektowany by obejmował zmiany wszystkich czynników mogących mieć wpływ na niepewność. W pomiarach współrzędnościowych do takich czynników należy bez wątpienia temperatura. Uwzględnienie wpływu temperatury jest możliwe poprzez rozłożenie kolejnych

---

<sup>1</sup> Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Laboratorium Metrologii, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, [www.lm.ath.bielsko.pl](http://www.lm.ath.bielsko.pl)

pomiarów w dłuższym okresie czasu i wykonywanie ich w różnych porach dnia (randomizacja błędu systematycznego).

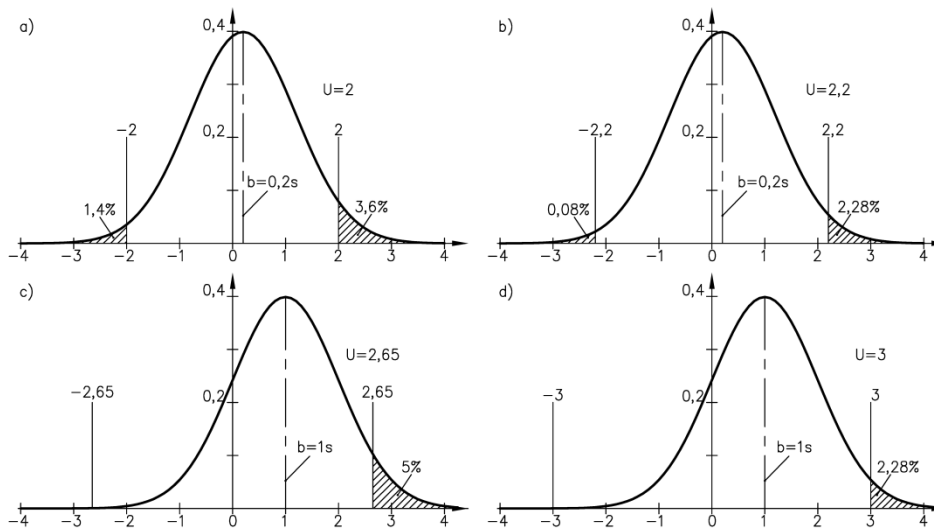
Pewne czynniki mogące mieć wpływ na niepewność, takie jak strategia pomiaru (np. liczba i rozmieszczenie punktów próbkowania, konfiguracja trzpieni pomiarowych) nie powinny być zmieniane, ponieważ celem eksperymentu jest wyznaczenie niepewności pomiaru dla takich właśnie warunków pomiaru.

Pojawia się pytanie jak opracować wyniki eksperymentu. W specyfikacji technicznej zaproponowano obliczenie wartości średniej  $\bar{x}$  i odchylenia standardowego  $s$  i następnie obliczenie niepewności rozszerzonej  $U$  jako

$$U = k \cdot s + |b| \quad (1)$$

gdzie:  $b = x_{cal} - \bar{x}$  jest nazywane błędem systematycznym,  $k$  – współczynnik rozszerzenia.

To podejście jest poprawne chociaż zawiera pewne uproszczenia. Przykładowe modele rozkładu błędów pomiaru o postaci rozkładu niesymetrycznego, na przykład rozkładu normalnego z parametrem położenia różnym od zera pokazano na rys. 1. Jeżeli przyjąć, że niepewność rozszerzona wyznacza symetryczny przedział obejmujący dokładnie 95% wartości błędów pomiaru (rys 1a i 1c), otrzymuje się wartości niepewności nieznacznie niższe niż w przypadku zastosowania wzoru (1) (rys. 1b i 1d), kiedy przedział obejmuje więcej niż 95% tych wartości.



Rys. 1. Modele stosowane do obliczania niepewności pomiaru: a, c) model ścisły, b, d) model wynikający ze wzoru (1)



Jednym z powodów, że w normie zrezygnowano ze stosowania wzoru (1) jest problem z formalnym obliczeniem niepewności standardowej korzystając z wcześniej obliczonej według wzoru (1) niepewności rozszerzonej.

Do obliczania niepewności pomiaru można korzystać z innych modeli. Autorzy proponują posłużenie się drugim momentem centralnym względem znanej wartości, który może mieć interpretację niepewności standardowej  $u_p$  (znika wtedy problem obliczania wartości średniej i odchylenia standardowego):

$$u_p = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{cal})^2}{n-1}} \quad (2)$$

W specyfikacji technicznej wzór (1) ma faktycznie postać

$$U = k \times \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2} + |b| \quad (3)$$

gdzie: wielkości  $k$  i  $b$  mają znaczenie jak wyżej,  $u_p = s$ , a dodatkowo występuje  $u_{cal}$  – niepewność standardowa wzorcowania przedmiotu wzorcowego i jeszcze jeden składnik niepewności o symbolu  $u_w$ . Składnik ten w przypadku pomiaru wymiarów ma zdaniem autorów normy uwzględniać wpływ warunków temperaturowych, które przecież już są uwzględnione przez odpowiednią realizację eksperymentu.

W normie z 2011 roku, żeby uniknąć problemu z „błędem systematycznym” uznano, że powinien on być korygowany. Jest to nadinterpretacja wymagań zawartych w [7-9], której skutkiem jest całkowity brak przydatności zapisów normy.

### 3. PROPONOWANA PROCEDURA WYZNACZANIA NIEPEWNOŚCI PRZY UŻYCIU PRZEDMIOTU WZORCOWEGO

Metoda wyznaczenia niepewności pomiaru przy użyciu przedmiotu wzorcowego jest metodą najprostszą, chociaż wcale niełatwą w realizacji. Pierwszy problem to posiadanie wywzorcowanego przedmiotu wzorcowego. Pod pojęciem przedmiot wzorcowy rozumie się specjalnie wykonany przedmiot, o identycznej (ewentualnie nieznacznie uproszczonej) postaci geometrycznej jak mierzone (produkowane) przedmioty. Przedmioty te zwykle wykonuje się ze stabilnego wymiarowo materiału zapewniając możliwie małe odchyłki kształtu poszczególnych powierzchni. Fakt, że przedmioty wzorcowe mają powierzchnie o małych odchyłkach kształtu ma swoje zalety, jak i wady. Zaletą jest możliwość stosowania prostych strategii próbkowania opartych na małej liczbie punktów. Wadą jest konieczność uzupełniania budżetu niepewności o składnik wynikający z odchyłek kształtu, co w przypadku tolerancji geometrycznych może być trudne albo nawet niemożliwe. Niekiedy, jako przedmioty wzorcowe można użyć „ustawiaki”, których podstawowym przeznaczeniem jest

ustawianie obrabiarek lub specjalnych przyrządów pomiarowych. Koszt wykonania, jak również koszt wzorcowania przedmiotu wzorcowego może być znaczny, co ogranicza zastosowanie tej metody do produkcji wielkoseryjnej.

Zamiast przedmiotu wzorcowego można użyć jeden z produkowanych przedmiotów. Ze względu na stosunkowo duże odchyłki kształtu, w czasie wzorcowania konieczne jest próbkowanie powierzchni przedmiotu w znacznej liczbie punktów. Ze względu na brak wiedzy na temat stabilności wymiarowej zwykle konieczna jest również dość częsta rekaliibracja.

W przypadku pomiarów przedmiotów o nieskomplikowanym kształcie do uzyskania informacji o niepewności pomiaru niektórych charakterystyk, szczególnie wymiarów, możliwe jest zastosowanie łatwo dostępnych wzorców, jak np. pierścienie wzorcowe czy kątownik walcowy.

Eksperyment powinien być tak zaprojektowany, żeby nastąpiła randomizacja ewentualnych błędów systematycznych, a szczególnie błędów wynikających ze zmienności warunków środowiskowych. Oznacza to, że poszczególne pomiary powinny być rozłożone w dłuższym okresie czasu oraz wykonywane w różnych porach dnia i jeśli to uzasadnione przez różnych operatorów.

Z otrzymanych wyników  $x_i, i = 1 \dots 20$ , oblicza się wartość średnią  $\bar{x}$  i odchylenie standardowe  $s$ . Na podstawie znanych (ze świadectwa wzorcowania) wartości poszczególnych charakterystyk  $x_{cal}$  i ich niepewności standardowych  $u_{cal}$ , można wyznaczyć rozszerzone niepewności pomiaru  $U$  według wzoru:

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2} + |b| \quad (4)$$

w którym:  $b = \bar{x} - x_{cal}$ ,  $u_p = s$ .

#### 4. PRZYKŁADY

Przykład 1. Dysponując (wywzorcowanym) pierścieniem wzorcowym można według opisanej procedury wyznaczyć niepewność pomiaru średnicy, odchyłki okrągłości oraz odchyłki walcowości otworu. Należy jednak zaznaczyć, że otrzymane wyniki będą właściwe pod warunkiem, że wymiary mierzonego przedmiotu są zbliżone (według ISO 15530-3 różnice wymiarów nie powinny przekraczać 10%), a strategia pomiaru identyczna.

Przykład 2. W celu oceny niepewności pomiaru wykonano 20 pomiarów średnicy i odchyłki okrągłości pierścienia wzorcowego. Pomiary były rozłożone w czasie, a pierścień był ustawiany w różnych miejscach na stole maszyny (tak, jak to się dzieje w pomiarach, dla których szacuje się niepewność pomiaru). Dane ze świadectwa wzorcowania wzorca pierścieniowego: średnica 50,0015 mm z niepewnością rozszerzoną ( $k = 2$ ) wynoszącą 0,9  $\mu\text{m}$  ( $u_{cal} = 0,45 \mu\text{m}$ ); odchyłka okrągłości 0,31  $\mu\text{m}$

z niepewnością rozszerzoną ( $k = 2$ ) wynoszącą  $0,08 \mu\text{m}$  ( $u_{cal} = 0,04 \mu\text{m}$ ). Wyniki pomiarów zestawiono w tablicy 1. W tablicy podano również wyniki obliczeń.

Tablica 1. Zestawienie wyników pomiaru średnicy i odchyłki okrągłości oraz wyników obliczeń niepewności pomiaru

	Średnica, mm				Odchyłka okrągłości, $\mu\text{m}$			
	49,9999	50,0017	50,0008	50,0001	4,2	3,7	5,1	3,6
50,0018	50,0017	50,0013	50,0014	5,0	4,3	3,3	4,9	
50,0009	50,0017	50,0013	50,0014	4,0	4,3	3,3	4,9	
50,0005	50,0024	50,0003	50,0017	3,5	5,3	4,7	5,6	
50,0005	50,0014	50,0005	50,0003	4,3	5,7	3,8	4,0	
$\bar{x}$	50,0011				4,38			
$u_p$	0,0007				0,74			
$x_{cal}$	50,0015				0,31			
$U_{cal}$	0,0009				0,08			
$u_{cal}$	0,0005				0,04			
$ b $	0,0004				4,07			
$U$	0,0021				5,55			

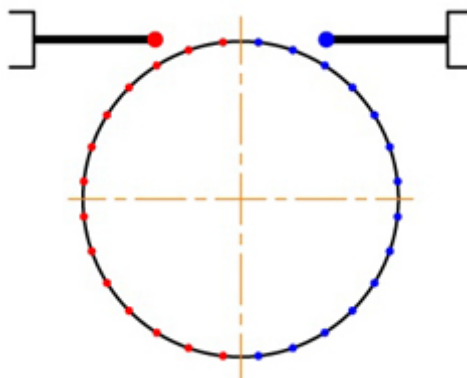
Przykład 3. Dysponując (wywzorcowanym) kątownikiem walcowym można według opisanej procedury wyznaczyć niepewność pomiaru średnicy, odchyłki okrągłości i odchyłki walcowości wałka, ale również odchyłki współosiowości osi dwóch wałków czy odchyłki prostopadłości osi wałka do płaszczyzny. Należy oczywiście pamiętać, że otrzymane wyniki będą właściwe jedynie dla podobnych zadań pomiarowych, tzn. w przypadku nieznacznie różniących się średnic i identycznych strategii pomiaru, w tym strategii próbkowania. Można się spodziewać, że niepewność pomiaru odchyłki współosiowości istotnie zależy od szerokości elementu stanowiącego bazę (dla szerszej bazy niepewność powinna być mniejsza), jak również od odległości elementu tolerowanego od bazy (dla większej odległości niepewność powinna być większa). Podobnie, można się spodziewać, że niepewność pomiaru odchyłki prostopadłości osi do płaszczyzny zależy istotnie od wielkości bazy (dla większej bazy niepewność powinna być mniejsza), jak i od długości elementu tolerowanego (dla dłuższego niepewność powinna być większa).

Przykład 4. W celu oceny niepewności pomiaru odchyłki współosiowości i wpływu na tę niepewność dwóch elementów strategii pomiaru (długości elementu bazowego i odległości elementu tolerowanego od bazy) wykonano 20 pomiarów siedmiu okręgów na kątowniku walcowym o średnicy 80 mm i długości 160 mm. Na podstawie tych pomiarów zdefiniowano cztery różne długości bazy "a" (odległość między skrajnymi przekrojami próbkowania): 5, 10, 15 i 20 mm i dwie różne odległości elementu tolerowanego od bazy "b": 80 i 150 mm (rys. 2).

Każdy okrąg był próbkowany w 28 równomiernie rozłożonych punktach, przy czym do próbkowania każdego okręgu użyto dwóch przeciwnych orientacji trzpienia pomiarowego:  $A = 90^\circ, B = 0^\circ$  oraz  $A = 90^\circ, B = 180^\circ$  (rys. 3).



Rys. 2 Rysunek przedmiotu wzorcowego (kątownika walcowego) z zaznaczoną tolerancją współosiowości;  $a$  – długość elementu bazowego,  $b$  – odległość elementu tolerowanego od bazy



Rys. 3 Strategia próbkowania okręgów

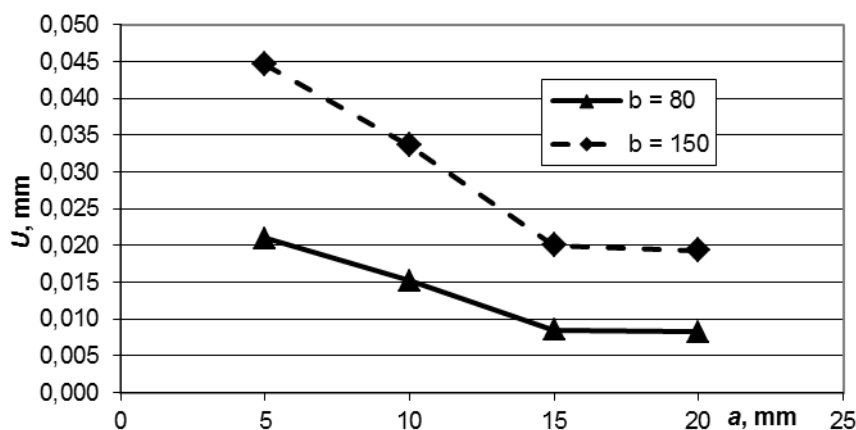
Pomiary były rozłożone w czasie, a przedmiot wzorcowy (kątownik walcowy) był ustawiany w różnych miejscach na stole maszyny, ale zawsze wzdłuż osi  $x$ . Opracowanie wyników pomiaru przebiegało według następującego planu eksperymentu. Ze środków okręgów 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 wyznaczano osie walców traktowane jako bazy. Otrzymano cztery długości baz: 5, 10, 15 i 20 mm. Środki okręgów 5 i 6 traktowano jako punkt osi tolerowanej, tak więc otrzymano dwie różne odległości elementu tolerowanego od bazy: 80 i 150 mm. W ten sposób uzyskano 8 kombinacji długości bazy i odległości elementu tolerowanego od bazy.

Do dalszej analizy przyjęto, że odchyłka prostoliniowości osi kątownika walcowego jest znikomo mała i w konsekwencji, że rzeczywista odchyłka współosiowości jest praktycznie równa zero. Wyniki pomiarów odchyłki współosiowości traktowane jako zaobserwowane błędy pomiarów zestawiono w tablicy 2. W tablicy podano również obliczone według wzoru (1) niepewności pomiaru.

Tablica 2. Zestawienie błędów pomiaru odchyłki współosiowości (w mm) oraz wyników obliczeń niepewności pomiaru

<i>b</i>	80				150			
<i>a</i>	5	10	15	20	5	10	15	20
1	0,0182	0,0160	0,0089	0,0075	0,0371	0,0328	0,0190	0,0161
2	0,0193	0,0118	0,0084	0,0088	0,0389	0,0245	0,0177	0,0187
3	0,0136	0,0154	0,0089	0,0085	0,0288	0,0323	0,0197	0,0189
4	0,0181	0,0131	0,0062	0,0091	0,0388	0,0292	0,0159	0,0210
5	0,0137	0,0167	0,0062	0,0070	0,0290	0,0349	0,0144	0,0162
6	0,0231	0,0157	0,0092	0,0093	0,0471	0,0332	0,0205	0,0205
7	0,0204	0,0126	0,0063	0,0072	0,0419	0,0268	0,0148	0,0161
8	0,0120	0,0092	0,0067	0,0069	0,0244	0,0191	0,0143	0,0142
9	0,0141	0,0093	0,0062	0,0076	0,0292	0,0198	0,0139	0,0165
10	0,0116	0,0109	0,0082	0,0085	0,0240	0,0229	0,0176	0,0182
11	0,0096	0,0080	0,0041	0,0070	0,0204	0,0172	0,0097	0,0152
12	0,0138	0,0096	0,0056	0,0063	0,0287	0,0206	0,0130	0,0138
13	0,0053	0,0082	0,0047	0,0059	0,0125	0,0184	0,0116	0,0137
14	0,0113	0,0110	0,0080	0,0077	0,0246	0,0241	0,0184	0,0175
15	0,0127	0,0106	0,0064	0,0070	0,0265	0,0226	0,0145	0,0154
16	0,0093	0,0091	0,0037	0,0061	0,0198	0,0198	0,0094	0,0134
17	0,0099	0,0104	0,0050	0,0064	0,0214	0,0224	0,0116	0,0145
18	0,0053	0,0120	0,0034	0,0057	0,0118	0,0248	0,0081	0,0123
19	0,0126	0,0107	0,0071	0,0084	0,0254	0,0252	0,0141	0,0142
20	0,0142	0,0121	0,0048	0,0068	0,0293	0,0239	0,0155	0,0137
$\bar{x}$	0,0134	0,0116	0,0064	0,0074	0,0280	0,0247	0,0147	0,0160
$u_p$	0,0046	0,0026	0,0018	0,0011	0,0092	0,0053	0,0035	0,0024
$x_{cal}$	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018
$U_{cal}$	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
$u_{cal}$	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
$ b $	0,0116	0,0098	0,0046	0,0056	0,0262	0,0229	0,0129	0,0142
<b><i>U</i></b>	<b>0,0210</b>	<b>0,0153</b>	<b>0,0085</b>	<b>0,0082</b>	<b>0,0446</b>	<b>0,0336</b>	<b>0,0200</b>	<b>0,0193</b>

Na rys. 4 przedstawiono wpływ długości bazy i odległości elementu tolerowanego od bazy na niepewność pomiaru odchyłki współosiowości.



Rys. 4. Wpływ długości bazy i odległości elementu tolerowanego od bazy na niepewność pomiaru odchyłki współosiowości

Otrzymane wartości niepewności dotyczą pomiarów odchyłki współosiowości dwóch wałków o średnicach 80 mm lub zbliżonych (według ISO 15530-3 różnice wymiarów nie powinny przekraczać 10%). Na podstawie otrzymanych wyników można uzyskać co najmniej ogólny pogląd na wpływ długości bazy (zmniejszanie długości bazy skutkuje od pewnego momentu gwałtownym wzrostem niepewności) i wpływ odległości elementu tolerowanego od bazy (ze wzrostem tej odległości niepewność rośnie liniowo).

## 5. WNIOSKI

Niepewność pomiaru różnych charakterystyk geometrycznych mierzonych techniką współrzędnościową przy użyciu tej samej maszyny pomiarowej może być bardzo różna. Istotny wpływ na niepewność pomiaru współrzędnościowego może mieć zastosowana strategia pomiaru. Dobrą i równocześnie prostą metodą oceny niepewności pomiaru współrzędnościowego jest eksperyment wykorzystujący łatwo dostępne wzorce, takie jak pierścień wzorcowy czy kątownik walcowy.

## LITERATURA

- JAKUBIEC W., PŁOWUCHA W., *Wyznaczanie niepewności pomiarów współrzędnościowych. Cz. 1: Podstawy teoretyczne*. W: *Mechanik*, nr 5-6, 2012, 452-455.
- JAKUBIEC W., PŁOWUCHA W., *Wyznaczanie niepewności pomiarów współrzędnościowych. Cz. 2: Oprogramowanie EMU*. W: *Mechanik*, nr 7, 2012, 580-582.

- ISO 15530-3:2011: *Geometrical product specifications (GPS). Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement. Part 3: Use of calibrated workpieces or measurement standards.*
- ISO/TS 15530-3:2004: *Geometrical Product Specifications (GPS). Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement. Part 3: Use of calibrated workpieces or standards.*
- PŁOWUCHA W., JAKUBIEC W., *Proposal for updates in the GPS standards concerning coordinate measurements uncertainty.* 11<sup>th</sup> International Symposium on Measurement and Quality Control 2013, September 11-13, 2013, Cracow-Kielce, Poland
- PŁOWUCHA W., JAKUBIEC W., *Proposal for changes in the ISO 15530 series of standards.* W: *Quality - Access to Success Journal*, Vol.13, Supp. 5, 2012, 237-240.
- JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) *Evaluation of measurement data. Guide to the expression of uncertainty in measurement.*
- JCGM 104:2009 *Evaluation of measurement data. An introduction to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" and related documents.*
- Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik.* Główny Urząd Miar. Warszawa 1999

# **OCENA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA PNEUMATYCZNYCH PRZETWORNIKÓW DŁUGOŚCI Z DYSZAMI SZCZELINOWYMI W BEZSTYKOWYCH POMIARACH OKRĄGŁOŚCI**

Michał JAKUBOWICZ<sup>1</sup>, Damian ŚMIERZCHAŁSKI<sup>2</sup>

## **1. WSTĘP**

Wzrost wymagań jakościowych wytwarzanych części maszyn oraz doskonalenie technologii wytwarzania, wymagają stosowania przyrządów pomiarowych o coraz większej dokładności i niezawodności działania. Rozwój aparatury oraz metod kontroli ukierunkowany jest na precyzyjne pomiary geometryczne powierzchni. W tym przypadku szczególna rola przypada przyrządom realizującym pomiar metodą bezstykową, do których zaliczamy pneumatyczne przetworniki długości.

Przetworniki pneumatyczne stanowią ważną grupę narzędzi pomiarowych stosowanych w dokładnych pomiarach części maszyn, w biernych i czynnych układach kontroli wymiaru i kształtu. Ze względu na szereg zalet między innymi możliwość pomiaru w trudnych warunkach pracy, często bezpośrednio podczas obróbki, wykazują zdecydowaną przewagę nad innymi przyrządami pomiarowymi. Należy podkreślić, że w wielu przypadkach nie ma możliwości zastąpienia pneumatycznej metody bezstykowej inną metodą.

### **1.1. PNEUMATYCZNY PRZETWORNIK DŁUGOŚCI ZE SZCZELINOWĄ DYSZĄ POMIAROWĄ**

Pneumatyczny przetwornik długości to narzędzie pomiarowe, w którym zmiana wymiaru mierzonej części powoduje zmianę parametrów powietrza przepływającego przez ten przetwornik. Zmiana ta jest rejestrowana przez odpowiedni czujnik

---

<sup>1</sup> Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych, Instytut Technologii Mechanicznej, Politechnika  
Poznańska, pl. M. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań

<sup>2</sup> ITA spółka z ograniczoną odpowiedzialnością Sp. k., Skórzewo, ul. Poznańska 104, 60-185 Poznań



i przekształcana według określonej procedury na wymiar długości [3, 4].

W zależności jaki parametr powietrza przepływającego przez przetwornik jest mierzony, wyróżnia się czujniki ciśnieniowe oraz przepływowe [2, 3, 4].

W przypadku przetworników ciśnieniowych podstawową charakterystyką metrologiczną jest charakterystyka statyczna  $p_k = f(s)$  opisująca przebieg zmian ciśnienia, mierzonego w komorze pomiarowej przetwornika (ciśnienia kaskadowego  $p_k$ ) w funkcji odległości czoła dyszy pomiarowej od mierzonej powierzchni (szczeliny pomiarowej  $s$ ). Do oceny parametrów metrologicznych przydatna okazuje się być również charakterystyka czułości  $K = g(s)$  informująca o zmianie jej wartości w funkcji szerokości szczeliny pomiarowej  $s$ .

W istniejących obecnie rozwiązaniach konstrukcyjnych przetworników pneumatycznych oraz głowicach pomiarowych wyposażonych w te przetworniki, są powszechnie stosowane dysze wlotowa i pomiarowa posiadające otwory o przekroju kołowym i średnicach, odpowiednio  $d_w$  i  $d_p$  [4, 5].

Na podstawie badań własnych [5] oraz analizy literatury [4, 6, 7] zauważono, że zastosowanie dysz pomiarowych o przekroju kołowym nie zawsze jest korzystne. Związane jest to z osiową symetrią wypływu powietrza w przestrzeni dysza pomiarowa – szczelina, niekorzystnie wpływającą na charakterystykę metrologiczną przetwornika.

W wyniku powyższego zjawiska, na charakterystyce statycznej  $p_k = f(s)$ , występuje gwałtowna skokowa zmiana ciśnienia, ograniczająca zakres pomiarowy przetwornika. Według autorów [4, 5] wpływ na powstanie skoku ma wiele czynników, w tym między innymi:

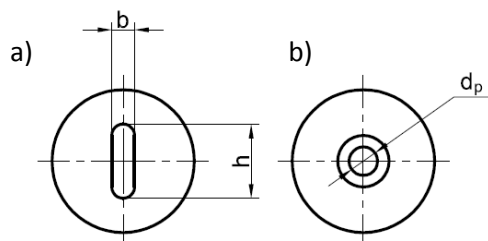
- osiowo – symetryczny wypływ powietrza przez dyszę pomiarową,
- ciśnienie zasilania  $p_z$ ,
- stosunek średnic dysz  $d_w/d_p$
- szerokość szczeliny pomiarowej  $s$ ,
- unormowana średnica czoła  $D_c = d_c/d_p$  dyszy pomiarowej.

W celu eliminacji negatywnych skutków zjawiska skoku ciśnienia, prowadzono prace badawcze mające na celu zastosowania w pneumatycznym przetworniku długości dysz pomiarowych o przekroju niekołowym np. typu wielokątnego (trójkątnym, kwadratowym, typu gwiazda) [4, 6].

W przypadku praktycznego zastosowania przetworników pneumatycznych do pomiarów zarysu kształtu, należy dążyć do minimalizacji wymiarów strugi napływającej na mierzoną powierzchnię. Wpływa to wzrostu selektywności pomiaru, a więc jest to cecha szczególnie pożądana w pomiarach elementów o niewielkiej długości fali nierówności. Cecha ta nabiera istotnego znaczenia szczególnie w przypadku pomiarów odchyłki okrągłości.

Obie cechy wymienione powyżej wykazują dysze szczelinowe [Patent P 388478], w których otwór dyszy w przekroju prostopadłym do osi, posiada kształt prostokątny lub fasolowy [4, 5].

Kształt i wymiary dyszy klasycznej o przekroju okrągłym oraz dyszy szczelinowej został pokazany na rysunku 1.



Rys. 1. Kształt i wymiary dyszy: a) szczelinowej b) klasycznej [4, 5]

## 2. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA PRZETWORNIKA PNEUMATYCZNEGO

W celu określenia parametrów metrologicznych badanych przetworników wyznaczono przebiegi charakterystyk statycznych  $p_k = f(s)$  oraz czułości  $K = g(s)$  dla wybranych zestawów szczelinowych dysz pomiarowych  $D_{sz}$  oraz dysz wlotowych  $d_w$ .

W badaniach wykorzystano przetworniki z walcową komorą pomiarową o długości 90 mm i średnicy  $\varnothing 30$  mm, z następującą konfiguracją dysz pomiarowych i wlotowych:

- przetwornik nr 1 –  $D_{sz1}$  (3,518 x 0,423) mm;  $d_w = 0,720$  mm,
- przetwornik nr 2 –  $D_{sz1}$  (3,518 x 0,423) mm;  $d_w = 0,830$  mm,
- przetwornik nr 3 –  $D_{sz1}$  (3,518 x 0,423) mm;  $d_w = 1,020$  mm,
- przetwornik nr 4 –  $D_{sz2}$  (2,671 x 0,386) mm;  $d_w = 0,720$  mm,
- przetwornik nr 5 –  $D_{sz2}$  (2,671 x 0,386) mm;  $d_w = 0,830$  mm,
- przetwornik nr 6 –  $D_{sz2}$  (2,671 x 0,386) mm;  $d_w = 1,020$  mm.

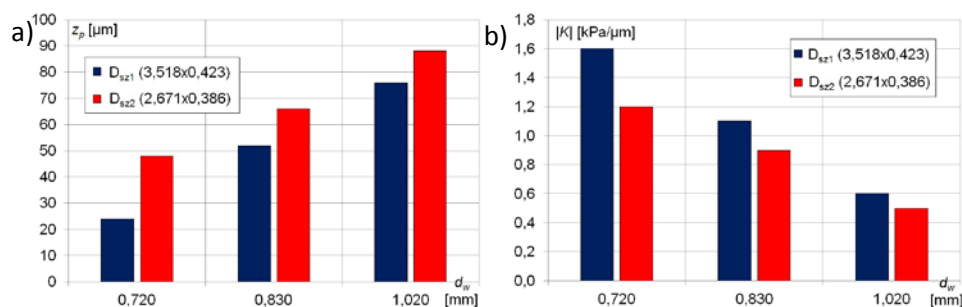
Charakterystyki statyczne przetwornika pneumatycznego zostały wyznaczone na stanowisku badawczym składającym się z fizycznego modelu pneumatycznego przetwornika długości, skonstruowanego w Zakładzie Metrologii Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej. Zmiana ciśnienia w komorze pomiarowej rejestrowana była za pomocą piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia. Zmianę szerokości szczeliny umożliwiał stół przesuwany, sterowany z komputera PC. Aby określić dokładność przylegania czoła dyszy pomiarowej do powierzchni przesłony dla szczeliny  $s = 0$   $\mu\text{m}$  zastosowano sondę termooanemometryczną zainstalowaną na przewodzie zasilającym przetwornik.

Charakterystykę statyczną i parametry metrologiczne przetwornika takie, jak zakres pomiarowy  $z_p$  oraz czułość  $K$  wyznaczono na podstawie zbioru wartości odległości czoła dyszy pomiarowej od mierzonej powierzchni (szczeliny  $s$ ) i ciśnienia pomiarowego  $p_k$ , mierzonego w komorze pomiarowej. Na rysunku 2 przedstawiono zestawienie otrzymanych wartości zakresu pomiarowego  $z_p$  i modułu czułości  $|K|$  dla

badanych przetworników. Z przedstawionych parametrów przetworników wynika, że zakres pomiarowy  $z_p$  zmienia się od 24  $\mu\text{m}$  do 88  $\mu\text{m}$ . Zmiana zakresu pomiarowego zależy od średnicy dyszy wlotowej  $d_w$ . Wraz z zwiększeniem średnicy dyszy wlotowej  $d_w$  następuje rozszerzenie zakresu pomiarowego niezależnie od rodzaju zastosowanej dyszy pomiarowej (rys. 2a). Zjawisko wzrostu zakresu pomiarowego wraz ze wzrostem średnicy dyszy wlotowej potwierdzają autorzy prac [4, 8].

W badanych przetwornikach moduł czułości  $|K|$  zawiera się w przedziale od 0,5  $\text{kPa}/\mu\text{m}$  do 1,6  $\text{kPa}/\mu\text{m}$  (rys. 2b). W typowych przyrządach pomiarowych stosowanych w przemyśle czułość wynosi od 0,4  $\text{kPa}/\mu\text{m}$  do 0,8  $\text{kPa}/\mu\text{m}$ . Zastosowanie przetworników pracujących w tak szerokim zakresie czułości pozwala na ocenę wpływu tego parametru na dokładność odwzorowania zarysu i wartość odchyłki kształtu.

Uzyskanie dużych wartości czułości umożliwia zastosowanie pneumatycznych przetworników długości w pomiarach, w których wymagana jest rozdzielczość poniżej 0,1  $\mu\text{m}$  [5].



Rys. 2. Zestawienie porównawcze wartości: a) zakresu pomiarowego  $z_p$  b) czułości  $|K|$

Przy doborze pneumatycznego przetwornika długości do konkretnego zadania pomiarowego należy wziąć pod uwagę, że wraz ze wzrostem średnicy dyszy wlotowej czułość  $|K|$  przeciwnie do zakresu pomiarowego  $z_p$  ulega zmniejszeniu.

### 3. POMIAR ODCHYLENIA OKRĄGŁOŚCI ZA POMOCĄ PRZETWORNIKA PNEUMATYCZNEGO ZE SZCZELINOWĄ DYSZĄ POMIAROWĄ

#### 3.1. METODYKA POMIARÓW ODCHYLENIA OKRĄGŁOŚCI

Zakładając, że jednym z podstawowych obszarów przyszłego zastosowania przetworników wyposażonych w szczelinowe dysze pomiarowe są pomiary zarysu okrągłości, wykonano serię badań porównawczych.

Jako odniesienie przyjęto pomiary dokonane metodą stykową przyrządem Hommel roundscan 535. Badania przeprowadzono na tulei o średnicy  $\varnothing 80$  mm, szlifowanej, o chropowatości  $R_a = 1,25$   $\mu\text{m}$ . Przed przystąpieniem do pomiarów badana tuleja była

pionowana i centrowana na stole obrotowym.

Stanowisko do bezstykowych pneumatycznych pomiarów odchyłki okrągłości składało się z następujących elementów: zespołu przygotowania powietrza (reduktor wstępny, stabilizator ciśnienia), pneumatycznego przetwornika długości wyposażonego w piezorezystancyjny czujnik ciśnienia Kistler 4043A5 współpracujący ze wzmacniaczem Kistler 4801 A i mikroprocesorowy systemem NI cDAQ 9172 z modulem NI 9215 firmy National Instruments do zbierania i akwizycji danych pomiarowych. Przebiegi sygnału pomiarowego były rejestrowane za pomocą programu Labview SignalExpress.

Stanowisko do wyznaczenia odchyłki okrągłości przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Stanowisko do pomiaru odchyłki okrągłości metodą stykową i pneumatyczną

Pomiar odchyłki okrągłości za pomocą pneumatycznych przetworników długości realizowany był metodą bezodniesieniową, gdzie badany przedmiot, w tym przypadku tuleja zamocowana do stołu wykonywała obrót, natomiast przetwornik pneumatyczny pozostawał nieruchomy.

Podczas badań rejestrowano zmiany wartości napięcia, które następnie przeliczano na wartości ciśnienia panującego w komorze pomiarowej  $p_k$ . Otrzymane wartości ciśnień  $p_k$  przeliczono po uwzględnieniu czułości na wartości w mikrometrach. Następnie korzystając z programu SigmaRound firmy Digital Metrology Solutions obliczono odchyłkę okrągłości  $RONt$  odniesiona do średniokwadratowego okręgu odniesienia.

Pomiar bezstykową metodą pneumatyczną oraz pomiar metodą stykową za pomocą urządzenia Hommel roundscan 535 odbywały się jednocześnie, w tym samym przekroju i przy analogicznej prędkości obrotowej stołu.

Podczas pomiaru dłuższa oś otworu dysz szczelinowej powinna być usytuowana równoległe do osi obrotu mierzonej tulei, zmniejsza się w ten sposób powierzchnie wpływu, a tym samym zwiększa się selektywność pomiaru [1, 4].

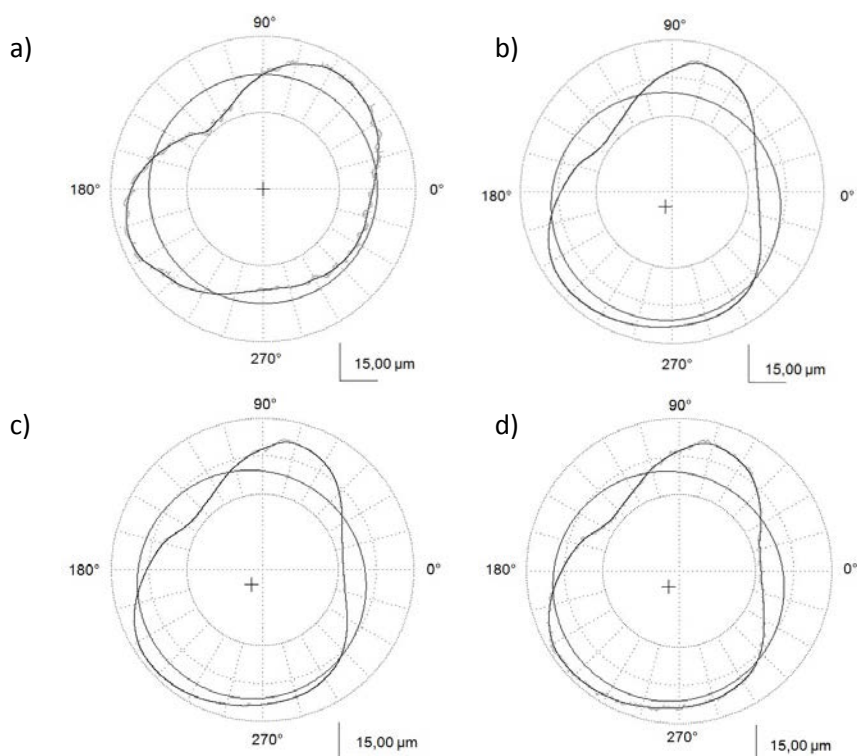
### 3.2. WYNIKI POMIARÓW ODCHYLENIA OKRĄGŁOŚCI

W tabelicy 1 zamieszczono wyniki pomiarów zarysu okrągłości uzyskanych metodami stykową, oraz pneumatyczną dla przyjętych przetworników 1 – 6.

Tabela 1. Wartości odchyłki okrągłości RONt dla metody stykowej i metody pneumatycznej

	Hommel roundscan 535	$D_{sz1}$ , $d_w=0,720$ mm	$D_{sz1}$ , $d_w=0,830$ mm	$D_{sz1}$ , $d_w=1,020$ mm
RONt	$24,4\pm 0,15$ $\mu\text{m}$	$21,6\pm 0,10$ $\mu\text{m}$	$23,6\pm 0,27$ $\mu\text{m}$	$25,2\pm 0,16$ $\mu\text{m}$
	Hommel roundscan 535	$D_{sz2}$ , $d_w=0,720$ mm	$D_{sz2}$ , $d_w=0,830$ mm	$D_{sz2}$ , $d_w=1,020$ mm
RONt	$24,4\pm 0,15$ $\mu\text{m}$	$23,8\pm 0,23$ $\mu\text{m}$	$24,6\pm 0,09$ $\mu\text{m}$	$24,5\pm 0,24$ $\mu\text{m}$

Wybrane zarysy okrągłości dla metody stykowej oraz bezstykowej pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Zarysy okrągłości otrzymane: a) metodą stykową (Hommel roundscan 535), b) metoda bezstykową –  $D_{sz2}$  (2,671 x 0,386) mm,  $d_w = 0,720$  mm; c) metoda bezstykową –  $D_{sz2}$  (2,671 x 0,386) mm,  $d_w = 0,830$  mm; b) metoda bezstykową –  $D_{sz2}$  (2,671 x 0,386) mm,  $d_w = 1,020$  mm

Analizując otrzymane wartości odchyłki okrągłości, najkorzystniejsze rezultaty osiągnięto stosując przetwornik nr 6,  $D_{sz2}$  (2,671 x 0,386) mm,  $d_w = 1,020$  mm. Przy zastosowaniu tego zestawu wartości błędu względnego dla odchyłki okrągłości badanej tulei wynosiła 0,4%.

Uzyskane wyniki wartości odchyłki okrągłości dla wszystkich badanych przetworników są zróżnicowane i zależne w znacznym stopniu od zastosowanego zestawu dysz szczelinowej i wlotowej.

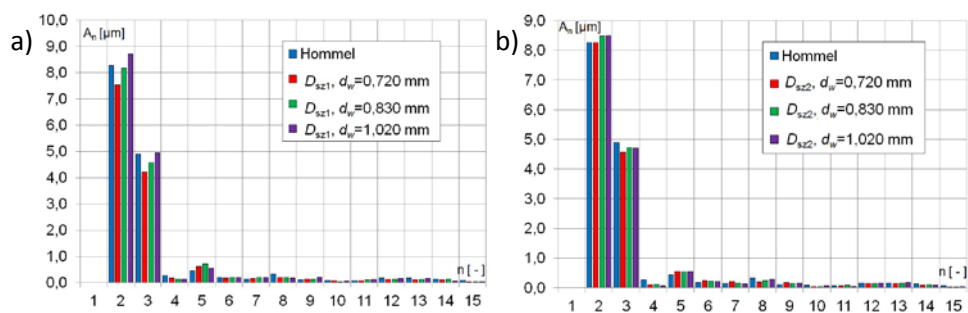
Najmniej korzystny wynik odchyłki okrągłości uzyskano dla przetwornika nr 1:  $D_{sz1}$  (3,518 x 0,423) mm  $d_w = 0,720$  mm, wyniósł  $21,6 \pm 0,10 \mu\text{m}$ . W tym przypadku wartość błędu względnego dla odchyłki okrągłości badanej tulei wynosiła 11,5%.

Czułość dla przetwornika nr 1 wynosiła około 1,6 kPa/ $\mu\text{m}$  natomiast zakres pomiarowy wynosił ok. 24  $\mu\text{m}$ . Można przypuszczać, że w tym przypadku, badany przetwornik pracował poza fragmentem charakterystyki o najmniejszej zmianie czułości ostatecznie wpłynęło to na zaniżenie wartości uzyskanej odchyłki okrągłości.

Zdecydowanie najlepsze wyniki pomiaru w odniesieniu do metody stykowej uzyskano dla przetworników wyposażonych w dyszę szczelinową o wymiarach  $D_{sz2}$  (2,671 x 0,386) mm.

Wyniki pomiarów w postaci widma amplitudowego zarysu okrągłości pokazuje rys. 5. Rozkład poszczególnych składowych widma amplitudowego informuje o postaci geometrycznej odchyłki okrągłości, podając jednocześnie wartości poszczególnych składowych. W rozkładzie widmowym zarysu odniesienia uzyskanego metodą stykową za pomocą urządzenia zauważa się dominujący wpływ 2 i 3 oraz 5 harmonicznej. Z podobną sytuacją mamy do czynienia w przypadku pomiarów metodą bezstykową pneumatyczną, gdzie również odnotowuje się dominujący wpływ 2 i 3 harmonicznej oraz 5 harmonicznej.

Wyraźnie można zauważyć, że składowe widma uzyskane z pomiarów za pomocą pneumatycznego przetwornika długości wyposażonego w szczelinową dyszę pomiarową, w większości przypadków posiadają wartości nieznacznie większe od widma odniesienia (Hommel roundscan 535).



Rys. 5. Zestawienie porównawcze widm amplitudowych przetwornika ze szczelinową dyszą pomiarową:

a)  $D_{sz1}$  (3,518 x 0,423) mm; b)  $D_{sz2}$  (2,671 x 0,386) mm

Wcześniej zauważono, że dla przetworników z dyszą szczelinową  $D_{sz1}$  uzyskano wartości odchyłki obarczone większym błędem względnym, w odniesieniu do wartości uzyskanych metodą stykową. Ten trend znajduje również swoje odbicie w widmie amplitudowym przetwornika ze szczelinową dyszą pomiarową  $D_{sz1}$  (rys.5a).

#### 4. PODSUMOWANIE

- Dla pneumatycznych przetworników długości wyposażonych w pomiarową dyszę szczelinową  $D_{sz2}$  (2,671 x 0,386) mm oraz dyszę wlotową:  $d_w = 0,830$  mm i  $d_w = 1,020$  mm, uzyskano najbardziej zbliżone wartości odchyłki okrągłości. Wartości błędów względnych dla badanej tulei wynosiły odpowiednio 0,8% oraz 0,4%.
- Zastosowanie szczelinowych dysz pomiarowych skutecznie eliminuje zjawisko gwałtownej, skokowej zmiany przebiegu charakterystyki statycznej ograniczającej zakres pomiarowy  $z_p$  przetwornika, a tym samym jego zastosowanie.
- Przetworniki z pomiarowymi dyszami szczelinowymi wykazują bardzo dobre odtwarzanie składowych widma zarysu okrągłości, stąd mogą stanowić alternatywne rozwiązanie w stosunku do rozwiązań obecnie stosowanych w przemyśle.
- Należy zwrócić szczególną uwagę, aby podczas pomiaru dłuższa oś otworu dysz szczelinowej była usytuowana równoległe do osi wzdłużnej mierzonego obiektu, wpływa to bezpośrednio na wzrost selektywności pomiaru.

#### LITERATURA

- [1] BARTOSZEWICZ H., FITA S., NOWICKI J., *Zastosowanie dysz z otworem o przekroju prostokątnym w głowicach pneumatycznych do pomiaru wałków*, Wrocław, Prace Naukowe IMiA Politechniki Wrocławskiej, nr 52, s. 83–86, 1993.
- [2] FARAGO F.T., CURTIS M.A., *Handbook of Dimensional Measurement*. Industrial Press Inc., New York, 2004.
- [3] JAKUBIEC W., MALINOWSKI J., *Metrologia wielkości geometrycznych* (wydanie czwarte zmienione), Warszawa, WNT, 2004.
- [4] JERMAK Cz. J., *Teoretyczne i praktyczne aspekty kształtowania statycznych właściwości metrologicznych pneumatycznych przetworników długości*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, Rozprawy nr 476, 2012.
- [5] JERMAK Cz. J., JAKUBOWICZ M., *Ocena właściwości statycznych pneumatycznych przetworników długości (PPD) z dyszami szczelinowymi*, W: *Pomiary Automatyka Kontrola*, Wyd. PAK, t. 58, 2012, 994-997.
- [6] JERMAK Cz. J., RUCKI M., *Poprawa właściwości metrologicznych czujników pneumatycznych do pomiaru długości przez eliminację osiowej symetrii wypływu powietrza*, Poznań, W: *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, vol. 24, nr 2, s.75–82, 2004.
- [7] ROY G., NGUYEN D. N., FLORENT P., *Behavior of Radial Incompressible Flow in Pneumatic Dimensional Control System*, W: *Journal of Fluids Engineering*, vol. 125, s. 843–850, 2003.
- [8] ZELCZAK A., *Pneumatyczne pomiary długości*, Warszawa, WNT, 2002.

# OCENA WPŁYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH I PRZEPIYWOWYCH NA WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE PNEUMATYCZNYCH PRZETWORNIKÓW DŁUGOŚCI

Czesław Janusz JERMAK<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Pneumatyka pomiarowa jest techniką bezstykowych pomiarów precyzyjnych obejmujących zakresy pomiarowe od kilku do kilkuset mikrometrów. Pomiary realizowane są za pomocą pneumatycznych przetworników długości (PPD), a ich działanie związane jest ze zmianą parametrów termodynamicznych powietrza przepływającego przez przetwornik. Stosowany najczęściej w pomiarach długości jednokaskadowy przetwornik pneumatyczny zbudowany jest z dyszy wlotowej 1, komory pomiarowej 2 oraz dyszy pomiarowej 3 (rys. 1a). Zmiana parametrów – ciśnienia lub strumienia objętości – jest wywołana przyrostem szczeliny pomiarowej pomiędzy czołem dyszy pomiarowej a powierzchnią mierzonego przedmiotu.

Zmiana parametrów – ciśnienia lub strumienia objętości – jest wywołana przyrostem szczeliny pomiarowej  $s$  pomiędzy czołem dyszy pomiarowej, a powierzchnią mierzonego przedmiotu 4.

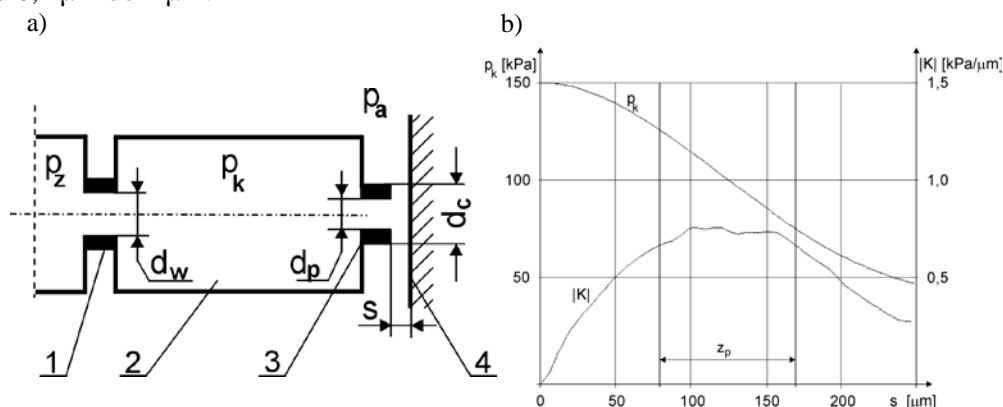
Przetwornik stanowi część pneumatycznego przyrządu pomiarowego, w którego skład wchodzi między innymi przetwornik ciśnienia pomiarowego na wielkość elektryczną, urządzenie wskazujące i inne elementy niezbędne do funkcjonowania przyrządu. W rozwiązaniach przemysłowych np. średnicówkach pneumatycznych, zintegrowanych systemach do pomiarów wymiarów zewnętrznych i wewnętrznych oraz do pomiaru zarysów kształtu i odchyłek położenia [5] może występować większa liczba dysz pomiarowych. Takie narzędzia pomiarowe noszą nazwę głowic pomiarowych.

---

<sup>1</sup> Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych, Instytut Technologii Mechanicznej, Politechnika Poznańska, pl. M. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań



Ciśnienie zasilania przyrządów pneumatycznych wynosi od 150 kPa do 400 kPa. Podstawową charakterystyką metrologiczną PPD jest charakterystyka statyczna  $p_k = f(s)$  (rys. 1b) ujmująca zależność pomiędzy ciśnieniem pomiarowym  $p_k$ , a szerokością szczeliny pomiarowej  $s$ . Dla celów badawczych pomocna jest również charakterystyka czułości pomiarowej  $|K| = f(s)$ . Parametry metrologiczne PPD zależne są od ciśnienia zasilania oraz od geometrii (wymiary i oprofilowanie) dysz wlotowej i pomiarowej. Dla stosowanych w praktyce zakresów pomiarowych czułość waha się od kilku dziesiątych do ponad jednego kPa/ $\mu\text{m}$ , a wartość działki elementarnej wynosi od 0,2  $\mu\text{m}$  do 2  $\mu\text{m}$ .



Rys. 1. Jednokaskadowy pneumatyczny przetwornik do pomiaru długości: a) schemat budowy, b) charakterystyki statyczna  $p_k = f(s)$  i czułości  $|K| = f(s)$

W zróżnicowanych pod względem metrologicznym pomiarach zachodzi konieczność elastycznego doboru parametrów przetwornika do zadania pomiarowego. W praktyce statyczne właściwości metrologiczne są ustalane przez zmianę przekroju dyszy wlotowej o stałym bądź zmiennym przekroju. Równie korzystny pod względem metrologicznym sposób polega na zmianie średnicy dyszy pomiarowej. Stosowany jest przez producentów pneumatycznych głowic pomiarowych, uwzględniających przeznaczenie konkretnego narzędzia pomiarowego – pomiar falistości, zarysu kształtu itp.

Właściwości metrologiczne mogą być kształtowane również przez zmianę ciśnienia zasilania przetwornika, jednak dokonuje tego wyłącznie producent przyrządu. Opisane poniżej wybrane sposoby oddziaływania na statyczne właściwości metrologiczne przetworników pozwalają na efektywne ich kształtowanie zgodnie z warunkami sformułowanymi w zadaniu pomiarowym.

## 2. WPŁYW CIŚNIENIA ZASILANIA

W rozdziale przedstawiono wyniki badań własnych dla dwóch wartości ciśnienia zasilania  $p_z = 150$  kPa i 200 kPa. Badania prowadzono w związku z oceną możliwości

wykorzystania w projektowanych przyrządach pneumatycznych stabilizatorów ciśnienia pracujących w zakresie do 200 kPa. Wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 1, a uzyskane charakterystyki przedstawiono na rysunku 2a i 2b. Potwierdzają one generalnie dane prezentowane w literaturze, mówiące o pozytywnym wpływie zwiększenia ciśnienia zasilania na właściwości metrologiczne PPD. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że to działanie nie zawsze jest korzystne z punktu widzenia uzyskania jednoczesnej poprawy parametrów metrologicznych.

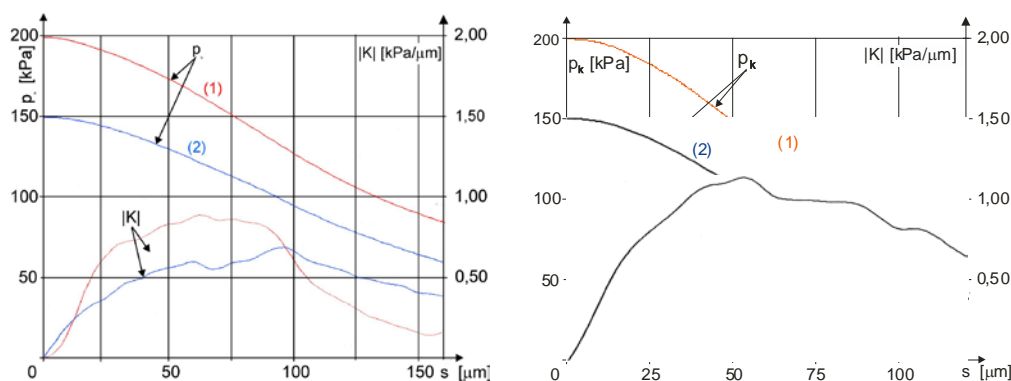
Tabela 1. Wpływ ciśnienia zasilania  $p_{zn}$  na zakres pomiarowy  $z_p$  i czułość przetwornika  $|K|$ ; błąd nielineowości  $\delta_l = 1\%$

$d_p$ [mm]	$D_c$ [-]	$d_w$ [mm]	$p_{zn} = 150 \text{ kPa}$		$p_{zn} = 200 \text{ kPa}$	
			$z_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$ K $ [kPa/ $\mu\text{m}$ ]	$z_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$ K $ [kPa/ $\mu\text{m}$ ]
1,210	1,5	0,770	62	0,842	32	1,120
	1,5	0,830	62	0,648	82	0,798
	1,5	1,020	64	0,456	80	0,565
2,007	1,5	0,720	43	0,980	28	1,432
	1,5	0,830	62	0,649	54	0,875

Taka sytuacja wystąpiła w przetwornikach z dyszą pomiarową o średnicy  $d_p = 1,210 \text{ mm}$  i wlotową o średnicy  $d_w = 0,770 \text{ mm}$  (rys. 2b). W rezultacie podwyższenia ciśnienia zasilania do 200 kPa nastąpiło zmniejszenie zakresu pomiarowego o 48%. W przetwornikach z dyszą pomiarową  $d_p = 2,007 \text{ mm}$  i z dyszami wlotowymi o średnicy  $d_w = 0,720 \text{ mm}$  oraz  $d_w = 0,830 \text{ mm}$  (rys. 2a) zakres pomiarowy zmniejszył się odpowiednio o 31% i 13%. Przypuszcza się, że jednym z czynników mających wpływ na to zjawisko jest skok ciśnienia występujący w miejscu największej czułości (rys. 2a, 2b).

a)

b)



Rys. 2. Charakterystyki statyczne i czułości dla ciśnienia zasilania  $p_{zn} = 150 \text{ kPa}$  – (2) i  $200 \text{ kPa}$  – (1); a)  $d_p = 2,007 \text{ mm}$ ,  $d_w = 0,830 \text{ mm}$ ,  $D_c = 1,5$ ; b)  $d_p = 1,210 \text{ mm}$ ,  $d_w = 0,770 \text{ mm}$ ,  $D_c = 1,5$

Poza szczególnymi przypadkami, ustalenie ciśnienia zasilania na poziomie różnym od stosowanego przez producentów nie powinno być praktykowane. Wyjątek stanowi konieczność zapewnienia niewielkiego nacisku pomiarowego lub uniknięcia zaburzeń wynikających z dużej prędkości przepływu [5]. Należy zauważyć, że stosowanie wysokiego ciśnienia zasilania powoduje znaczny wzrost zapotrzebowania na sprężone powietrze, a więc kosztu eksploatacji przyrządu oraz wzrost poziomu hałasu.

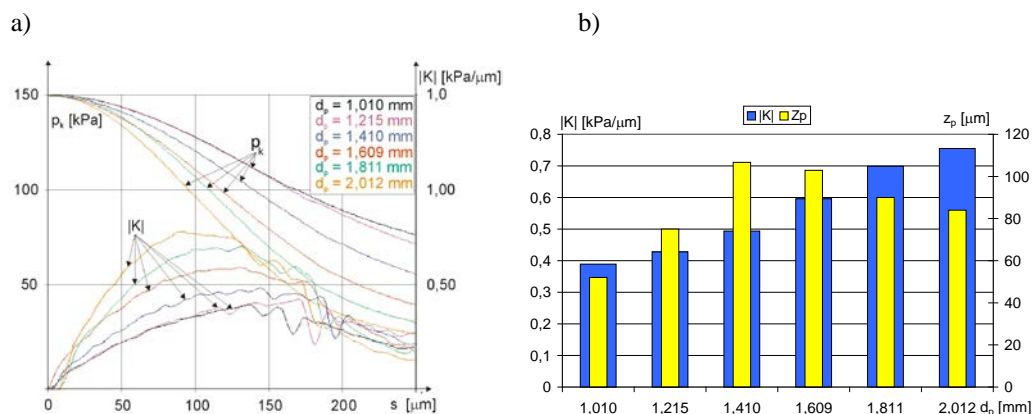
### 3. ANALIZA WPŁYWU ŚREDNICY DYSZY POMIAROWEJ

Analiza konstrukcji dysz pomiarowych stosowanych w głowicach pomiarowych nie pozwala na sformułowanie wniosku, w którym będzie jednoznacznie określony cel stosowania przez producentów dysz o danej średnicy. W pierścieniach pomiarowych lub średnicówkach przeznaczonych do pomiarów części o niewielkich wymiarach powinno się stosować dysze o małej średnicy  $d_p \leq 1$  mm. Zastosowanie dysz o większej średnicy powinno uwzględniać zarówno wymiar części jak i rodzaj mierzonej odchyłki.

Badania których celem była ocena wpływu średnicy dyszy pomiarowej na parametry metrologiczne przeprowadzono dla następujących średnic dysz  $d_p$ : 1,010 mm, 1,215 mm, 1,410 mm, 1,609 mm, 1,811 mm i 2,012 mm. Przyjęto unormowaną średnicę czouła  $D_c = 2$ , średnice dyszy wlotowej  $d_w$  wynosiły 0,830 mm i 1,210 mm.

Przyjęty zestaw średnic dysz pomiarowych i wlotowych zapewniał uzyskanie czułości  $|K|$  od 0,25 kPa/ $\mu\text{m}$  do 0,75 kPa/ $\mu\text{m}$ , typowych dla większości zastosowań.

Uzyskane wyniki najlepiej obrazują charakterystyki statyczne i czułości przedstawione na rysunkach 3a, b.



Rys. 3. Wpływ średnicy dyszy pomiarowej na: a) charakterystyki statyczne  $p_k(s)$  i czułości  $|K|(s)$ , b) parametry, czułość  $|K|$ , zakres pomiarowy  $z_p$ ;  $d_w = 0,830$  mm,  $D_c = 2$

Analizując charakterystyki przetworników z dyszą wlotową o średnicy  $d_w = 0,830$  mm, stwierdzono, że wraz ze wzrostem średnicy dyszy pomiarowej ekstremum

czułości przesuwają się w kierunku mniejszych szerokości szczelin, od  $s \approx 150 \mu\text{m}$  dla  $d_p = 1,010 \text{ mm}$  do  $s = 85 \mu\text{m}$  dla  $d_p = 2,012 \text{ mm}$ . Krzywe czułości stają się bardziej strome i spłaszczone w otoczeniu maksimum czułości (rys. 3a). Dla przyjętego zestawu dysz pomiarowych maksymalna czułość  $|K_{\text{max}}|$  wzrosła od  $0,40 \text{ kPa}/\mu\text{m}$  do  $0,75 \text{ kPa}/\mu\text{m}$ . Z kolei zmniejszeniu czułości towarzyszy przemieszczanie się skoków ciśnienia w kierunku większych wartości  $s$ . Ich amplituda zwiększa się wraz ze wzrostem średnicy dyszy pomiarowej.

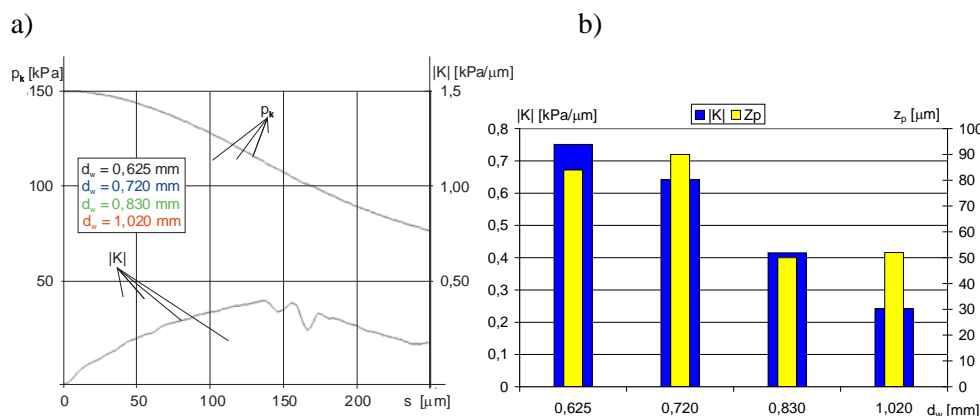
Należy podkreślić, że zmiana zakresu pomiarowego nie następuje odwrotnie proporcjonalnie do wzrostu czułości. Maksimum zakresu pomiarowego  $z_{p\text{max}}$  występuje w przedziale średnic  $d_p < 1,410, 1,609 > \text{ mm}$  (rys.3b) i wynosi około  $105 \mu\text{m}$  dla błędności nieliniowości  $\delta_l = 1\%$ . Dla pozostałych wartości średnic  $d_p$  zakres pomiarowy ma mniejszą wartość. W szczególności dotyczy to przetworników z dyszami o średnicach  $d_p$  równych  $1,010 \text{ mm}$ ,  $1,215 \text{ mm}$ , dla których zakres pomiarowy  $z_p$  ma wartość odpowiednio  $50 \mu\text{m}$  i  $75 \mu\text{m}$ . Przetworniki z dyszami pomiarowymi o średnicy  $d_p = 1,811 \text{ mm}$  i  $2,012 \text{ mm}$  charakteryzowały się znaczną czułością – średnio około  $0,72 \text{ kPa}/\mu\text{m}$  i zakresem pomiarowym  $z_p$  wynoszącym ponad  $80 \mu\text{m}$ . Skok ciśnienia z racji znacznego oddalenia od maksimum czułości (rys.3a) nie wywierał żadnego wpływu na parametry przetwornika.

#### 4. ANALIZA WPLYWU ŚREDNICY DYSZY WLOTOWEJ

Zmiana średnicy dyszy wlotowej jest powszechnie stosowanym sposobem regulacji parametrów metrologicznych PPD. Ocena wpływu średnicy  $d_w$  wykonano przyjmując graniczne stosowane w praktyce wartości średnicy dyszy pomiarowej  $d_p = 1,010 \text{ mm}$  i  $2,012 \text{ mm}$  [3]. Średnice dysz wlotowych  $d_w$  obejmowały zakres pozwalający na zmianę parametrów przetwornika w szerokich granicach i wynosiły  $0,625 \text{ mm}$ ,  $0,830 \text{ mm}$ ,  $1,020 \text{ mm}$  i  $1,430 \text{ mm}$ . W wyniku badań stwierdzono, że w przetwornikach z dyszą pomiarową  $d_p = 1,010 \text{ mm}$  występuje – po początkowym wzroście zakresu pomiarowego dla średnic  $d_w$   $0,625 \text{ mm}$  i  $0,720 \text{ mm}$  – istotne jego zmniejszenie (rys.4b). Występujące lokalne znaczne zmiany ciśnienia pomiarowego również ograniczają zakres pomiarowy przetworników z dyszami o średnicach  $d_w = 0,830 \text{ mm}$  i  $1,020 \text{ mm}$ . W przyjętym zakresie średnic  $d_w$  zakres zmniejszył się aż o  $40\%$ , a powinien zwiększyć się. Przyczynę tego należy upatrywać w niekorzystnym wpływie zjawisk w strefie czoła dyszy pomiarowej – powierzchnia przesłaniająca, czego obrazem są wahania czułości (rys.4a) występujące w pobliżu ekstremum czułości. Czułość przyjmuje wartości od  $0,25 \text{ kPa}/\mu\text{m}$  do  $0,75 \text{ kPa}/\mu\text{m}$  i jest uzależniona od średnicy dyszy wlotowej (rys. 4a, 4b).

Negatywne skutki występowania skoku ciśnienia występują w znacznie większej skali, jeżeli w przetworniku zastosuje się dyszę pomiarową o średnicy  $2,012 \text{ mm}$ . Przykładowo, porównując parametry przetworników z dyszami o średnicy  $d_w = 0,720 \text{ mm}$  i  $d_w = 1,430 \text{ mm}$  stwierdzono, że 60-procentowy spadek czułości spowodowany zwiększeniem średnicy  $d_w$  nie przekłada się na wzrost zakresu pomiarowego.

Nieznaczną tendencją wzrostową zakresu pomiarowego obserwuje się natomiast stosując dysze wlotowe o średnicach  $d_w$ , 0,830 mm, 1,020 mm i 1,210 mm [3]. Z przytoczonych wywodów wypływa wniosek o niskiej efektywności oddziaływania średnic dysz wlotowej lub pomiarowej na kompensowanie zjawisk pogarszających parametry PPD.



Rys. 4. Wpływ średnicy dyszy wlotowej na: a) charakterystyki statyczne  $p_k(s)$  i czułości  $|K|(s)$ , b) parametry, czułość  $|K|$ , zakres pomiarowy  $z_p$ ;  $d_p = 1,010$  mm,  $D_c = 2$

## 5. ANALIZA WPŁYWU UNORMOWANEJ ŚREDNICY CZOŁA DYSZY POMIAROWEJ $D_c$

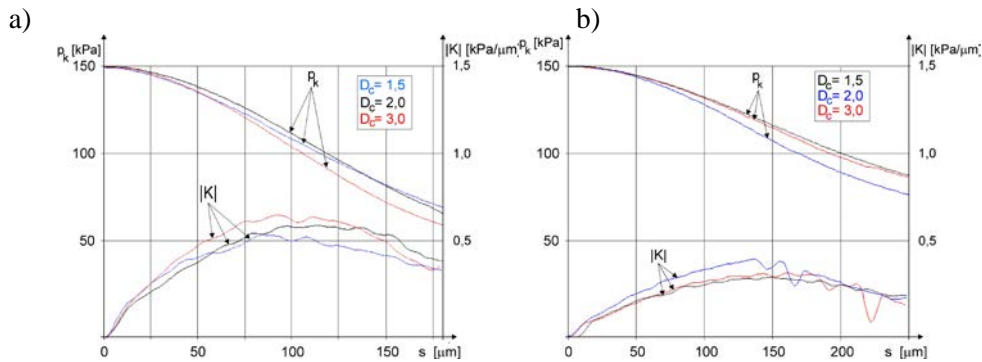
Wyniki badań zamieszczonych w pracach [3, 4] jednoznacznie wskazują na powiązanie właściwości metrologicznych ze średnicą czoła dyszy  $d_c$ . Niewątpliwie mają na to wpływ zjawiska zachodzące podczas przepływu powietrza w obszarze szczeliny pomiarowej [4]. W skojarzeniu z geometrią dysz przetwornika zjawiska te w mniejszym lub większym stopniu kształtują głębokość skoku ciśnienia ograniczającego zakres pomiarowy przetwornika.

Badaniami objęto przetworniki z dyszami pomiarowymi o średnicach  $d_p = 1,020$  mm i 2,006 mm o unormowanych czołach dysz  $D_c = d_c / d_p$  równych 1,2, 1,5, 2 i 3. Przyjęto średnice dyszy wlotowej  $d_w$ : 0,625 mm, 0,720 mm, 0,830 mm, 1,020 mm.

Wpływ wartości  $D_c$  na właściwości metrologiczne przeanalizowano, rozpatrując przypadki zestawienia dysz w których czułość zmienia się w szerokich granicach.

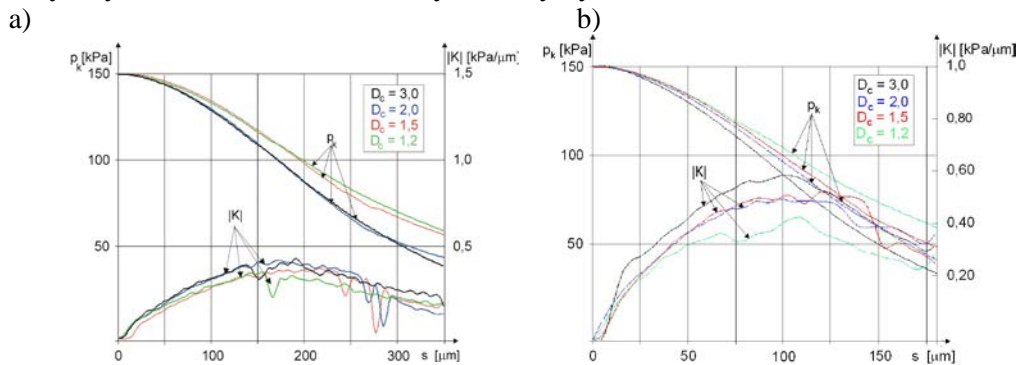
W wyniku badań stwierdzono, że w przetworniku z dyszami o średnicach  $d_p = 1,020$  mm,  $D_c = 3$  oraz  $d_w = 0,830$  mm bardzo duże wahania czułości nie wywołują negatywnych skutków w sensie ograniczenia zakresu pomiarowego, ponieważ występują w znacznym oddaleniu ( $s \approx 220 \mu$ m) od ekstremum czułości (rys. 5b). Zmniejszenie średnicy do wartości  $d_w = 0,720$  mm eliminuje skok ciśnienia, poprawiając w ten sposób liniowość charakterystyki statycznej. Zmniejszenie średnicy czoła dyszy do wartości  $D_c = 2$  skutkuje przesunięciem skoku ciśnienia w pobliże

ekstremum czułości (rys. 5b) oraz złagodzeniem jego intensywności. W porównaniu z przetwornikiem z dyszą o średnicy  $D_c = 3$  ogranicza to zakres pomiarowy przetworników z zastosowanymi w badaniach dyszami wlotowymi.



Rys. 5. Charakterystyki statyczne  $p_k(s)$  i charakterystyki czułości  $|K|(s)$  w zależności od normowanej średnicy czoła dyszy pomiarowej  $D_c$ ;  $d_p = 1,020$  mm; a)  $d_w = 0,720$  mm, b)  $d_w = 0,830$  mm

Badaniami objęto również przetworniki z dyszami pomiarowymi o średnicy  $d_p = 2,012$  mm i z dyszami wlotowymi o średnicach  $d_w = 0,830$  mm i  $1,210$  mm (rys. 6). W porównaniu z przypadkiem omawianym powyżej dla w przetworniku z dyszą o średnicy  $d_w = 0,830$  mm zaobserwowano wzrost amplitudy wahań czułości (rys.6b). Wystąpiło również silne zróżnicowanie nachylenia charakterystyk statycznych w zależności od średnicy czoła dyszy  $D_c$ .



Rys.6. Charakterystyki statyczne  $p_k(s)$  i charakterystyki czułości  $|K|(s)$  w zależności od normowanej średnicy czoła dyszy pomiarowej  $D_c$ ;  $d_p = 2,010$  mm; a)  $d_w = 1,210$  mm, b)  $d_w = 0,830$  mm

W przetwornikach z dyszą wlotową o średnicy  $d_w = 1,210$  mm w miarę zmniejszania średnicy czoła zaobserwowano przemieszczanie się skoku czułości w kierunku mniejszych szerokości szczelin (rys.6a), co skutkowało znacznym ograniczeniem zakresu pomiarowego. Zjawisko to wystąpiło z dużą intensywnością w przetworniku z dyszą o średnicy czoła  $D_c = 1,2 \div 1,5$ .

Należy zauważyć, że zalecana przez Lotzego [4] średnica czoła dyszy pomiarowej  $d_c = 1 + d_p$  nie powinna być stosowana w dyszach pomiarowych o średnicy  $d_w = 1$  mm i  $d_w = 2$  mm, ze względu na możliwość wystąpienia – przy określonych wartościach  $d_w$  – skoków ciśnienia o znacznej wartości.

Zastosowanie dyszy wlotowej o mniejszej średnicy  $d_w = 0,830$  mm poza znacznym wzrostem czułości ogranicza intensywność zjawiska skoku ciśnienia wpływając tym samym na poprawę parametrów przetwornika.

## 5. PODSUMOWANIE

1. W badanych przetwornikach przy wzroście ciśnienia zasilania  $p_z$  od 150 kPa do 200 kPa, jednoczesna poprawa parametrów metrologicznych, zakresu pomiarowego i czułości występuje dla zestawów dysz o średnicach  $d_p = 1,210$  mm i  $d_w = 0,830$  mm lub  $d_p = 1,210$  mm i  $d_w = 1,020$  mm. Czułość wzrasta odpowiednio o 21% i 24%, a zakres pomiarowy o 32% i 25%.
2. Zastosowanie w przetworniku z dyszą wlotową o średnicy  $d_w = 0,830$  mm dyszy pomiarowej o średnicy  $d_p = 1,010$  mm lub 1,215 mm skutkuje wystąpieniem znacznych skoków ciśnienia ograniczających zakres pomiarowy przetwornika. Najkorzystniejsze parametry uzyskuje się stosując dysze pomiarowe o średnicy  $d_p$  1,4–1,6 mm.
3. W zastosowaniach przemysłowych typowa wartość czułości wynosi 0,25–0,75 kPa/ $\mu$ m i jest silnie uzależniona od średnicy dyszy wlotowej  $d_w$ . Zmniejszenie średnicy  $d_w$  zwiększa czułość przetwornika.
4. Zmniejszenie średnicy  $d_w$  sprzyja ograniczeniu wahań czułości eliminując jednocześnie skok ciśnienia.
5. Zmiana średnicy czoła dyszy pomiarowej  $D_c$  stanowi skuteczny sposób ograniczenia niekorzystnego oddziaływania skoku ciśnienia na parametry metrologiczne. Zalecane wartości średnicy czoła –  $D_c \geq 3$ .
6. Wartość skoku ciśnienia jest ściśle uzależniona od ilorazu średnic  $d_p/d_w$  i wzrasta wraz ze zmniejszeniem wartości tego ilorazu.

## LITERATURA

- [1] BALAKŠIN O.B. *Avtomatizaciâ pnevmatičeskogo kontrolâ razmerov v mašinostroenii*. Mašinostroenie, Moskwa, 1968.
- [2] JERMAK CZ.J., RUCKI M., *Metrologiczne aspekty stosowania czujników pneumatycznych*. W: Inżynieria Maszyn, R. 10, z. 3, 2013, 138-147.
- [3] JERMAK CZ.J., *Teoretyczne i praktyczne aspekty kształtowania statycznych właściwości metrologicznych pneumatycznych przetworników długości*, W: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, seria Rozprawy, nr 476, Poznań, 2013
- [4] LOTZE W., *Kritische Einschätzung und Beiträge zur Entwicklung der Pneumatischen Langenmesstechnik*. Habilitation, TU Dresden, 1968
- [5] ZELCZAK A., *Pneumatyczne pomiary długości*. Warszawa, WKŁ, 2002.

# **ROLA STRATEGII POMIARÓW TOPOGRAFII POWIERZCHNI W OCENIE WYBRANYCH PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI**

Barbara KAMIENSKA-KRZOWSKA<sup>1</sup>, Mariusz KŁONICA<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

Ciągły postęp technologiczny zmusza producentów części maszyn oraz narzędzi skrawających do poszukiwania bardziej wydajnych i efektywnych metod ich wytwarzania. Względy ekonomiczne oraz wymogi ekologiczne powodują konieczność wprowadzania nowych rozwiązań, zapewniających zmniejszenie jednostkowych kosztów wytwarzania przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniej jakości wytworzonych części maszyn.

Poprawa efektywności obróbki, w tym także rozwój wysokowydajnych i szybkościowych metod skrawania, powodują także wzrost wymagań stawianych narzędziom skrawającym. Podstawowym wyznacznikiem mówiącym o przydatności danego narzędzia do obróbki jest zapewnienie odpowiedniej jakości warstwy wierzchniej po obróbce. Zastosowanie wysokoobrotowych obrabiarek CNC do obróbki skrawaniem zapewnia uzyskanie powierzchni o odpowiedniej dokładności geometrycznej i pozwala wyeliminować w niektórych przypadkach operacje szlifowania z typowych procesów technologicznych części maszyn. Ma to znaczenie praktyczne, wynikające ze skrócenia czasu potrzebnego do wykonania końcowego produktu, a co za tym idzie obniżenie kosztów produkcyjnych.

Główni producenci narzędzi skrawających bardzo szybko reagują na potrzeby rynku wprowadzając na rynek coraz to nowsze rozwiązania konstrukcyjne będące tajemnicą firmy. Ciągły rozwój materiałów narzędziowych, geometrii ostrza (płytki narzędziowe), a także ciągła optymalizacja powłok stosowanych na narzędzia

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: [b.krzowska@pollub.pl](mailto:b.krzowska@pollub.pl)



powodują poprawę jakości warstwy wierzchniej jaką uzyskujemy po obróbce skrawaniem.

Struktura geometryczna powierzchni ma bardzo duże znaczenie funkcjonalne i eksploatacyjne. Intensywny rozwój różnych technik metrologii powierzchni [1,5,11] umożliwia przewidywanie właściwości funkcjonalnych powierzchni oparte na dokładnej ocenie topografii powierzchni oraz ocenę jakości tej powierzchni w wyniku jej obróbki. Na strukturę geometryczną powierzchni składają się trzy główne elementy: kształt, falistość oraz chropowatość. Chropowatość należy do cech jakości powierzchni najczęściej ocenianej poprzez wskaźniki ilościowe zwane parametrami chropowatości powierzchni 2D (metoda profilowa) i 3D (metoda stereometryczna). Wyznaczane są one zwykle w czasie pomiaru techniką stykową przy pomocy profilometrów a pomiary te należą do skomplikowanych. Wiele publikacji wskazuje na istotną rolę strategii pomiaru w ocenie wartości tych parametrów [3, 6, 7, 10]. Jednym z ważniejszych jej elementów jest filtracja, której znaczenie w pomiarach topografii powierzchni jest przedmiotem wielu unormowań [13, 14] i prowadzonych badań [6, 7, 10].

## 2. POMIARY STYKOWE CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI

Wiele firm oferuje przyrządy stykowe, które pozwalają badać topografię powierzchni 3D lub charakterystykę profilu 2D, wyznaczając różne parametry ilościowych ujęte w licznych normach (np. ISO 25178, ISO 16610, EUR 15178N, ASME B46.1, DIN 4768, ISO 4287 i inne).

### 2.1. ZASADA POMIARÓW

Zasada pomiarów stykowych oparta jest na odwzorowaniu wzniesień i wgłębień na powierzchni przez ostrze o określonym promieniu przesuujące się ze stałą prędkością po powierzchni. Pomiarów dokonuje się w określonym kierunku w przypadku metody profilowej 2D oraz przeprowadzając tzw. wierszowanie na określonej powierzchni w metodzie stereometrycznej 3D.

### 2.2. WYZNACZANE PARAMETRY

Parametry chropowatości powierzchni dzielą się na 4 grupy. Należą do nich: parametry wyznaczone w kierunku pionowym tzw. amplitudowe - uwzględniające zmiany wysokości, parametry poziome tzw. odległościowe - wyznaczone wzdłuż linii profilu, parametry mieszane, parametry związane z krzywą udziału materiałowego profilu w funkcji przekroju. Algorytmy ich obliczania są prezentowane w wielu normach a ich oznaczenia często się różnią. W praktyce pomiarowej jest więc problem ich wyboru do oceny powierzchni.

Na podstawie stanu wiedzy można stwierdzić, że właściwości funkcjonalne powierzchni zależą od parametrów przestrzennych 3D chropowatości powierzchni, głównie amplitudowych z grupy oznaczanej S i funkcjonalnych z grupy oznaczanych V z normy ISO 25178-2 (2012). Parametry chropowatości 2D natomiast mogą być stosowane do oceny jakości powstałej powierzchni w wyniku obróbki.

### 3. ELEMENTY STRATEGII POMIARÓW CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI

Strategia pomiarów dotyczy zaplanowanego działania w trakcie pomiarów, które w najbardziej zadawalający sposób zapewni odpowiednią dokładność i wiarygodność wyniki pomiarów a następnie umożliwi ocenę cech stereometrycznych powierzchni i jej właściwości eksploatacyjnych. W szerokim rozumieniu strategia pomiaru obejmować powinna działania polegające na ustaleniu interpretacji wymagań dokładności podanych na rysunku lub w specyfikacji, wyborze przyrządu pomiarowego, wyborze metody pomiarów 2D czy 3D, wyborze określanych parametrów liczbowych do oceny jakości powierzchni, określenie szczegółowego przebiegu pomiaru, sposobu opracowania wyników i oceny ich niepewności.

Wybór metody pomiarów ma znaczenie do określania właściwości eksploatacyjnych, które głównie zależą od jej cech stereometrycznych a ich parametry często znacznie różnią się od parametrów wyznaczanych dla zarysu powierzchni 2D [4]. Opracowany system [4] przetwarzania danych z profilometru w celu wyznaczenia kompleksowego zbioru parametrów stereometrycznych powierzchni nie znalazł szerokiego zastosowania.

Wybór parametrów chropowatości 2D ma bardzo istotne znaczenie z punktu widzenia oceny jakości powierzchni związanej z procesem wytwarzania, gdyż obejmuje ślady po narzędziu bardziej lub mniej okresowe, służy więc najczęściej monitorowaniu procesu produkcji. W celu weryfikacji funkcjonalności powierzchni lepiej stosować pomiary 3D gdyż dają one jej pełny opis.

W przypadku pomiarów topografii powierzchni istnieje wiele czynników wpływających na błędy pomiaru. Są one związane z:

1. przyrządem pomiarowym i jego właściwościami jak czułość i rozdzielczość,
2. rodzajem przetwornika,
3. sposobem przetwarzania sygnału elektrycznego, analogowy lub cyfrowy,
4. promieniem ostrza odwzorowującego,
5. oprogramowaniem,
6. filtrami i ich charakterystyką.

Wszystkie te czynniki determinują wybór przyrządu pomiarowego.

Dla procesu pomiarowego mają znaczenie też takie elementy strategii, na które ma wpływ operator pomiaru jak: wybór parametrów do oceny, wybór odcinków pomiarowych, liczba wykonywanych pomiarów, rodzaj filtru, kierunek pomiaru w ramach możliwości stosowanego przyrządu pomiarowego.

#### 4. WPLYW FILTROWANIA NA PARAMETRY CHROPOWATOŚCI

Filtrowanie ma za zadanie oddzielenie poszczególnych składowych nierówności struktury geometrycznej powierzchni i usunięciu niepożądanych składowych harmonicznych z profilu. Zagadnieniu temu poświęcono wiele publikacji [6,7,10,11] i wciąż budzi ono wiele kontrowersji. Zastosowanie odpowiedniego filtra może mieć bardzo istotny wpływ na wyniki pomiarów. Możliwe jest stosowanie filtrów analogowych i cyfrowych. Filtr analogowym mechaniczno-geometrycznym jest już ostrze odwzorowujące (jego promień) oraz ślizgacz w metodzie stykowej. Rolę filtra elektrycznego spełnia długość odcinka elementarnego (cut-off  $\lambda_f$ ), na którym wyznacza się linię odniesienia i oblicza się wartości parametrów. Tego rodzaju filtrowanie występuje więc tylko w początkowej fazie pomiaru przy przetwarzaniu sygnałów analogowych. Obecnie stosowana technika pomiarowa oparta jest głównie na sygnałach cyfrowych i przetwarzaniu A/C, które wymagają stosowania filtrów cyfrowych opartych o różne koncepcje [7] i o różnych właściwościach [13].

Zagadnienia i problemy związane z filtrowaniem cyfrowym omówiono szeroko w pracy [7]. Dotyczy to szczególnie filtrów powierzchniowych, stosowanych w pomiarach 3D dla których prowadzone są dopiero prace normalizacyjne.

##### 4.1. BADANIA

Celem badań było określenie w jaki sposób zastosowanie różnych filtrów wpływa na wyniki pomiarów wybranych parametrów chropowatości powierzchni w pomiarach 2D i porównanie ich z pomiarami 3D tych powierzchni.

Badania przeprowadzono na stalowych wzorcach chropowatości powierzchni po obróbce toczeniem i szlifowaniem, wykonanych w tej samej klasie chropowatości powierzchni (dawnej 7). Wybrano je ze względu na odmienny charakter struktury.

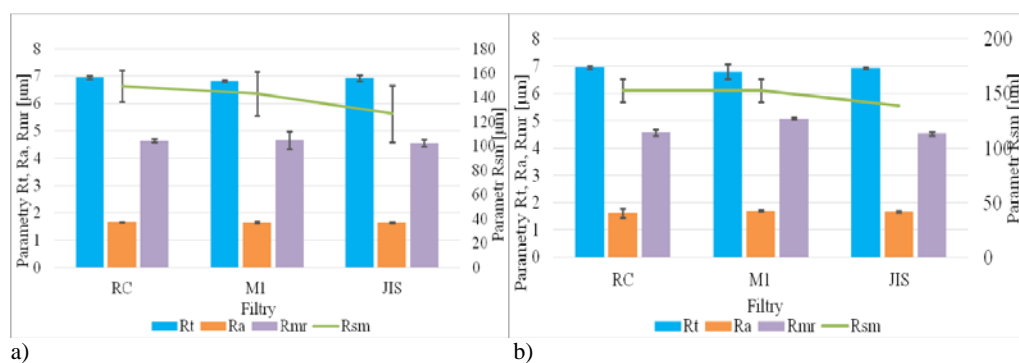
Pomiary 2D wykonano na profilometrze HOMMEL TESTER T1000 z igłą diamentową o promieniu 5  $\mu\text{m}$  głowicą ze ślizgaczem o promieniu 30 mm i o rozdzielczości 10 nm, natomiast do oceny parametrów wykorzystano oprogramowanie Turbo DATA WIN.

Analizie poddano cztery wybrane parametry należące do różnych grup: amplitudowe  $R_t$ ,  $R_a$ , odległościowy  $R_{Sm}$  oraz związany z krzywą udziału materiałowego  $R_{mr}(50\%)$ , przy zastosowaniu trzech filtrów oznaczonych jako: JIS, M1 DIN 4777 i RC DIN 4768 i przy dwu różnych wartościach „cut-off”  $\lambda_f$ : 0,8 mm i 0,25 mm.

Pomiary 3D przeprowadzono na urządzeniu do pomiaru konturu, chropowatości i topografii 3D T8000 RC-12-40 firmy Hommel-Etamic z końcówką pomiarową o promieniu 2  $\mu\text{m}$ . Pomiary wykonano na powierzchni (2 mm x 2 mm) przy 200 wierszowaniach. Do analizy wykorzystano oprogramowanie TURBO WAVE.

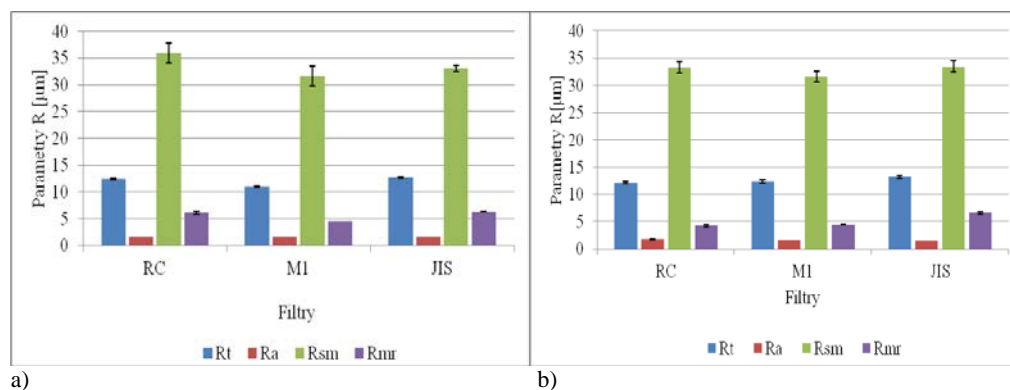
#### 4.2. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki pomiarów parametrów chropowatości 2D przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Wykresy słupkowe przedstawiają wartości średnie wybranych parametrów chropowatości powierzchni z 5 powtórzeń wraz z zaznaczoną niepewnością rozszerzoną  $U$  ( $k=3$ ). Analizowane wartości parametrów chropowatości to:  $R_t$ ,  $R_a$ ,  $R_{nr}$  oraz  $R_{sm}$ . Ze względu na uzyskane wyniki badań własnych dla parametru  $R_{sm}$  na rysunku 1 zdecydowano się na umieszczenie dodatkowej osi rzędnych.



Rys. 1. Wyniki pomiarów parametrów chropowatości 2D próbek po obróbce toczeniem: a)  $l_c = 0,25$  mm, b)  $l_c = 0,8$  mm

Wyniki pomiarów wykazują niewielki rozrzut wartości dla parametrów  $R_a$ ,  $R_t$  oraz  $R_{nr}$  i bardzo dużą ich powtarzalność. Większy rozrzut wartości zaobserwowano dla parametru  $R_{sm}$  (linia łamana na rysunku 1).

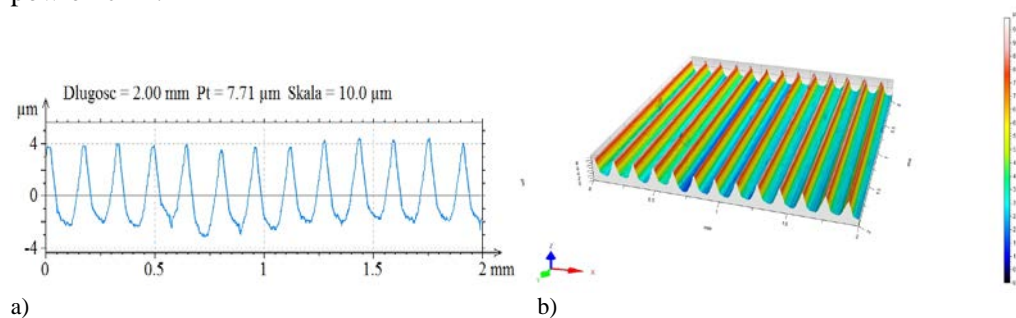


Rys. 2. Wyniki pomiarów parametrów chropowatości 2D próbek po obróbce szlifowaniem: a)  $l_c = 0,25$  mm, b)  $l_c = 0,8$  mm

Również, wartości parametrów chropowatości powierzchni po obróbce szlifowaniem charakteryzują się niewielkim rozrzutem. Nie zaobserwowano wpływu rodzaju zastosowanego filtra na wartości parametru  $R_a$ , natomiast wartości

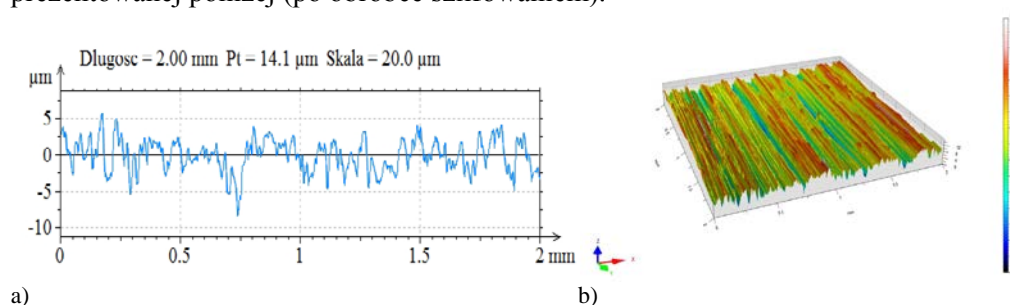
pozostałych parametrów różnią się niewiele w przypadku powierzchni po obróbce toczeniem. Niewielkie różnice (do 20%) zauważono dla powierzchni szlifowanych przy odcinku elementarnym  $L_c = 0,25$  mm.

Na rysunku 3 i 4 przedstawiono wizualizację profili i topografię badanych powierzchni.



Rys. 3. Topografia powierzchni wzorca po obróbce toczeniem (powierzchnia mierzona 2 mm x 2 mm):  
a) profil powierzchni, b) obraz izometryczny

Prezentowana powierzchnia (po obróbce toczeniem) charakteryzuje się dużą powtarzalnością oraz regularnym kształtem w przeciwieństwie do powierzchni prezentowanej poniżej (po obróbce szlifowaniem).



Rys. 4. Topografia powierzchni wzorca po obróbce szlifowaniem (powierzchnia mierzona 2mmx2mm):  
a) profil powierzchni, b) obraz izometryczny

Zarówno dla obróbki toczeniem jak i dla obróbki szlifowaniem zaobserwowano na prezentowanych profilach charakterystyczne zagłębienia przedstawiające kinematycznie - geometryczne odwzorowanie narzędzia.

Wybrane wartości znormalizowanych parametrów chropowatości powierzchni 2D oraz 3D zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości znormalizowanych parametrów chropowatości powierzchni 2D i 3D

Parametry [ $\mu\text{m}$ ]	Toczenie						Szlifowanie					
	Rt	Sz	Ra	Sa	Rmr	Sxp	Rt	Sz	Ra	Sa	Rmr	Sxp
2D	6,89	X	1,65	X	4,67	X	12,31	X	1,64	X	5,38	X
3D	X	9,93	X	1,82	X	1,85	X	15,8	X	1,76	X	5,14

Parametry 2D zostały obliczone wg norm DIN/ISO a ich odpowiedniki 3D wg opisu zawartego w publikacji [8].

## 5. WNIOSKI

Pomiary topografii powierzchni należą do bardziej skomplikowanych pomiarów geometrii. Na ich strategię wpływa wiele elementów, które mogą być arbitralnie ustalane. Istnieją wprawdzie zalecenia [1, 2, 9] wynikające z praktyki pomiarowej i unormowań lecz nie zawsze można je zastosować w konkretnym przypadku. Wielu autorów wskazuje na istotny wpływ filtrowania na wyniki pomiarów różnych grup parametrów chropowatości powierzchni 2D i 3D. Wyniki tych badań często nie mogą być porównywalne ze względu na różnice w algorytmach ich obliczania zastosowanych w konkretnych przyrządach. Ich użytkownicy oczekują od pomiarów wiarygodności i dokładności. Po przeprowadzonej analizie badań można sformułować następujące wnioski:

1. Zastosowanie różnych filtrów nie spowodowało znaczących różnic w wartościach parametrów chropowatości Rt, Ra i RSm dla obu sposobów obróbki.
2. Wyraźne różnice w otrzymanych wartościach zaobserwowano dla parametru Rmr (50%) przy pomiarach z zastosowaniem różnych filtrów (JIS, M1 i RC).
3. Z porównania parametrów 2D i 3D wynika, że wartości średnich arytmetycznych wysokości profili Ra=1,65  $\mu\text{m}$  i Sa=1,82  $\mu\text{m}$  dla obróbki toczeniem i Ra=1,64  $\mu\text{m}$  i Sa=1,76  $\mu\text{m}$  dla obróbki szlifowaniem są zbliżone, natomiast wartości maksymalnych wysokości Rt = 6,89  $\mu\text{m}$  i Sz = 9,93  $\mu\text{m}$  powierzchni po toczeniu i Rt = 12,31  $\mu\text{m}$  i Sz = 15,8  $\mu\text{m}$  dla powierzchni po obróbce szlifowaniem różnią się znacznie.

Wydaje się, istnienie potrzeby badań, które umożliwią opracowanie zalecanych strategii pomiaru z równoczesnym wskazaniem ich konsekwencji dla oceny jakości powierzchni. Przedstawione badania zmierzają w tym kierunku i stanowią wstępne rozeznanie problemu.

## LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., *Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość*. Warszawa, WNT, 2008.
- [2] ADAMCZAK S., *Normalizacja pomiarów struktury geometrycznej powierzchni. Ocena chropowatości i falistości powierzchni. Zasady i warunki prowadzenia pomiarów. Cz. 9* W: *Mechanik* 79,2006, 180-183.
- [3] BORYCZKO A., *Uwarunkowania i ograniczenia cyfrowego pomiaru nierówności profili powierzchni*. W: *Mechanik* nr 12, 2010, 957-962.
- [4] CINCIO R., KACALAK W., *System do analizy i oceny topografii powierzchni technicznych*. W: *Pomiary Automatyka Kontrola* vol. 53, nr 9 bis/2007, 515-518.
- [5] HUMIENNY Z. i inni., *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS)* WNT Warszawa 2004.
- [6] SWORNOWSKI P., *Wpływ mechanicznego filtrowania końcówki pomiarowej na falistość i chropowatość powierzchni*. W: *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, vol. 26 nr 2, 2006, 129-136.
- [7] TOMKOWSKI R., KAPŁONEK W., KACALAK W., ŁUKIANOWICZ CZ., LIPIŃSKI D., CINCIO R., *Metody filtracji cyfrowej w ocenie topografii powierzchni*. W: *Pomiary Automatyka Kontrola* vol. 59, nr 6, 2013, 507-510.
- [8] OCZOŚ K., LIUBIMOV V., *Struktura geometryczna powierzchni - podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowych*. Rzeszów, Wyd. Politechniki Rzeszowskiej 2003.
- [9] WIECZOROWSKI M., CELLERY A., CHAJDA J., *Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli o chropowatości i nie tylko*. Politechnika Poznańska, Poznań 2006.
- [10] WIECZOROWSKI M., *Podstawy teoretyczne filtracji morfologicznej w pomiarach chropowatości powierzchni*. W: *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, Vol.29 nr 4, 2009, 41-49.
- [11] ZABORSKI A., *Komputeryzacja pomiarów błędów kształtu i stereometrii przedmiotów walcowych*. W: *Mechanik* nr 11, 2010, 828-832.
- [12] PN-EN ISO 4288:1997 *Wymagania geometryczne wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni. Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni metodą profilową*.
- [13] PN-EN ISO 11562:1998 *Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni. Metoda profilowa. Charakterystyki metrologiczne filtrów z korekcją fazy*.
- [14] PN-EN ISO 13565-1:1999 *Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni. Metoda profilowa. Powierzchnie o warstwowych właściwościach funkcjonalnych. Filtrowanie i ogólne warunki pomiaru*.

# ZASTOSOWANIE SYSTEMU ZAUTOMATYZOWANEJ INSPEKCJI WIZYJNEJ DO POMIARÓW I ANALIZ ROZPRASZANIA ŚWIATŁA NA POWIERZCHNIACH PORÓWNAWCZYCH WZORCÓW CHROPOWATOŚCI

Wojciech KAPŁONEK<sup>1</sup>, Paweł SUTOWSKI<sup>2</sup>, Czesław ŁUKIANOWICZ<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych zjawisk, mających fundamentalne znaczenie we współczesnej metrologii optycznej jest rozpraszanie światła [4, 9, 10]. Zjawisko to wykorzystywane jest od niemal 50-ciu lat [1], m.in. w pomiarach struktury geometrycznej powierzchni (SGP) [6, 7] precyzyjnie obrabianych części maszyn i urządzeń, aparatury pomiarowej oraz szerokiej gamy elementów optycznych i optoelektronicznych. Zaadaptowanie rozpraszania światła do ww. zastosowań, związane było z opracowaniem podstaw teoretycznych metod pomiarowych wykorzystujących to zjawisko. Wśród wielu opisanych w literaturze metod, najważniejszymi z punktu widzenia zastosowań praktycznych okazały się metody integracyjne, związane z pomiarami refleksyjności zwierciadlanej  $R_s$  i dyfuzyjnej  $R_d$ , oznaczone w j. angielskim akronimem TIS (*Total Integrated Scattering*) [12] oraz metody różniczkowe, wykorzystujące pomiar kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego, oznaczone akronimami ARS (*Angle-Resolved Scattering*) [5] lub DS (*Differential Scattering*). Powyższe metody implementowano w komercyjne systemy i urządzenia pomiarowe, jak również w różnego rodzaju układy o charakterze eksperymentalnym, przeznaczone do przemysłowych lub laboratoryjnych pomiarów SGP (głównie parametrów chropowatości powierzchni) [8, 11, 13, 14].

Pomimo, iż metody rozpraszania światła są w dalszym ciągu intensywnie rozwijane, poszukuje się obecnie nowych alternatywnych rozwiązań mogących je

---

<sup>1</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Zakład Metrologii i Jakości, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, e-mail: [wojciech.kaplonek@tu.koszalin.pl](mailto:wojciech.kaplonek@tu.koszalin.pl), [czeslaw.lukianowicz@tu.koszalin.pl](mailto:czeslaw.lukianowicz@tu.koszalin.pl)

<sup>2</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Zakład Logistyki i Eksploatacji, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, e-mail: [pawel.sutowski@tu.koszalin.pl](mailto:pawel.sutowski@tu.koszalin.pl)



zastąpić lub wspomagać w procesie oceny stanu badanej powierzchni. W niniejszej pracy przeanalizowano możliwość zastosowania w tym celu technik obrazowych wykorzystujących systemy zautomatyzowanej inspekcji wizyjnej. W punkcie 2 dokonano krótkiej charakterystyki tych technik, natomiast opis metodyki badań i zastosowanego systemu wizyjnego podano w punkcie 3. Dodatkowo przedstawiono i przeanalizowano wybrane rezultaty prowadzonych prac, potwierdzające możliwość zastosowania proponowanego rozwiązania do pomiarów i analiz rozpraszania światła na powierzchniach porównawczych wzorców chropowatości.

## 2. CHARAKTERYSTYKA TECHNIK OBRAZOWYCH I SYSTEMÓW INSPEKCJI WIZYJNEJ

Techniki obrazowe związane ze zautomatyzowaną inspekcją wizyjną określane są w j. angielskim terminem *machine vision* (MV) lub po prostu *vision* [2,3]. W Polsce przyjęto wiele terminów, do których można zaliczyć m.in. *widzenie przemysłowe*, *widzenie maszynowe* oraz *wizję maszynową*. Od strony technicznej, powyższe określenia dotyczą szerokiej grupy urządzeń wizyjnych, do której można zaliczyć m.in. czujniki wizyjne, układy jednokamerowe (kamery inteligentne) oraz rozbudowane wielokamerowe systemy wizyjne. Te ostatnie są najważniejszymi z punktu widzenia kompleksowych zastosowań przemysłowych. System wizyjny jest w rzeczywistości rodzajem systemu pomiarowego. Może być on zdefiniowany jako kompletny zbiór współpracujących ze sobą urządzeń i elementów optoelektronicznych, przeznaczonych do realizacji procesu akwizycji, przetwarzania i analizy danych obrazowych w sposób automatyczny. Do komponentów typowego systemu wizyjnego można zaliczyć: kamery, obiektywy, systemy oświetlenia, karty akwizycji, kable, kontrolery oraz dedykowane oprogramowanie.

Wzrost znaczenia rozwiązań wykorzystujących zautomatyzowaną inspekcją wizyjną wynika z faktu ciągłego zwiększania wymagań dotyczących jakości wytwarzanych przemysłowo elementów maszynowych. Wdrożenie systemu wizyjnego umożliwia utrzymanie wysokich wymagań, co do zapewnienia jakości produkcji, m.in. przez:

- prowadzenie kontroli wszystkich lub wybranych etapów produkcji przemysłowej,
- możliwość oceny pojedynczych elementów lub grupy elementów,
- pracę w trybie ciągłym, bez konieczności zatrzymywania linii produkcyjnej lub bez przerywania procesu produkcyjnego,
- szerokie możliwości zmiany konfiguracji systemu, dostosowane do danego zadania pomiarowego lub do specyfiki ocenianego elementu,
- uzyskanie stosunkowo dużej dokładności i niezawodności pomiarów,
- dokonanie oceny w relatywnie krótkim czasie,
- możliwość przeprowadzenia pomiaru wielu parametrów w jednym przejściu,
- dokładne lokalizowanie defektów w pojedynczym elemencie lub partii elementów,
- zmniejszenie lub całkowite wyeliminowanie wadliwych elementów (braków).

### 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

#### 3.1. CEL I ZAKRES BADAŃ

Głównym celem pracy było przeanalizowanie możliwości zastosowania metod wizyjnych do pomiarów rozpraszania światła na powierzchniach szlifowanych. Dodatkowym celem było określenie przydatności systemu zautomatyzowanej inspekcji wizyjnej wykorzystywanego w prowadzonych badaniach. Zakres prac obejmował wytypowanie i przygotowanie próbek, zestawienie stanowiska badawczego, przeprowadzenie serii badań wstępnych i właściwych oraz analizę uzyskanych rezultatów.

#### 3.2. CHARAKTERYSTYKA PRÓBEK

Do badań przeznaczono zestaw próbek walcowych, w postaci porównawczych wzorców chropowatości firmy Massi (Niemcy). Wzorce o powierzchni szlifowanej wykonane zostały z stali EN C45. W zestawie znajdowało się 5 próbek. W celu określenia zgodności parametrów chropowatości powierzchni próbek podanych przez producenta dokonano ich pomiarów profilometrem stykowym Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke (Niemcy). Urządzenie wyposażone było w czujnik indukcyjny TKU 100/17 z ostrzem odwzorowującym o kącie wierzchołkowym stożka  $90^\circ$  i promieniu zaokrąglenia wierzchołka stożka  $5 \mu\text{m}$ . W Tabelicy 1 zestawiono najważniejsze parametry wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych próbek.

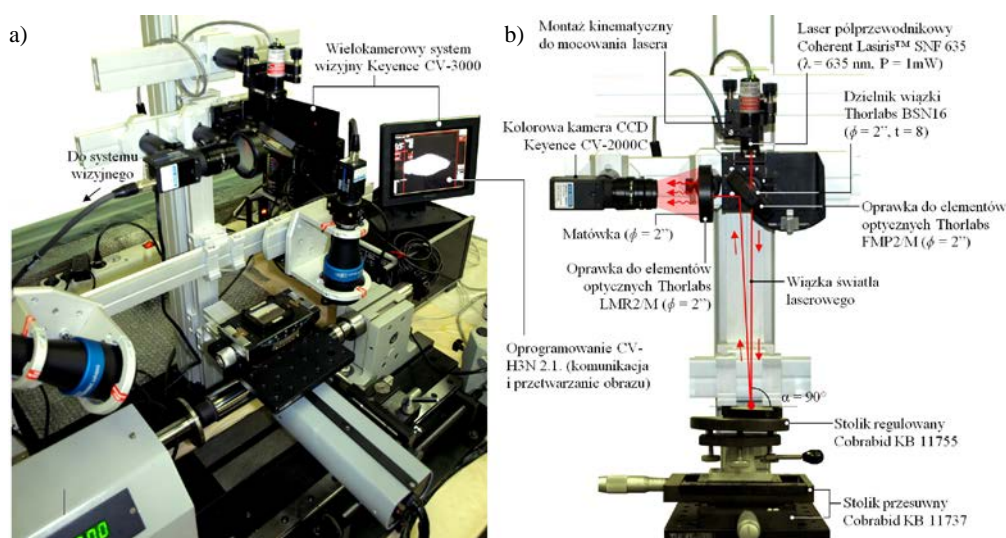
Tabelica 1. Charakterystyka próbek wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych

Narzędzie ściernie	Prędkość obwodowa ściernicy	Prędkość obwodowa przedmiotu	Posuw promieniowy stołu	Głębokość szlifowania	Wartości parametrów chropowatości powierzchni			
					Podane przez producenta		Wyznaczone profilometrem*	
	$v_s$ , m/s	$v_w$ , m/s	$f_r$ , m/min	$a_e$ , mm	$Rz$ , $\mu\text{m}$	$Ra$ , $\mu\text{m}$	$Rz$ , $\mu\text{m}$	$Ra$ , $\mu\text{m}$
Ściernica TGL 8480								
500×80×203 EK 32 K	21	13	0,7	0,0025	0,8	0,1	0,82	0,07
200×20×76 EK 20 M	32	17	1,2	0,005	1,6	0,22	1,3	0,18
200×20×76 EK 32 K	32	17	1,7	0,01	3,2	0,4	2,6	0,37
200×20×76 NK 40 K	32	17	2,5	0,01	6,3	0,65	4,87	0,65
200×20×76 NK 50 K	32	31	5,2	0,02	10	1,4	14,5	1,98
200×20×76 NK 50 K	32	31	6,5	0,02	20	3,8	24,8	3,71

\* Wartość uśredniona z 10 pomiarów

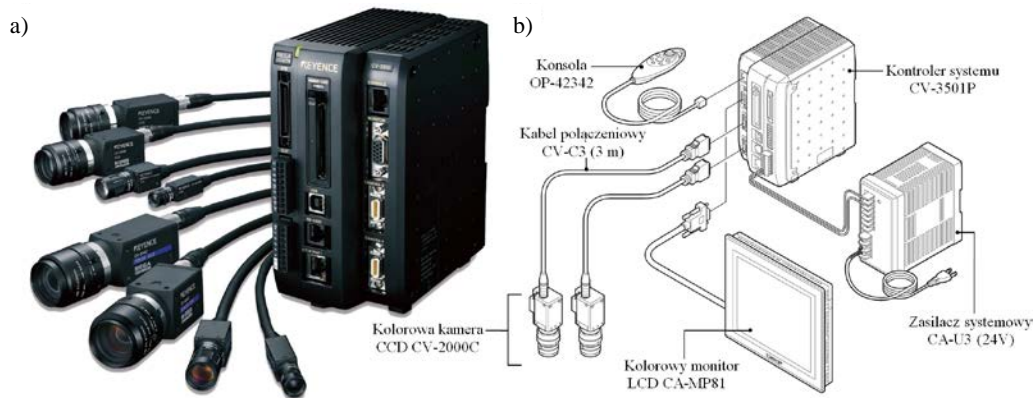
### 3.3. CHARAKTERYSTYKA STANOWISKA BADAWCZEGO

W prowadzonych badaniach eksperymentalnych wykorzystano stanowisko badawcze do aktywnej kontroli struktury geometrycznej precyzyjnie obrobionych powierzchni walcowych. Umożliwiało ono ocenę nierówności powierzchni metodą różniczkową, na podstawie pomiarów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego oraz analizę kształtu powierzchni metodą światła strukturalnego, wykorzystującą projekcję wzorów optycznych. Tor optyczny przeznaczony do oceny chropowatości powierzchni wyposażony był w laser półprzewodnikowy Lasiris™ SNF 635 firmy Coherent (USA), wysokiej rozdzielczości kamerę CCD CV-200C firmy Keyence (Japonia) oraz zestaw elementów optycznych firmy Thorlabs (USA). Widok ogólny stanowiska oraz toru optycznego do oceny chropowatości powierzchni przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Stanowisko badawcze do aktywnej kontroli struktury geometrycznej precyzyjnie obrobionych powierzchni walcowych: a) widok ogólny stanowiska, b) widok toru optycznego przeznaczony do oceny chropowatości powierzchni (w stanie statycznym)

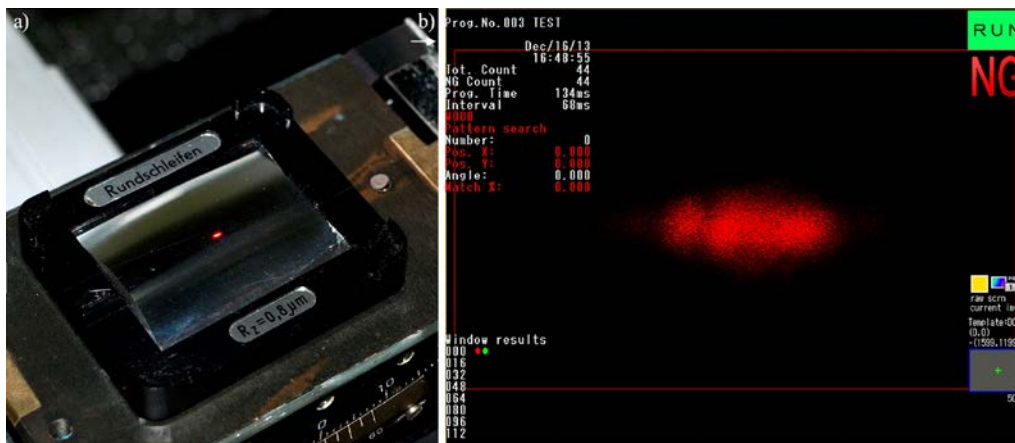
Obraz kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego przesyłany był do wielokamerowego systemu wizyjnego serii CV-3000 firmy Keyence (Japonia). Wykorzystywał on szybką 3-procesorową architekturę, pozwalającą na rejestrację obrazów w stosunkowo krótkim czasie  $t=59 \text{ ms}$  (dla rozdzielczości  $1600 \times 1200$  pikseli). Obraz był automatycznie przetwarzany i analizowany z wykorzystaniem programu pomiarowego opracowanego w oprogramowaniu CV-H3N 2.1. Wewnętrzna pamięć kontrolera pozwalała na zapisanie do 1000 danych obrazowych, co odpowiadało dość intensywnemu cyklowi pomiarów. Na rysunku 2 przedstawiono ogólny widok systemu wizyjnego serii CV-3000 firmy Keyence, wykorzystanego w badaniach.



Rys. 2. Wielokamerowy system wizyjny serii CV-3000 firmy Keyence: a) widok ogólny kontrolera i dostępnych dla tego systemu typów kamer cyfrowych CCD, b) schemat systemu w konfiguracji wykorzystywanej w badaniach eksperymentalnych

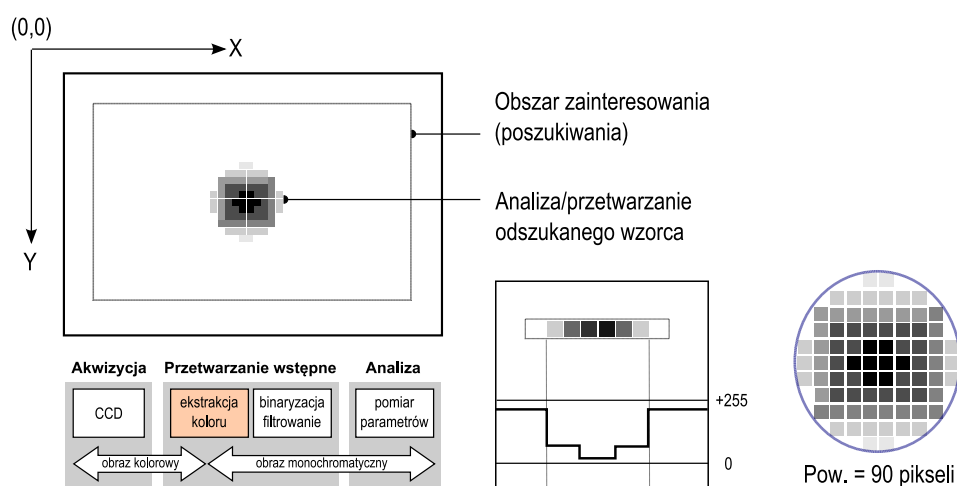
### 3.4. WYBRANIE WYNIKI BADAŃ

W celu oceny wybranych parametrów chropowatości, powierzchnie wzorców oświetlano wiązką laserową o długości fali  $\lambda=635$  nm. Po odbiciu od powierzchni wiązka kierowana była dzielnikiem do detektora CCD kamery CV-200C. Rejestrowany obraz światła rozproszonego poddany był automatycznej akwizycji oraz analizie z użyciem opracowanego programu pomiarowego. Na rysunku 3 przedstawiono próbkę oświetloną światłem laserowym, tworzącym plamkę ( $\phi=1$  mm) oraz zrzut ekranu z widocznym obrazem światła rozproszonego i wyznaczonymi parametrami.



Rys. 3. Pomiary rozpraszania światła na powierzchniach wzorców chropowatości: a) oceniany wzorec z widoczną plamką światła laserowego ( $\lambda=635$  nm,  $\phi=1$  mm) b) przykładowy zrzut ekranu z programu pomiarowego z widocznym obrazem światła rozproszonego i wyznaczonymi parametrami

Każdy punkt zarejestrowanego obrazu (piksel), w wyznaczonym obszarze zainteresowania, został charakteryzowany przez atrybut związany z wartością natężenia światła  $I$ . W wyniku przetwarzania wstępnego, polegającego na binaryzacji i filtracji, uzyskano możliwość obliczenia pola powierzchni światła rozproszonego  $A_n$ . Schemat przedstawiający sposób przetwarzania i analizy obrazu, w celu wyznaczenia jego podstawowych parametrów został przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat przedstawiający sposób przetwarzania i analizy obrazu w celu określenia jego podstawowych parametrów (pola powierzchni i intensywności światła rozproszonego na powierzchni przedmiotu badanego)

Wyniki pomiarów uzyskane dla powierzchni wzorcowych zestawiono w Tabelicy 2.

Tabelica 2. Wyniki pomiarów dla próbek wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych

Zakres wartości parametrów światła rozproszonego				Średnie wartości parametrów SGP (pomiar profilometrem stykowym, 10 powtórzeń)	
Pole powierzchni $A_n$ , piksele		Natężenie światła $I$ , j.u.			
max.	min.	max.	min.	$Rz$ , $\mu\text{m}$	$Ra$ , $\mu\text{m}$
271000	265000	113	109	0,82	0,07
214000	205000	90	87	1,35	0,18
162000	158000	71	68	2,60	0,37
120000	110000	58	55	4,87	0,65
44000	38000	29	26	14,55	1,98
28000	24000	24	21	24,86	3,70

Ze względu na charakter metody pomiarowej (pomiar optyczny w świetle widzialnym), rejestrowane wartości ulegały ciągłym wahaniom. Dla każdego rejestrowanego punktu wyznaczono zakres uzyskiwanych wartości. Rozkład punktów z badań doświadczalnych zdeteminował dobór modeli. Dane te pozwoliły ustalić, że pomiędzy natężeniem światła  $I$  oraz polem powierzchni obrazu światła rozproszonego  $A_n$  a parametrami chropowatości zachodzą zależności allometryczne.

Dokonując aproksymacji danych doświadczalnych szeregiem różnych zależności, oszacowywano wartości współczynników równań regresyjnych oraz weryfikujące parametry statystyczne. Spośród wielu możliwych do zastosowania funkcji nieliniowych, mogących charakteryzować zjawiska nierównomiernego wzrostu zmiennej zależnej od czynnika niezależnego, na podstawie analiz wybrano nieliniowe funkcje jednowymiarowe (dwuparametryczną funkcję wykładniczą, trójparametryczną funkcję eksponentialną) oraz pięcioparametryczną funkcję powierzchniową.

W celu weryfikacji hipotezy zerowej  $H_0$  o nieistotności estymowanej regresji, wyznaczono wartość skorygowanego współczynnika determinacji  $R^2_{skor.}$  oraz dokonano oszacowania statystyki testowej  $t$  dla każdego parametru. Standardowym sposobem znalezienia najlepszego dopasowania modelu jest oszacowanie wartości parametrów, które najlepiej opisują dane, w tym minimalizują reszty, tj. odchylenia krzywej teoretycznej od punktów doświadczalnych. W tym celu ustalono, czy statystyka  $F$  ma rozkład F-Snedecora oraz zastosowano test Pearsona. We wszystkich podjętych analizach przyjęto poziom istotności równy  $\alpha=0,05$ . Wyniki przykładowych obliczeń zestawiono w Tablicy 3.

Tablica 3. Model i parametry statystyczne dwuparametrycznej funkcji wykładniczej z polem powierzchni  $A_n$  jako predyktorem zmiennej zależnej  $Ra$

$Ra = a \cdot b^{\text{powierzchnia}}$	Współczynniki modelu	Statystyka $t$ (rozkład t-Studenta)		
		$t_{\alpha/2, n-2}$	$t$	$p >  t $
$n = 12$	$a$	2,228	7,29378	2,6203E-5
$\alpha = 0,05$	$b$		249729,51525	0
Podsumowanie regresji		Statystyka $F$ (rozkład F-Snedecora)		
$R^2_{skor.}$	$\chi^2_{red.}$	$F_{\alpha, 1, n-2}$	$F$	$p > F$
0,95183	0,08924	4,96461	199,70576	6,1924E-8

Wszystkie badane modele charakteryzowały się wysoką wartością ( $> 0,95$ ) współczynnika korelacji wielorakiej, co świadczy o dobrym dopasowaniu równań regresji do danych doświadczalnych. Z otrzymanych wartości statystyki  $F$  (znajdujących się w obszarze krytycznym wyznaczonym przez rozkład F-Snedecora), wartości prawdopodobieństwa  $p$  zaistnienia hipotezy zerowej oraz testu  $\chi^2$ , można wywnioskować, że we wszystkich przypadkach uzyskano równania istotne statystycznie. Oznacza to, że zaproponowane równania regresji mogą być

wykorzystane do prognozowania zmiennych zależnych  $Ra$  i  $Rz$ .

Ostatecznie, na podstawie wyników analiz statystycznych istotności funkcji regresyjnych i ich parametrów, można wskazać na dobór modeli przeznaczonych do predykcji wartości parametrów chropowatości, co przedstawiono w Tabelicy 4.

Tabelica 4. Modele i parametry statystyczne funkcji regresji

Postać modelu ( $x$ – powierzchnia, $y$ – intensywność)	$R^2_{skor.}$	$\chi^2_{red.}$	$F$
$Ra = ab^x$	0,9518	0,0892	199,7057
$Rz = e^{(a+bx+cx^2)}$	0,9756	2,0421	278,7061

$Rz = z_0 + Bx^C + Dy^E + Fx^C y^E$	0,9764	1,975	144,6365
$Ra = z_0 + Bx^C + Dy^E + Fx^C y^E$	0,9681	0,059	102,1129

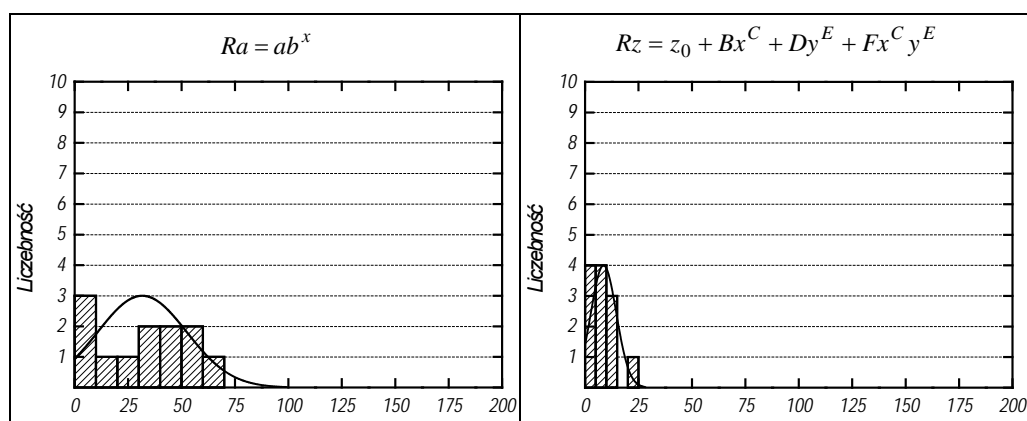
  

--	--

### 3.5. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA MODELI

Zaprezentowane modele teoretyczne pozwalają określić najlepszą predykcję zmiennej zależnej przy danych zmiennych niezależnych, jednakże charakteryzują się także licznymi odchyleniami punktów pomiarowych od linii regresji. Z tego powodu, analizie poddano wartości resztkowe. Dla każdego modelu dokonano analizy statystycznej odchylenia zmiennej zależnej od danych rzeczywistych. Zobrazowaniem wyników weryfikacji statystyczno-doświadczalnej dokładności predykcji dla analizowanych funkcji regresji są poniższe histogramy przedstawione w Tabelicy 5.

Tabelica 5. Histogram rozkładu błędów predykcji z podziałem na przedziały klasowe i ich liczebność w przypadku optymalnych modeli regresji



Najkorzystniejszy rozkład błędów prognozy, wykazany statystycznie dla funkcji wykładniczej i powierzchniowej, charakteryzuje się największą odchyłką od rozkładu symetrycznego w kierunku lewostronnej asymetrii oraz spłaszczeniem rozkładu w przypadku występowania większego rozstępu wartości błędów.

### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzony, szeroki program badawczy, pozwolił opracować statystycznie istotne modele, które w postaci programu pomiarowego opracowanego w oprogramowaniu CV-H3N 2.1, umożliwiają ilościową ocenę SGP, określonej parametrami  $Rz$  (w zakresie od 0,8 do 25  $\mu\text{m}$ ) oraz  $Ra$  (w zakresie od 0,07 do 3,7  $\mu\text{m}$ ).

Autorzy przewidują, iż kierunki dalszych prac nad optyczną oceną jakości powierzchni związane będą m.in. z rozszerzeniem zakresu analizowanych powierzchni o te uzyskane z wykorzystaniem innych konwencjonalnych i niekonwencjonalnych technik obróbkowych oraz z udoskonaleniem algorytmów oceny jakości powierzchni za pomocą nieliniowych modeli predykcyjnych.

Dodatkowo, w celu wyeliminowania niedogodności związanych z pomiarem



natężenia światła w widmie widzialnym, Autorzy podejmą prace w celu przeanalizowania możliwości zastosowania w przedstawionym stanowisku badawczym, bardziej korzystnego oświetlenia wykorzystującego promieniowanie podczerwone.

#### PODZIĘKOWANIA

*Część prac przedstawionych w tym artykule została wykonana w ramach projektu badawczego finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.*

#### LITERATURA

- [1] BENNETT H. E., PORTEUS J. O., *Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence*. W: Journal of the Optical Society of America, Vol. 51, No. 2, 123-129, 1961.
- [2] DAVIES E. R., *Computer and machine vision: Theory, algorithms, practicalities*. Academic Press, Waltham, 2012.
- [3] HORNBERG A. (Ed.), *Handbook of machine vision*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2006.
- [4] JOHNSON C. S., GABRIEL D. A., *Laser Light Scattering*. Dover Publications Inc., New York, 1995.
- [5] KAPŁONEK W., ŁUKIANOWICZ Cz., NADOLNY K., *Methodology of the assessment of the abrasive tool's active surface using laser scatterometry*. W: Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol. 36, No. 1, 2012, 49-66.
- [6] LEACH R. (Ed.), *Optical measurement of surface topography*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2011.
- [7] LEACH R. (Ed.), *Characterisation of areal surface texture*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2013.
- [8] LU R-S., TIAN G. Y., *On-line measurement of surface roughness by laser light scattering*. W: Measurement Science and Technology, Vol. 17, No. 6, 2006, 1496-1502, doi: 10.1088/0957-0233/17/6/030.
- [9] ŁUKIANOWICZ Cz., *Podstawy pomiarów nierówności powierzchni metodami rozpraszania światła*. Wydawnictwo Uczelnia Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2001.
- [10] MARADUDIN A. A. (Ed.), *Light Scattering and Nanoscale Surface Roughness*. Science+ Business Media, LLC., New York, 2007.
- [11] MAZULE L., LIUKAITYTE S., ECKARDT R. C., MELNINKAITIS A., BALACHNINAITE O., SIRUTKAITIS V., *A system for measuring surface roughness by total integrated scattering*. W: Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 44, No. 50, 2012, 505103, doi:10.1088/0022-3727/44/50/505103.
- [12] SYNAK R., *Analysis and optimization of a total integrating scatter measuring unit based on a photodiode integrator*. W: Optical Engineering, Vol. 51, No. 11, 2012, 113601, doi: 10.1117/1.OE.51.11.113601.
- [13] VALLIANT J. G., FOLEY M. P., BENNETT J. M., *Instrument for on-line monitoring of surface roughness of machined surfaces*. W: Optical Engineering, Vol. 39, No. 12, 2000, 3247-3254, doi: 10.1117/1.1318786.
- [14] WANG S. H., TAY C. J., QUAN C., SHANG H. M., ZHOU Z. F., *Laser integrated measurement of surface roughness and micro-displacement*. W: Measurement Science and Technology, Vol. 11, No. 5, 2000, 454-458, doi: 10.1088/0957-0233/11/5/302.

# KONCEPCJA ZASTOSOWANIA METODY PORÓWNYWANIA PARAMI WYKORZYSTUJĄCEJ WAŻONĄ RELACJĘ PRZEWYŻSZANIA DO PORÓWNIANIA ZARYSÓW OKRĄGŁOŚCI

Stanisław ADAMCZAK<sup>1</sup>, Urszula KMIECIK-SOŁTYSIAK<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

We współczesnych technikach wytwarzania pomiar i ocena struktury geometrycznej powierzchni mają istotne znaczenie. Już pod koniec XIX zaistniała konieczność pomiarów odchyłek kształtu przedmiotów o powierzchniach walcowych. Aktualnie oczywistym jest, że odchyłki kształtu mogą powodować powstawanie drgań i szumów części maszyn.

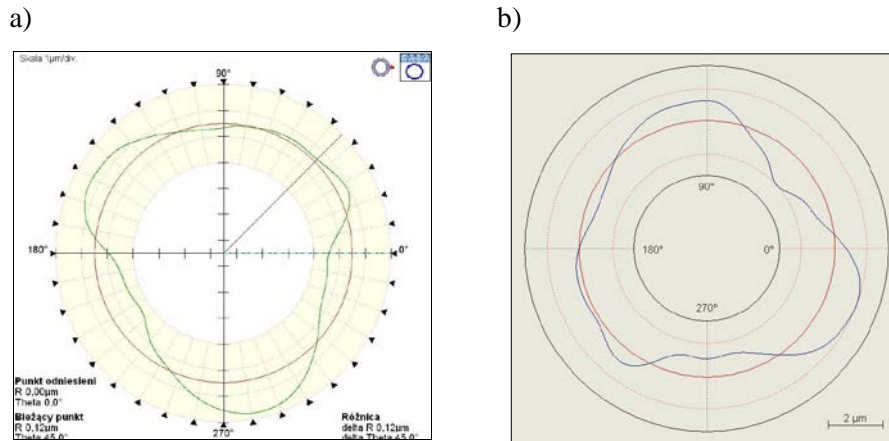
W praktyce przemysłowej wyróżniamy dwie stosowane grupy metody pomiaru okrągłości: metoda zmian promienia - bezodniesieniowa i metoda odniesieniowa. Metoda pomiaru zmian promienia daje większą dokładność dlatego jest najczęściej używana w warunkach laboratoryjnych. Jednak jedną z podstawowych ich wad jest brak możliwości pomiaru bezpośrednio na obrabiarce bądź na produkcyjnym stanowisku kontrolnym [1,2].

Aparatura do pomiarów zarysów okrągłości umożliwia przekształcenie nierówności profilu na sygnał elektryczny. Wzmocniony sygnał może zostać przekształcony z postaci analogowej na cyfrową a następnie może zostać zapisany w postaci wykresu we współrzędnych prostokątnych bądź biegunowych (rys. 1). Zarejestrowany zarys jest fundamentem do oceny stanu struktury geometrycznej powierzchni za pomocą wartości liczbowej zdefiniowanych parametrów. Graficzne przedstawienie zarysów umożliwia ich wizualną ocenę, która jest w niektórych przypadkach niezbędna do jakościowej analizy. Jednak porównanie wizualne ma wyłącznie charakter przybliżony, nie pozwala ono jednoznacznie określić ilościowej

---

<sup>1</sup> Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Politechnika Świętokrzyska, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

zgodności otrzymanych zarysów powierzchni [3,4].



Rys.1. Przykładowy wykres zarysu okrągłości we współrzędnych biegunowych, otrzymany a) w wyniku pomiaru metodą bezodniesieniową traktowaną jako wzorcową, b) w wyniku pomiaru sprawdzanego przyrządu za pomocą głowicy MUK metodą odniesieniową.

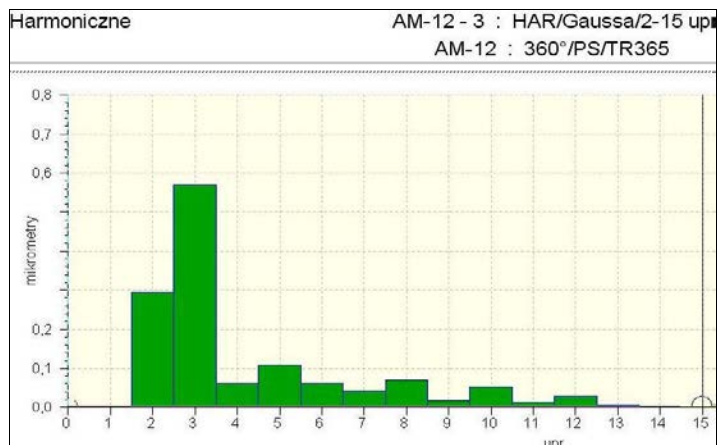
## 2. KONCEPCJA STATYSTYCZNEGO PORÓWNYWANIA PRZYRZĄDÓW POMIAROWYCH

Stosowane są obecnie koncepcje statystycznego porównania zarysów powierzchni uzyskiwanych na dwóch różnych przyrządach pomiarowych. Metody te polegają na badaniu korelacji pomiędzy poszczególnymi zbiorami za pomocą parametrów:

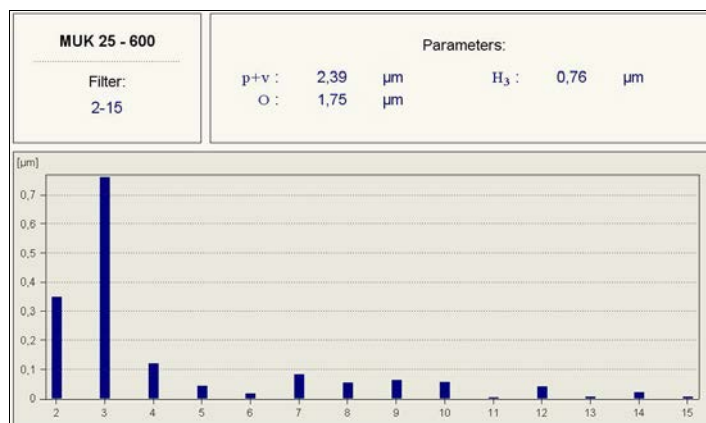
- a) współczynnika korelacji Pearsona i Spearmana,
- b) funkcji korelacji wzajemnej,
- c) eksperymentalnego błędu metody [5].

Analiza harmoniczna zarysów okrągłości otrzymanych przez zastosowanie do pomiarów zarysów okrągłości metody odniesieniowej, jak i przez wykonanie pomiarów metodą bezodniesieniową, może być zastosowana dla każdego elementu z poszczególnych próbek (rys. 2). Jeśli przeprowadzona zostanie analiza harmoniczna otrzymanych zarysów, uzyskujemy parametry rozwinięcia w trygonometryczny szereg Fouriera tj. współczynniki  $A_n$  i  $B_n$  poszczególnej harmonicznej zarysu okrągłości, amplitudę  $C_n$  każdej harmonicznej oraz przesunięcie fazowe  $\varphi_n$  w przypadku każdej analizowanej próbki zarysu okrągłości w zakresie  $n \in \langle 2,15 \rangle$  harmonicznych.

a)



b)



Rys.2. Przykładowe dyskretne widmo zarysu okrągłości otrzymanego a) w wyniku pomiaru metodą bezodniesieniową traktowaną jako wzorcową, b) otrzymanego w wyniku pomiaru sprawdzanego przyrządu za pomocą głowicy MUK metodą odniesieniową.

Estymacja współczynników dla liniowej korelacji Pearsona i rangowej korelacji Spearmana między parametrami zarysów, wyznaczenie funkcji korelacji wzajemnej oraz obliczenie eksperymentalnego błędu metody dają możliwość ustalenia rodzaju korelacji oraz stopnia zbieżności pomiędzy analizowanymi parametrami. Obliczone parametry mogą pomóc w ustaleniu rodzaju korelacji oraz stopnia zbieżności pomiędzy parametrami o dwuwymiarowym rozkładzie. Ustalony rodzaj korelacji i stopień zgodności są wykorzystywane do porównywania przyrządów lub metod pomiarowych.

### 3. ISTOTA METODY PORÓWNYWANIA PARAMI WYKORZYSTUJĄCEJ WAŻONĄ RELACJĘ PRZEWYŻSZANIA DO PORÓWNIANIA ZARYSÓW OKRĄGŁOŚCI

Metoda porównywania parami posiada bardzo długą historię sięgającą XIX w. Została stworzona przez psychologa Titchener (1901) do sugestywnych, personalnych ocen wartości sparowanych jednostek. Zestawienia dokonuje się w danym kryterium poprzez porównanie wszystkich jednostek według zasady każdy z każdym, zatem otrzymuje się w grupie liczącej  $t$  jednostek,  $(t-1)/2$  par. Metodę tę wykorzystał Saaty w hierarchicznym procesie analizy decyzyjnej AHP (ang. Analytic Hierarchy Process, Saaty 1980). Uszeregowanie w procesie decyzyjnym AHP dokonuje się metodą porównywania parami [6,7].

Istota porównywania parami polega na porównaniu poszczególnych wariantów ze sobą i przyporządkowaniu każdej parze wartości - liczby z wcześniej zdefiniowanej skali. W 2013r. Komitet Ewaluacji Jednostek Naukowych (KEJN) przeprowadził kompleksową ocenę jednostek naukowych. Algorytm obliczania ostatecznej oceny jednostki naukowej został przeprowadzony metodą porównań parami wykorzystującej ważoną relację przewyższania [8].

Metodę porównywania parami wykorzystującą ważoną relację przewyższania można zastosować do porównania zarysów okrągłości otrzymanymi przez pomiar metodami odniesieniowymi (kilku z kombinacją kątów  $\alpha$  i  $\beta$ ) z zarysami okrągłości uzyskanymi z pomiaru metodą bezodniesieniową, przyjętą jako wzorcową. Ogólna dostępność programów komputerowych zapewnia przy metodzie odniesieniowej dokonanie transformacji zarysu zmierzonego  $F(\varphi)$  na przekształcony zarys rzeczywisty  $R(\varphi)$ . Możliwa jest analiza harmoniczna otrzymanego zarysu rzeczywistego oraz przedstawienie dyskretnego widma zarysu okrągłości. Konieczne jest wyznaczenie składowych wyrazów  $A_n$  i  $B_n$  poszczególnej harmonicznej zarysu rzeczywistego  $R(\varphi)$  okrągłości, amplitudy  $C_n$  każdej harmonicznej oraz przesunięcia fazowego  $\varphi_n$ .

Niezbędnym będzie dokonanie pomiarów próbek elementów, następnie przeprowadzenie analizy harmonicznej otrzymywanych zarysów. W każdym zmierzonym zarysie będzie można wyróżnić grupy wspólnej oceny: zbiór współczynników  $A_n$  i  $B_n$ , zbiór wartości amplitud  $C_n$  każdej harmonicznej, zbiór przesunięć fazowych. Analizując zbiór wartości amplitud przyjmujemy, iż w każdej grupie wspólnej oceny możemy zastosować kryteria: 14 wartości amplitud każdej harmonicznej, dlatego że zarys okrągłości analizujemy w zakresie  $n \in \langle 2, 15 \rangle$  harmonicznych. Zatem każda harmoniczna  $H_n$  będzie osobnym kryterium oceny.

We wszystkich kryteriach każda wartość amplitudy poszczególnego zarysu będzie najpierw porównywana z wartością amplitudy referencyjnej (pomiarem wzorcowym uzyskanym przez metodę bezodniesieniową), po czym nastąpi porównywanie parami

każdej wartości amplitudy zarysu otrzymanego metodami odniesieniowymi. Porównanie jednostek (wartości amplitudy) z jednostką referencyjną może zostać przeprowadzone poprzez obliczenie błędu względnego (1) każdego pomiaru, konieczne jest przeprowadzenie badań w tym zakresie.

$$\delta = \frac{|x_i - x_0|}{x_0} 100\% \quad (1)$$

Gdzie:  $\delta$  – błąd względy pomiaru dla porównywanych zarysów,  $x_i$  - parametr oceny dla badanego przyrządu (wartość amplitudy harmonicznej),  $x_0$  - parametr wyznaczony dla przyrządu wzorcowego.

Po porównaniu każdej jednostki z opowiadającą mu jednostką wzorcową uzyskujemy błędy względne poszczególnych wartości harmonicznych dla każdej z metod. Porównywanie parami w każdym kryterium będzie odbywać się według zasady zestawienia „każdy z każdym” poprzez różnicę błędów względnych każdej z par. Parowanie  $P_i(A,B)$ :

$$P_i(A,B) \text{ wyznaczamy poprzez } \Delta O_{i(A,B)} = |\delta_A - \delta_B| \quad (2)$$

Gdzie:  $\delta_A, \delta_B$  – błędy względne pomiarów otrzymanych metodą A i B dla porównywanych zarysów.

Ponieważ różnica wartości w danej parze może być nieznaczną, definiujemy próg nierozróżnialności oznaczony  $D_i = 5\%$ . Wprowadzamy próg pełnego przewyższania  $G_i = 15\%$ , uznany jako przewaga całkowita. W przypadku pośrednim (pomiędzy progiem nierozróżnialności a pełnym progiem przewyższania) wynik porównania uzyskuje liczbę punktów pomiędzy 0 a 1. Jeżeli:

$$\Delta O_{i(A,B)} \leq D_i \text{ to } P_i(A,B) = 0 \quad (3)$$

Porównaniu temu przypisujemy wartość 0, oznacza to niewielką, nieistotną różnicę pomiędzy porównywanymi jednostkami. Natomiast jeśli:

$$\Delta O_{i(A,B)} \geq G_i \text{ to } P_i(A,B) = 1 \quad (4)$$

Zestawieniu temu przypisujemy wartość 1, oznacza to, że rozpatrywana różnica jest istotna, znaczna. Gdy:

$$G_i > \Delta O_{i(A,B)} > D_i \text{ to } P_i(A,B) = \frac{(\Delta O_{i(A,B)} - D_i)}{(G_i - D_i)} \quad (5)$$

W przypadku tym różnica jest większa od progu nierozróżnialności  $D_i$  oraz jednocześnie mniejsza od progu przewyższania  $G_i$ . Zestawieniu należy przypisać wartość od 0 do 1 według zależności (5). Na etapie tym nie możemy zweryfikować

poprawności dobrania progu przewyższania oraz progu nierozróżnialności, konieczne są badania oraz analiza próbek. Następnie koniecznym jest zastosowanie wag w każdym kryterium, tj. jeśli kryterium jest wartość amplitud harmoniczných, to niezbędnym jest ustalenie wag dla każdej z 14 harmoniczných. Wagi te należy odpowiednio ustalić kierując się wynikami pomiarów uzyskanymi poprzez pomiar przyrządem wzorcowym przez uwzględnienie harmonicznej dominującej w zarysie okrągłości.

#### 4. WNIOSKI

Metoda porównywania parami z wykorzystaniem ważonej relacji przewyższania jest nową koncepcją możliwości porównywania zarysów okrągłości. System ten, dzięki swojej metodyce daje możliwość porównywania zarysów okrągłości uzyskanych poprzez pomiar metodą odniesieniową do zarysu uzyskanego pomiarem metodą bezodniesieniową. Ponadto, istnieje sposobność porównania zarysów odniesieniowych między sobą. Metoda ta cechuje się odpowiednią procedurą, konieczne początkowo jest dokonanie analizy harmonicznej otrzymanych zarysów okrągłości. Za istotne uznaje się zastosowanie procedury porównywania parami również dla przesunięcia fazowego  $\varphi_n$ , dla składowych wyrazów  $A_n$  i  $B_n$  poszczególnej harmonicznej. Zasadnicze wydają się tutaj prace badawcze w celu zweryfikowania metody oraz dokonania analizy wyników otrzymanych metodą porównywania parami z wykorzystaniem ważonej relacji przewyższania dla zarysów okrągłości.

#### LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., *Odniesieniowe metody pomiaru zarysów okrągłości części maszyn*. Kielce, wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 1998.
- [2] ADAMCZAK S., *Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość*. Warszawa, WNT, 2008.
- [3] STĘPIEŃ K., *Research on influence of angular method parameters on the result of the V-block cylindricity measurement*. *Strojartvo-Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering*, 2012
- [4] JANECKI D., *Gaussian filters with profile extrapolation*. *Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*; 2011, No 35, pp. 602– 606
- [5] ADAMCZAK S., MAKIEŁA W., *Koncepcja statystycznego porównywania przyrządów pomiarowych*. W: *Symposium Klubu POLSKIE FORUM ISO 9000*, Kielce-ameliówka, 2003, 201-212.
- [6] GREŃ J., *Statystyka Matematyczna. Modele i Zadania*. Warszawa ,PWN, 1978.
- [7] Brown T.C., Peterson G.L., *An Enquiry Into the Method of Paired Comparison: Reliability, Scaling, and Thurstone's Law of Comparative Judgment*. General Technical Report, 2009.
- [8] *Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w sprawie kryteriów i trybu przyznawania kategorii naukowej jednostkom naukowym* (2012r. Dz. U. poz. 877 i 2013 r. poz. 191), załącznik nr 8.

# WPLYW ODCHYLEKI KSZTAŁTU NA WYNIKI POMIARÓW ELEMENTÓW WALCOWYCH

Marek KOWALSKI<sup>1</sup>, Jerzy SŁADEK<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Współczesne systemy pomiarowe do pomiarów kształtu charakteryzują się wysoką dokładnością. Jednakże poziom dokładności wytwarzania w wielu przypadkach bywa wyraźnie niższy od stopnia jakości identyfikacji wymiarowo-kształtowej. W takiej sytuacji wśród czynników kształtujących ocenę dokładności pomiarów ważną rolę zaczyna odgrywać odchyłka kształtu mierzonego zarysu lub powierzchni. Oddziaływanie odchylek kształtu prowadzi do szeregu niekorzystnych uwarunkowań, w tym do problemów z montażem, nierównomiernością zużywania się współpracujących elementów układu, problemami ze zmniejszoną odpornością na wytrzymałość zmęczeniową. Powyższe dotyczy w dużym stopniu połączeń ruchowych typu wałek-otwór. Są to elementy kołowo-symetryczne o dużym stopniu rozpowszechnienia w maszynach i urządzeniach. Oddziaływanie odchylek kształtu wyrobu występuje także w odniesieniu do:

- pozostałych parametrów wymiarowych mierzonego przedmiotu,
- niejednoznaczności przy ocenie odchylek geometrycznych kierunku i położenia,
- ustalania układu współrzędnych związanego z przedmiotem w technice współrzędnościowej,
- identyfikacji baz i układów baz względem których są ustalane wymagania geometryczne.

Zagadnienie wpływu odchylek kształtu na wyniki pomiarów nie zostało w sposób pełny opisane w literaturze. W odniesieniu do zarysów kołowych było co prawda przedmiotem analiz, m.in. [6], ale tylko w wąskim zakresie wpływu takich elementarnych postaci odchylek jak owalność, graniastość nieparzystokątna

---

<sup>1</sup> Politechnika Krakowska, Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, al. Jana Pawła II 37



i parzystokątna. Natomiast w odniesieniu do elementów przestrzennych brakuje istotnych prac poruszających tematykę wpływu odchyłek kształtu na zmienność wyników pomiarów. Prace koncentrowały się w odniesieniu do elementów walcowych na metodach pomiarowych, procesach filtracji danych i elementach odniesienia [1, 2, 3, 4, 5, 8]. Z tych powodów zdecydowano się na podjęcie analiz i badań związanych z oddziaływaniem błędów makrogeometrii przedmiotu na rezultaty identyfikacji wymiarowo-kształtowej.

Celem pracy jest oszacowanie charakteru wpływu wybranych odchyłek kształtu na wyniki pomiarów elementów walcowych obarczonych wybranymi postaciami odchyłek kształtu.

W etapie I prac wykonano próbki elementów walcowych posiadających charakterystyczne odchyłki kształtu. Etap II obejmował realizację pomiarów próbek i ich ocenę.

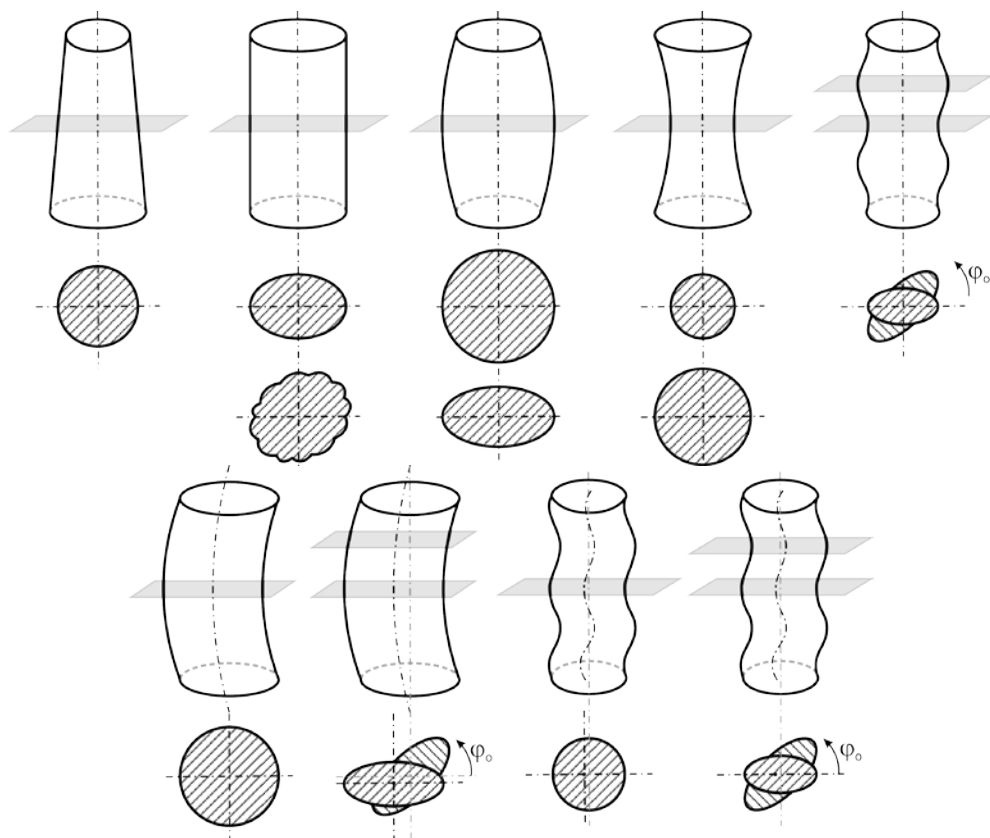
## 2. ANALIZA TEMATU

Dla potrzeb prawidłowości prowadzenia analizy zagadnienia opisu zniekształceń powierzchni walcowych należało w pierwszej kolejności sklasyfikować elementy walcowe o różnych rodzajach odchyłek kształtu. Propozycję takiej klasyfikacji utworzoną pod kątem identyfikacji geometrycznej przedstawiono na rys. 1.



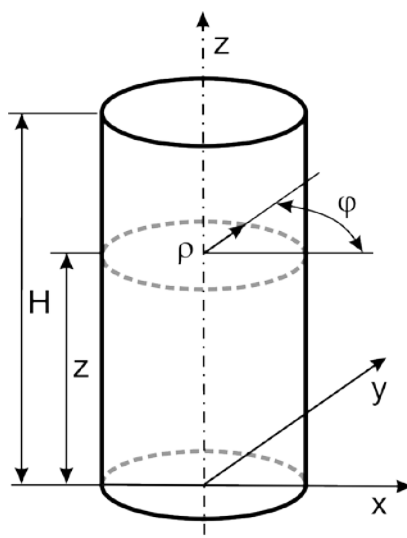
Rys. 1. Klasyfikacja elementów walcowych z odchyłką kształtu

W celu lepszego zilustrowania podanej klasyfikacji pokazano na rys.2 konkretne przykłady zarysów walcowych.



Rys. 2. Przykłady elementów walcowych z odchyłkami kształtu

Analiza pokazanych elementów walcowych o zadanych zniekształceniach prowadzi do wniosku, że koniecznym jest rozwiązanie problemu opisu łącznego oddziaływania błędów kształtu w przekrojach: poprzecznym i wzdłużnym (przechodzącym przez oś walca). Wymaga to opisu matematycznego takich przedmiotów. Specyficzny charakter tych przedmiotów narzuca w pewnym sensie wykorzystanie do tego opisu układu współrzędnych krzywoliniowych w postaci walcowego układu współrzędnych, co pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Element geometryczny w walcowym układzie współrzędnych.

Ze względu na występujące błędy wymiarowe i odchyłki kształtu w przekrojach prostopadłych do osi walca i w przekrojach przechodzących przez oś oraz występującą w niektórych przypadkach nieprostoliniowość osi należy oczekiwać, że wymiar lokalny lub globalny takiego elementu będzie się zmieniał wraz ze zmianą współrzędnej kątowej  $\varphi$  oraz współrzędnej osiowej  $z$ . Charakter procesów obróbkowych powoduje, że zniekształcenia zarysu/powierzchni w przekrojach: poprzecznym i wzdłużnym (osiowym) są od siebie niezależne, zatem można je traktować jako addytywne, co pozwala na skorzystanie z metody superpozycji. W takim przypadku można zapisać, że:

$$r(\varphi) = r_0 + \sum_{k=2}^n a_k \cdot \cos(k\varphi + \varphi_0) + c \left( z - \frac{H}{2} \right) \quad (1)$$

gdzie:

- $\rho$  – promień lokalny,
- $r$  – promień średniokwadratowy,
- $\varphi$  – kąt obrotu współrzędnej,
- $\varphi_0$  – kąt fazy początkowej,
- $z$  – współrzędna  $z$  związana z długością walca,
- $H$  – wysokość walca,
- $c$  – współczynnik określający postać funkcji zmian wzdłuż tworzącej

Osobnym przypadkiem jest sytuacja, gdy oś walca jest wygięta przestrzennie. Szczególnym przypadkiem dość często występującym w praktyce jest wygięcie osi leżące w jednej płaszczyźnie. Stosowne wzory na promień lokalny można znaleźć w pracy [7].

### 3. METODYKA BADAŃ

Pierwszym etapem badań było wytworzenie elementów walcowych z odchyłkami kształtu o postaci: owalności, 3- i 4-graniastości. Do tego celu wykorzystano specjalny przyrząd pokazany na rys. 4. W przyrządzie mocowano pierścień, którego wnętrze wypełniono duracylem. Po zakrzepnięciu masy próbki były wyjmowane z przyrządu i znakowane.

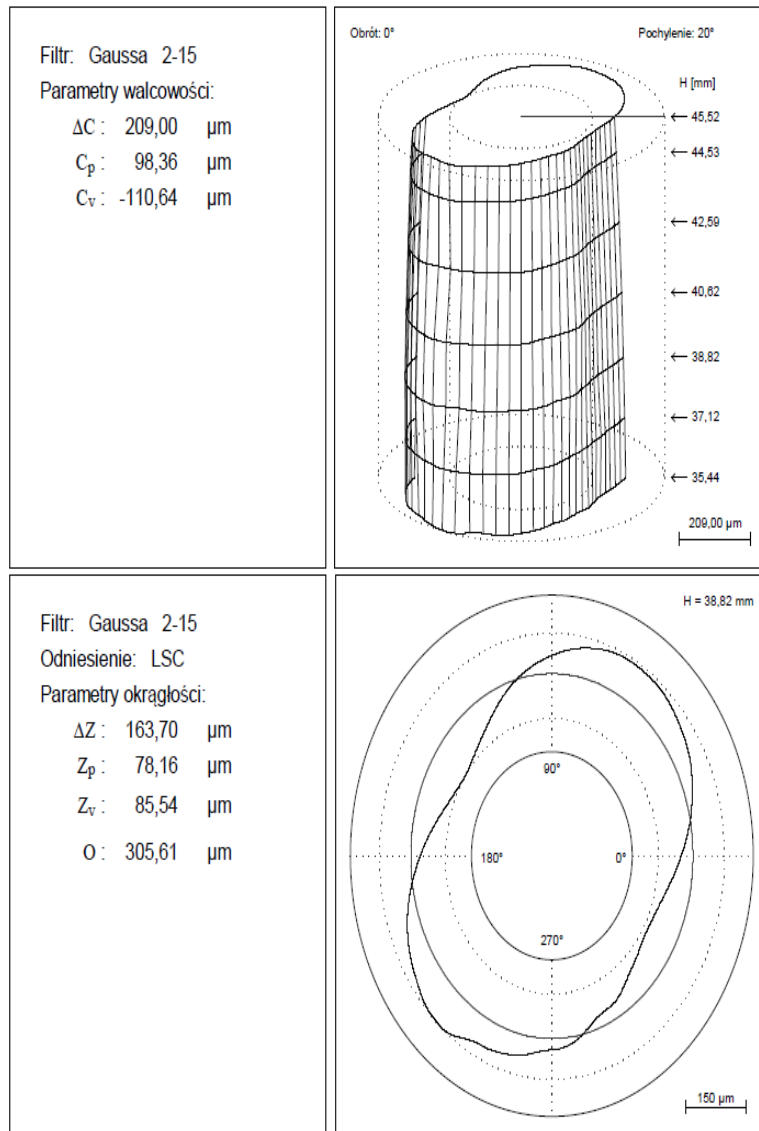


Rys. 4. Widok przyrządu do zadawania odchyłek kształtu

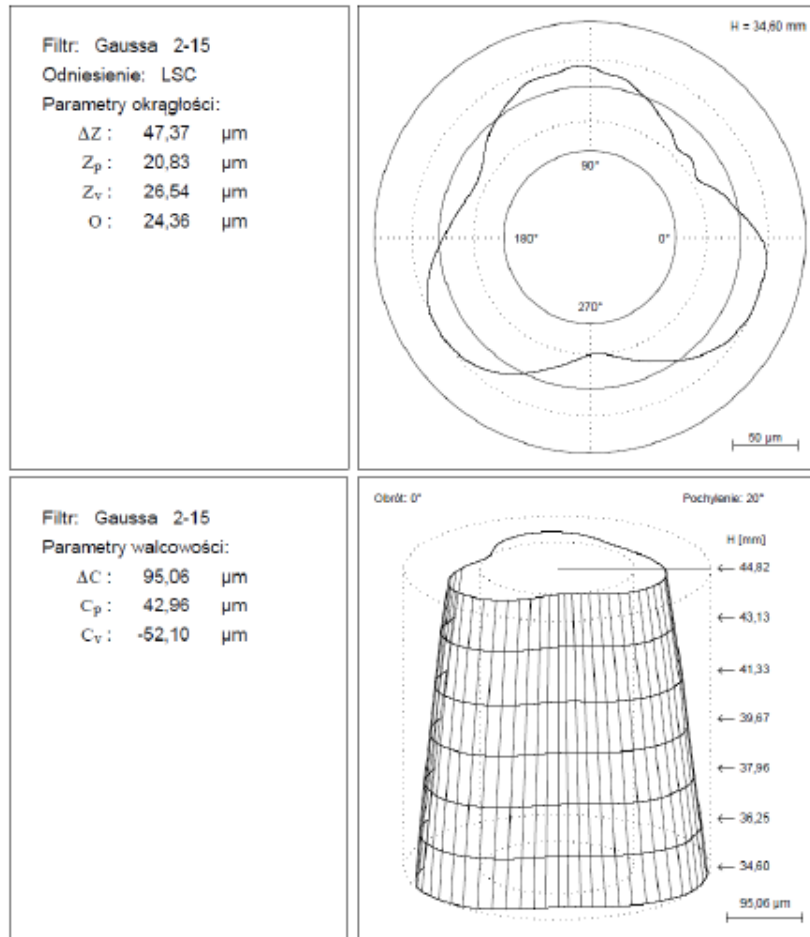
Etap II obejmował pomiary okrągłości w przekrojach poprzecznych oraz walcowości i prostoliniowości osi. Dane z pomiarów były rejestrowane w postaci wykresów łącznie z wartościami zmierzonych parametrów. Do pomiarów wykorzystano urządzenie Talycenta z oprogramowaniem CYFORM. Przed przystąpieniem do pomiarów okrągłościomierz został sprawdzony przy użyciu wzorca walcowego.

#### 4. WYNIKI BADAŃ

Z uwagi na ograniczoną objętość pracy zamieszczone zostały tylko niektóre wyniki pomiarów. Wyniki pomiarów odchyłek walcowości o postaci owalności pokazano na rys. 5 a dla próbki z 3-gnaniastością na rys. 6.

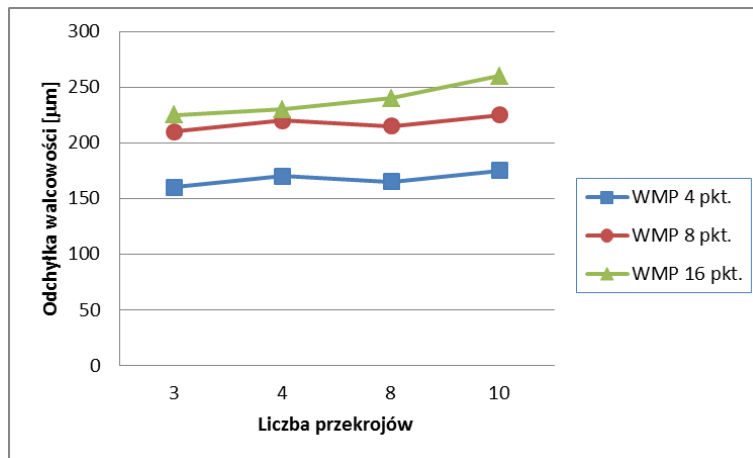


Rys. 5. Pomiar walca z odchyłką owalności

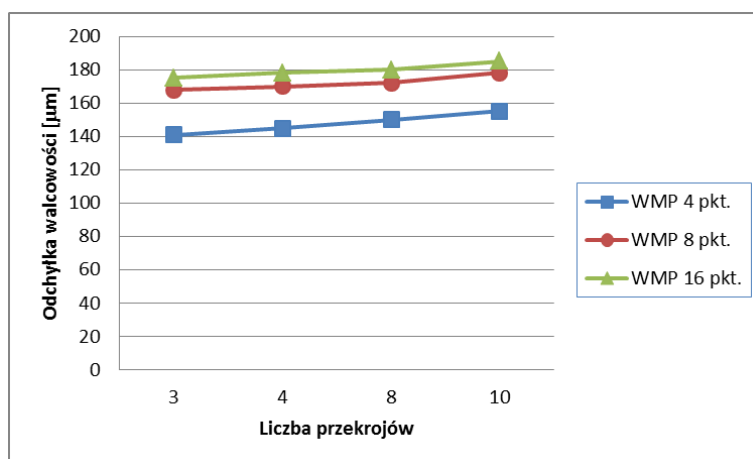


Rys. 6. Wyniki pomiarów walca z odchyłką 3-graniastości

Efekty pomiarów współrzędnościowych zaprezentowano na rys. 7 i 8. Ukazują one jak kształtują się rezultaty pomiarów w zależności od liczby przekrojów poprzecznych dla różnych ilości punktów pomiarowych. W obu przypadkach widoczny jest stosunkowo niewielki wpływ liczby przekrojów natomiast wartości odchyłek w znacznie większym stopniu są uzależnione od liczby punktów pomiarowych. Warto zwrócić uwagę, że ten niewielki wpływ liczby przekrojów może być efektem nominalnie prostej osi mierzonych elementów, zatem w przypadku pomiarów elementów walcowych z zakrzywioną osią wpływ ten będzie bardziej zauważalny.



Rys. 7. Wykres porównawczy zależności odchyłki walcowości od liczby przekrojów dla owalności



Rys. 8. Wykres porównawczy zależności odchyłki walcowości od liczby przekrojów dla 3-głaniowości

## WNIOSKI

Oddziaływanie rzeczywistej geometrii wyrobów jest wciąż niedocenianym źródłem błędów i niepewności pomiarowych. Niedokładności kształtu powodują istotną propagację błędów w ocenie tolerancji wymiarowej, kierunku i położenia.

Przeprowadzone i opisane w tej pracy badania są jedynie wstępnymi ale zwracają uwagę na kilka aspektów:

- brak w literaturze powszechnie przyjętej metodyki opisu rzeczywistej geometrii wyrobów z odchyłkami kształtu,
- brak przedmiotów wzorcowych o powierzchniach z dokładnie

narzuconymi odchyłkami kształtu do wykorzystania w ocenie jakości oprogramowania do pomiarów kształtu lub w badaniach eksperymentalnych,

- przeprowadzone badania potwierdzają konieczność określenia wpływu strategii pomiarowych w odniesieniu do elementów walcowych, głównie w zakresie liczby punktów pomiarowych i przekrojów poprzecznych,
- w elementach walcowych ważne jest nie tylko wyznaczenie wartości odchyłki kształtu ale i orientacja osi łącznie z jej odchyłką prostoliniowości, jako że służy ona do oceny odchyłek równoległości, nachylenia, współosiowości i symetrii elementów obrotowych (jako składowa odchyłki geometrycznej) oraz do oceny odległości między osiami walców ,
- odchyłka prostoliniowości oddziałuje również na jednoznaczność przy identyfikacji bazy lub układu baz dla tolerancji z elementem odniesienia.

#### LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., *Odniesieniowe metody pomiaru odchyłki okrągłości części maszyn*. Monografia. Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1998.
- [2] ADAMCZAK S., *Pomiary geometryczne powierzchni – zarysy kształtu, falistości i chropowatości*. WNT, Warszawa 2008.
- [3] ADAMCZAK S., JANECKI D., STĘPIEŃ K. *Experimental verification of the concept of cylindricity measurements with use of the bird-cage strategy*. Advances in Coordinate Metrology, University of Bielsko-Biała, 2010.
- [4] GAPIŃSKI B., KOŁODZIEJ A., GRZELKA M. *Wpływ elementu odniesienia na wynik pomiaru okręgu na CMM*. XIV Krajowa i V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Metrologia w Technikach Wytwarzania”. 12 – 14 IX 2011, Warszawa – Pułtusk.
- [5] JANECKI D. *Problemy pomiaru i oceny geometrii powierzchni obrotowych części maszyn* Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2012.
- [6] KOWALSKI M., *Analiza pomiarów wybranych zarysów z odchyłkami kształtu za pomocą przyrządów pomiarowych 3-koordynatowych*. Kraków, 1993.
- [7] PRACA ZBIOROWA pod red. A. N. GAWRIŁOWA, *Dokładność wytwarzania maszyn i urządzeń*, WNT Warszawa, 1978.
- [8] RATAJCZYK E., *Współrzędnościowa technika pomiarowa*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.



# SPRAWDZANIE DOKŁADNOŚCI PRZEMYSŁOWYCH TOMOGRAFÓW KOMPUTEROWYCH

Tomasz KOWALUK<sup>1</sup>, Eugeniusz RATAJCZYK<sup>1</sup>

## 1. WSTĘP

Przemysłowa tomografia komputerowa jest stosunkowo młodą i szybko rozwijającą się gałęzią pomiarów współrzędnościowych [6]. Prowadzonych jest wiele badań nad dokładnością pomiarów tomograficznych. W badaniach nad dokładnością, rozdzielczością czy powtarzalnością pomiarów duży nacisk kładziony jest na konstrukcję wzorców. Ponieważ przemysłowa tomografia komputerowa jest stosunkowo młodą dziedziną nie zostały opracowane dla niej normy ISO sprawdzania dokładności. Obecnie produkowane tomografy komputerowe mogą być sprawdzane według wytycznych VDI/VDE 2630. Blatt 1.3. „Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik“ [11]. W artykule zaprezentowano opis w jaki sposób według wytycznych możliwe jest sprawdzanie dokładności podczas pomiarów geometrycznych, zaprezentowano proponowane wzorce oraz pokazano przykładowe wyniki kalibracji tomografu METROTOM 800 produkcji firmy C. Zeiss.

Idea pomiarów tomograficznych polega na złożeniu trójwymiarowego obiektu przestrzennego z wielu obrazów płaskich powstałych w wyniku prześwietlenia badanego elementu w zadanych położeniach kątowych. Mierzony element ustawiany jest na obrotowym stole, który umożliwia przemieszczanie i pozycjonowanie liniowe oraz kątowe elementu. Przedmiot mierzony oświetlany jest wiązką promieniowania rentgenowskiego generowanego przez lampę, natomiast detekcja obrazu odbywa się na matrycy detektora w określonych położeniach kątowych badanego przedmiotu. Otrzymane obrazy przetwarzane są przez specjalistyczne oprogramowanie, przez co otrzymywany jest trójwymiarowy model mierzonego elementu [1,9].

---

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej,  
02-525 Warszawa, ul. Św. Andrzeja Boboli 8

Mierzone przedmioty podczas pomiaru pochłaniają energię promieniowania rentgenowskiego, wiązka rentgenowska zostaje osłabiona a różnica intensywności promieniowania przechodzącego przez obiekt jest rejestrowana na detektorze. Zmiana natężenia promieniowania równoległej wiązki o jednakowej energii, przy przejściu przez obiekt opisana jest zależnością [7,8]:

$$I = I_0 e^{-\mu g}, \text{ gdzie:} \quad (1)$$

$I$  – natężenie promieniowania po przejściu przez obiekt,

$I_0$  – początkowe natężenie promieniowania,

$\mu$  – liniowy współczynnik absorpcji promieniowania,

$g$  – grubość badanego materiału.

Współczynnik liniowy absorpcji promieniowania jest związany z gęstością i budową atomową mierzonego materiału [10].

## 2. PRZEMYSŁOWY TOMOGRAF KOMPUTEROWY METROTOM 800

Wyniki kalibracji zaprezentowane w artykule zostały uzyskane dla przemysłowego tomografu komputerowego METROTOM 800 firmy Carl Zeiss (rys. 1.). Urządzenie pomiarowe znajduje się na wyposażeniu Laboratorium Zaawansowanych Technic Pomiarów Geometrycznych Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Wartość maksymalnego dopuszczalnego błędu pomiaru zgodnie z wytycznymi VDI/VDE 2630 [11] dla tomografu METROTOM wynosi  $MPE_E = (4,5 + L/100) \mu\text{m}$ , gdzie  $L$  jest mierzoną długością w milimetrach.



Rys. 1. Po lewej przemysłowy tomograf komputerowy METROTOM 800, po prawej komputery do rekonstrukcji i analizy danych.

### 3. TESTY DOKŁADNOŚCI

Według wytycznych VDI/VDE 2630 [11] dokładność tomografów komputerowych charakteryzują następujące grupy parametrów:

- Parametr związany z błędem pomiaru długości –  $E$ ;
- Parametry związane z błędem skanowania –  $PF$ ,  $PS$ ;
- Parametry określające zależności wymiarowo-materiałowe –  $GS$ ,  $GF$ ,  $GG$ ;
- Parametr określający rozdzielczość –  $Dg$ .

Parametry z trzech pierwszych grup są wyznaczane dla dwóch układów projekcji:

- dla płaskiej wiązki promieniowania – do parametru dodaje się oznaczenie  $TS$ , np.  $PF(TS)$  – pomiar „w obrazie”;
- dla stożkowej wiązki promieniowania – do parametru dodaje się oznaczenie  $TT$ , np.  $PF(TT)$  – pomiar „na obrazie”.

W artykule skupiono się na wskazaniu w jaki sposób sprawdzana jest dokładności pomiarów geometrycznych (parametr związany z błędem pomiaru długości -  $E$ ). Błąd pomiaru długości, podobnie jak w przypadku techniki pomiarów współrzędnościowych, wyznaczany jest za pomocą materialnych wzorców długości.

Wartość błędu  $E$  porównywana jest z granicznym dopuszczalnym błędem pomiaru długości o postaci:

$$MPE_E = \pm \left( A + \frac{L}{K} \right) \mu m, \text{ gdzie:} \quad (2)$$

$L$  – mierzona długość podana w mm.

Błąd pomiaru długości  $E$  zgodnie z DIN EN ISO 10360 [5] jest odchyłką długości wyznaczaną przy pomocy wymiaru wzorcowego. Wyznaczana jest przez pomiar dwukierunkowy z dwóch naprzeciw sobie leżących punktów, z przeciwnych kierunków na nominalnie równoległych powierzchniach prostopadłych do jednej z powierzchni. Przez błąd pomiaru długości rozumie się trójwymiarową odchyłkę systemu określoną w całej przestrzeni pomiarowej. Wytyczne proponują analogiczne sposoby wyznaczania odpowiednich odchyłek tak jak ma to miejsce w przypadku sprawdzania współrzędnościowych maszyn pomiarowych [6].

### 4. RODZAJE WZORCÓW DO WYZNACZANIA BŁĘDU POMIARU DŁUGOŚCI

Błąd długości  $E$  może być wyznaczany za pomocą płytek wzorcowych, wzorców kulowych, stopniowych wzorców walcowych lub wzorców o specjalnej konstrukcji, np. w postaci zestawu trzypięni pomiarowych zakończonych elementami kulistymi.

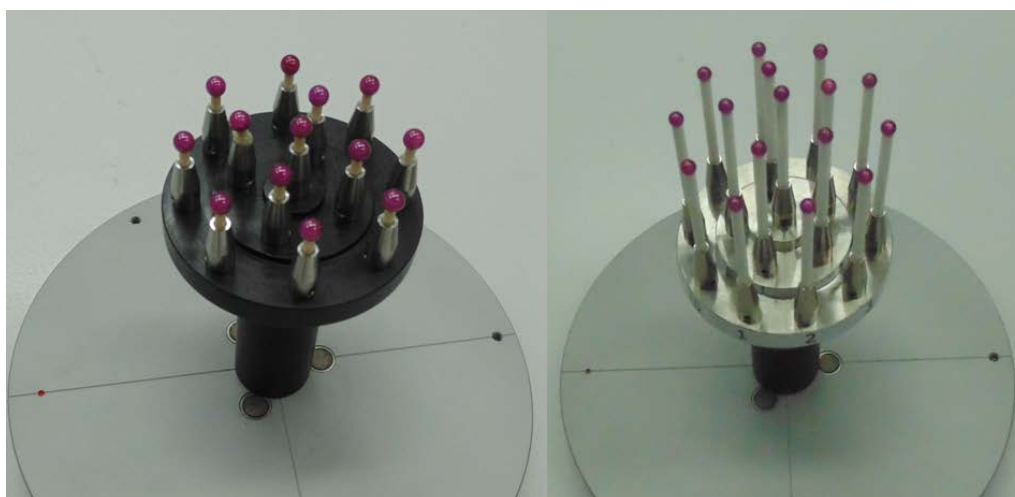
W przypadku zastosowania płytki wzorcowej jako wzorca długości wiązka przechodzi przez całą długość płytki i stanowi pomiar odległości między dwiema przeciwległymi powierzchniami. Ze względu na ograniczoną przenikalność dla

elementów ze stali stosuje się płytki wzorcowe o długościach najczęściej poniżej 30mm. W takim przypadku błąd  $E$  wyznaczany jest z następującej zależności:

$$E = L_a - L_r, \text{ gdzie:} \quad (3)$$

$L_a$  – zmierzona długość płytki wzorcowej,  
 $L_r$  – wzorcowa długość płytki.

W przypadku stosowania wzorców kulowych błąd  $E$  wyznacza się tak samo jak w przypadku wzorców końcowych, tzn. jako różnicę między odległością wzorcową  $L_r$  oraz wartością  $L_a$  uzyskaną z pomiaru. Wyznaczenie pozycji środka kuli polega na uśrednianiu wyników z chmury punktów poprzez dopasowanie kształtu oraz wymiaru. Należy zatem uwzględnić korekcję efektu uśredniania oraz kompensację błędów systematycznych. Przykład wzorców kulowych opracowanych w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej przedstawia rys. 2. Wzorce różnią się od siebie liczbą elementów pomiarowych, ich rozmieszczeniem oraz zakresem pomiarowym.



Rys. 2. Przykładowe wzorce kulowe o specjalnej konstrukcji.

Wytyczne VDI/VDE 2630 opisują dwie procedury A i B. W przypadku procedury A najprostsza możliwość polega na odwołaniu się do określonych wartości błędów skanowania ( $PS$  oraz  $PF$ ). Należy jednak zauważyć, iż właściwości wzorca takie jak jego materiał, wielkość, kształt oraz powierzchnia powinny być porównywalne przy określaniu błędu pomiaru długości jak i błędu skanowania. Strategia pomiarowa i podział punktów pomiarowych na wzorcu powinien być również możliwie jak najbardziej zbliżony.

W takim przypadku błąd pomiaru długości  $E$  składa się z:

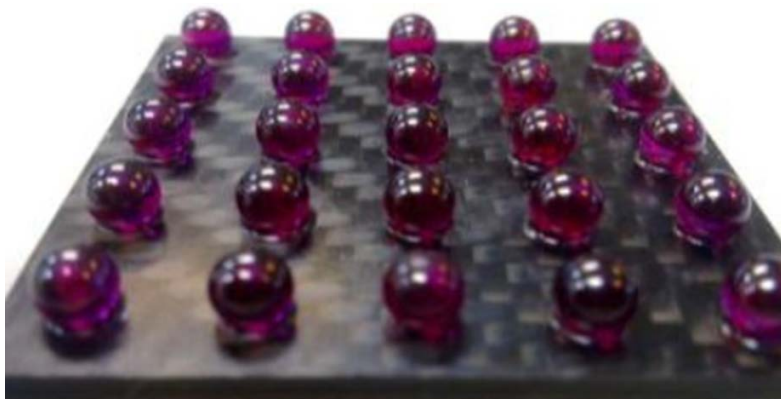
- różnicy pomiędzy zmierzoną długością  $L_a$  a skalibrowaną długością wzorca  $L_r$ ,
- przypisanej do zmierzonej średnicy, wartości błędu  $PS$ ,
- błędu skanowania  $PF$ .

Procedura A zalecana jest przy pomiarze wzorców kulowych, gdzie występuje błąd związany z uśrednianiem położenia środka kuli z wielu punktów pomiarowych, tak aby wpływ pojedynczych punktów był pomijalnie mały.

Procedura B jest dokładniejsza lecz bardziej złożona. Polega ona na pomiarze dla każdej z długości dodatkowego krótkiego wzorca końcowego. Błąd pomiaru długości wynika z:

- różnicy pomiędzy zmierzoną długością  $L_a$ , skalibrowaną długością wzorca  $L_r$ ,
- dodatkowego błędu  $E_E$  określonego na podstawie pomiarów krótkiego wzorca końcowego.

Przy wyznaczaniu błędu granicznego pomiaru długości stosowane są również wzorce stopniowe [6], wzorce w postaci prętów kulowych z dwiema lub wieloma kulami bądź listwy z kulami. Wytyczne określają te wzorce jako kulowe wzorce prętowe. Stosowane są również płytowe i sześciennie (kostkowe) wzorce kulowe czy płytowe wzorce kulowe (rys. 3).



Rys. 3. Płytowy wzorzec kulowy [4].

Przy wyborze wzorca należy zwrócić uwagę na jego współczynnik absorpcji promieniowania. Im wyższy współczynnik tym trudniej jest prześwietlić mierzony materiał. Należy w taki sposób dobierać materiały na wzorce aby możliwe było ich prześwietlenie i sprawdzenie dokładności pomiarowej w całej przestrzeni pomiarowej tomografu. Chropowatość wzorca powinna być pomijalnie mała. Dla różnych materiałów oraz różnych współczynników absorpcji wzorca wyznaczona wartość błędu granicznego pomiaru długości może się różnić. Jeśli producent nie określił wyżej wymienionych przyjmuje się je dla poszczególnych materiałów na podstawie danych z tablic.

## 5. WYNIKI PRZYKŁADOWEJ KALIBRACJI TOMOGRAFU

Zaprezentowane w artykule wyniki pochodzą z kalibracji tomografu przeprowadzonej przez serwis firmy C. Zeiss. W protokole pomiarowym zawarte są informacje odnośnie metody kalibracji wzorca, jego numer oraz świadectwo kalibracji. Podana jest również temperatura wzorca podczas kalibracji (w celu uwzględnienia poprawek temperaturowych). Wzorzec atestowany jest przez zewnętrzne akredytowane laboratorium za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej. Widok wzorca METROTOM Check Micro ustawionego na stole pomiarowym tomografu przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Wzorzec METROTOM Check Micro wewnątrz komory tomografu.

Wzorzec składa się z 22 trzpieni zakończonych rubinowymi kulami rozmieszczonych na trzech stopniach (trzy wysokości pomiarowe). Trzpień zostały tak ustawione by uzyskać serie 5 wzorcowych dystansów. Pomiary wykonywany jest przy określonym przez producenta powiększeniu wynoszącym 2,86 przy odległości od lampy rentgenowskiej w osi x wynoszącej 270 mm. Powiększenie jest dobierane w taki sposób aby wykorzystać cały zakres pracy detektora, przy zastosowaniu maksymalnego możliwego powiększenia. Pomiar wykonywany jest trzykrotnie przy identycznych ustawieniach [2,3]. W świadectwie wzorcowania zamieszczone są następujące informacje odnośnie parametrów pomiarowych: napięcie i natężenia prądu lampy rentgenowskiej, wzmacnienie i czas integracji detektora (czas naświetlania podczas jednej projekcji), powiększenie, pozycja osi, liczba projekcji, typ stosowanych filtrów oraz informacje odnośnie włączonych opcji (sprawdzanie



tomografów opierają się na wytycznych VDI/VDE [11].

Wytyczne VDI/VDE 2630 podają wiele rodzajów wzorców umożliwiających sprawdzenie dokładności tomografów i stanowią wprowadzenie do dalszych prac związanych z opracowaniem odpowiednich norm ISO.

Zadaniem na przyszłość jest również opracowanie nowych typów wzorców pozwalających na określenie dodatkowych parametrów takich jak np. zależności materiałowo-geometryczne. Ważnym zagadnieniem jest opracowanie rozbudowanych strategii pomiarowych możliwych do zaimplementowania do różnego typu przemysłowych tomografów komputerowych w celu miarodajnego porównania ich parametrów metrologicznych.

#### LITERATURA

- [1] GAPIŃSKI B., WIECZOROWSKI M., MARCINIAK-PODSADA L., DYBALA B., ZIOLKOWSKI G., *Comparison of different method of measurement geometry using CMM, optical scanner and computed tomography 3D*. 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013
- [2] KOWALUK T., WOŹNIAK A., *Study of computer tomography resolution using image quality indicators*. X-th International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique, Bielsko-Biała, Poland, April 2012, Accuracy in coordinate metrology, eds. Wozniak A. et al, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku Białej, Bielsko-Biała 2012, 96-103
- [3] KRUTH J.P., BARTSCHER M., CARMIGNATO S., SCHMITT R., DE CHIFFRE L., WECKENMANN A., *Computed tomography for dimensional metrology*. W: CIRP Annals - Manufacturing Technology. 60 (2011), pp. 821–842
- [4] MÜLLER P., HILLER J., CANTATORE A., TOSELLO G., DE CHIFFRE L., *New reference object for metrological performance testing of industrial CT systems*. Departement of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark (DTU), Kgs. Lyngby (Dania), 2012
- [5] PN-EN ISO 10360-2 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Część 2: CMM stosowane do pomiaru wymiarów.
- [6] RATAJCZYK E., *Współrzędnościowa Technika Pomiarowa*. Ofic. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [7] RATAJCZYK E., *Tomografia komputerowa w pomiarach geometrycznych 3D*. W: Pomiar Automatyka Kontrola PAK vol. 57, nr 2/2011 s. 220-223.
- [8] RATAJCZYK E., *Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych*. W: Mechanik nr 2/2011, s.112-117; nr 3/2011, s.226-231; nr 4/2011 s.326-331.
- [9] WIECZOROWSKI M., GAPIŃSKI B., *X-ray CT in metrology of geometric feature*. W: ACTA Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering, Tome VII (2014), 95-100
- [10] Weckenmann A., *Micro measurements using CT*. Symposium on Computed Tomography applied to Dimensional Control, Berlin (Niemcy), 2009.
- [11]VDI/VDE 2630. Blatt 1.3. Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik, Düsseldorf 2009.



# **ANALIZA WPŁYWU USTAWIENIA ELEMENTU NA WYNIKI POMIARÓW TOMOGRAFICZNYCH**

Tomasz KOWALUK<sup>1</sup>, Adam Woźniak<sup>1</sup>

## **1. WSTĘP**

Przemysłowa tomografia komputerowa swój początek zawdzięcza przeniesieniu zastosowań medycznych do przemysłu i umożliwia wykonywanie pomiarów nieosiągalnych przez inny sprzęt metrologiczny. Ciągły rozwój technik wytwarzania urządzeń precyzyjnych wymusza stosowanie coraz dokładniejszych urządzeń do pomiarów geometrycznych gotowych wyrobów. Oprócz coraz bardziej restrykcyjnych wymogów dotyczących wymiarów zewnętrznych kładziony jest nacisk na analizę struktury wewnętrznej mierzonych elementów. W coraz większe wymagania stawiane urządzeniom pomiarowym doskonale się wpisuje przemysłowa tomografia komputerowa, która zaliczana jest do współrzędnościowych technik pomiarowych [8].

Tomografy znalazły zastosowanie przede wszystkim w badaniach nieniszczących obiektów wykonanych z różnych materiałów. Możliwe jest analizowanie materiałów takich jak metale, ceramika czy tworzywa sztuczne. Ponieważ tomografia jest bezkontaktową metodą umożliwia pomiary elementów wiotkich, sprężystych oraz miękkich podatnych na nacisk pomiarowy [6,7].

Przemysłowa tomografia komputerowa umożliwia wykrywanie wad wewnętrznych takich jak: rozwarstwienia czy pęknięcia. Możliwa jest analiza struktury wewnętrznej, wyszukiwanie wtrąceń innych materiałów jak i porowatości [1,9]. Oprogramowanie opierające się na analizie zrekonstruowanych podczas pomiarów chmur punktów umożliwia: wykonywanie standardowych pomiarów geometrycznej, porównywanie wyników z modelem CAD oraz tworzenie modeli CAD w procesie inżynierii odwrotnej. Dodatkowym atutem tomografii jest możliwość analizy złożonych podzespołów składających się z wielu części. Bazując na trójwymiarowej

---

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej,  
02-525 Warszawa, ul. Św. Andrzeja Boboli 8

rekonstrukcji składającej się z wokseli możliwe jest odseparowanie poszczególnych części i materiałów w mierzonym zespole. Badanie przekrojów umożliwia analizę poprawności montażu. Ze względu na nowość i ciągły rozwój tomografii jak i nieznaną jej dokładnych właściwości metrologicznych konieczne jest zbadanie wpływu poszczególnych składowych wpływających na dokładność pomiaru [2]. Na dokładność pomiarów tomograficznych wpływa szereg czynników do których należą: rodzaj materiału z jakiego jest wykonany mierzony element jak i ich ilość, parametrów pomiarowych (ustawień lampy rentgenowskiej i detektora) czy warunków środowiskowych. Z warunków środowiskowych największy wpływ ma stabilność temperatury [3,5]. W artykule sprawdzono wpływ ustawienia mierzonego elementu na wynik pomiaru. Wykonano badania umożliwiające ocenę wpływu takich czynników jak zastosowane powiększenie (rozmiar pojedynczego woksela) oraz niecentryczność ustawienia mierzonego elementu (brak możliwości automatycznego centrowania elementów wewnątrz komory tomografu).

## 2. PRZEMYSŁOWY TOMOGRAF KOMPUTEROWY METROTOM 800

Badania zostały przeprowadzone przy użyciu przemysłowego tomografu komputerowego METROTOM 800 firmy Carl Zeiss (rys. 1). Urządzenie pomiarowe znajduje się w Laboratorium Zaawansowanych Technik Pomiarów Geometrycznych zlokalizowanego w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.



Rys. 1. Przemysłowy tomograf komputerowy METROTOM 800

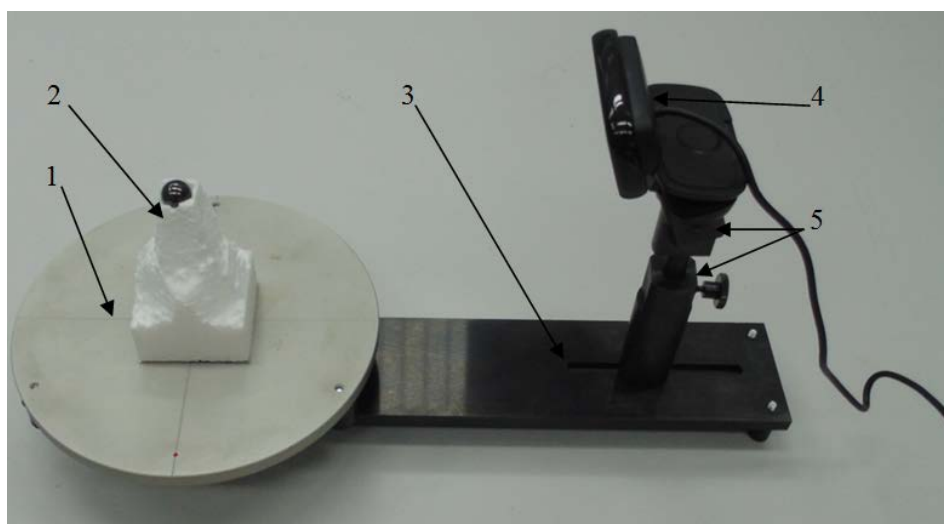
Tomografy komputerowe składają się z trzech głównych zespołów do których zaliczamy: źródło promieniowania rentgenowskiego - lampa rentgenowska, detektor promieniowania oraz układ do pozycjonowania mierzonego elementu składający się z obrotowego stołu pomiarowego oraz prowadnic liniowych. Uzyskane dane przetwarzane są przez oddzielny komputer. Tomograf komputerowy METROTOM 800 wyposażony jest w lampę rentgenowską o mocy 39 W (przy maksymalnych parametrach napięcia 130 kV i natężenia 300  $\mu$ A) oraz detektor o rozdzielczości 1536x1920 pikseli. W przestrzeni pomiarowej tomografu możliwy jest pomiar elementów o maksymalnej średnicy 170 mm i 190 mm wysokości. Masa mierzonego elementu nie może przekraczać 4 kg. Przy użyciu tomografu METROTOM 800 możliwe jest uzyskanie maksymalnego powiększenia 45 razy dla pomiarów 2D oraz 40-krotnego powiększenia dla pomiarów 3D przy czym minimalny rozmiar pojedynczego woksela wynosi 5  $\mu$ m. Wartość maksymalnego dopuszczalnego błędu wskazania  $MPE_E$  zgodnie z wytycznymi VDI/VDE 2630 wynosi  $4,5 + L/100 \mu\text{m}$ , gdzie L jest mierzoną długością w milimetrach.

Aby osiągnąć maksymalne powiększenie mierzonego elementu niezbędne jest prawidłowe wycentrowanie mierzonego detalu. Tomograf umożliwia manipulowanie mierzonym obiektem w dwóch osiach X i Z. Zmiana położenia mierzonego elementu w osi x powoduje zmianą powiększenia. Im bliżej lampy rentgenowskiej znajduje się mierzony element tym większą wartość powiększenia uzyskujemy (mniejszy rozmiar woksela). Dodatkowo centryczne ustawienie elementu pomiarowego umożliwia wycięcie z rekonstrukcji obrazu powietrza otaczającego mierzony detal co pozwala na przyspieszenie rekonstrukcji (do 10 minut krótszy czas  $\sim$  40%) oraz ograniczenie wielkości pliku wynikowego (oszczędność miejsca na dysko o 3-4 GB  $\sim$  40%).

### 3. PROCEDURA POMIAROWA

Jako element pomiarowy do sprawdzenia wpływu ustawień podczas pomiarów na wyniki wybrano ceramiczną kulę ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) klasy G5 o średnicy nominalnej 12,7 mm (0,5 cala). Procedura pomiarowa składała się z dwóch naprzemiennych etapów. Pierwszym etapem było odpowiednie ustawienie mierzonego elementu (w celu sprawdzenia wpływu niecentryczności) drugim jego pomiary przy pomocy tomografu. Podczas badań wykonano pomiary umożliwiające określenie wpływu ustawionego powiększenia (rozmiaru pojedynczego woksela) oraz niecentryczności ustawienia elementu pomiarowego. Wartość niecentryczności ustawiano przy pomocy specjalnie skonstruowanego stanowiska przedstawionego na rys. 2. Stanowisko składa się z obrotowego uchwytu do mocowania stolika tomografu komputerowego (1) na którym mocowana jest styropianowa podstawa w mierzonym elemencie (2), podstawy z prowadnicą (3), kamerki internetowej (4) i przegubów (5) umożliwiających odpowiednie ustawienie kamery. W stanowisku zamontowano kamerkę internetową Logitech rejestrującą obraz w rozdzielczości Full HD

umożliwiającej zastosowanie czterokrotnego powiększenia. Kamera zamocowana jest do kolumny wyposażonej w prowadnicę pionową i przegub obrotowy umożliwiające dostosowanie wysokości montażu kamery do centrowanego elementu. Dodatkowo w zależności od rozmiaru centrowanego element istnieje możliwość przesuwu całej kolumny w kierunku elementu pomiarowego. Kalibracja stanowiska odbywa się przy pomocy wzorca z przemysłowego tomografu komputerowego stosowanego do kalibracji osi tomografu. Obraz z kamery wyświetlany jest na monitorze komputera, poprzez ręczny obrót stolika pomiarowego sprawdzane jest odchylenie zamocowanego elementu od osi obrotu. Centrowanie polega na sprawdzeniu i ręcznym przesunięciu elementu pomiarowego w analogiczny sposób jak centrowane są elementy na urządzeniach do sprawdzania odchyłek okrągłości. Rejestrowana jest wartość odchyłki od osi obrotu, przesunięcie elementu o połowę wartości odchyłki, obrót stolika o 180°, sprawdzenie odchyłki i kolejne przesunięcie o połowę wartości odchyłki. Następnie powtórzenie procedury pomiarowej po obróceniu stolika o 90°. Na stoliku tomografu komputerowego zaznaczone są wzajemnie prostopadłe kresy wzdłuż których należy przeprowadzać proces centrowania.



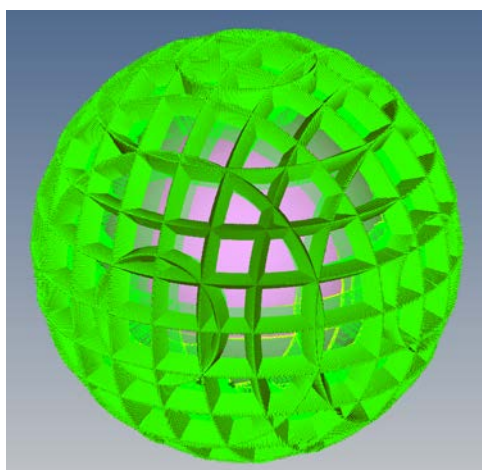
Rys. 2. Stanowisko do ustawiania niecentryczności.

Sprawdzono cztery wartości powiększenia (rozmiaru pojedynczych wokseli): 15, 20, 40 oraz 60  $\mu\text{m}$  przy trzech wartościach niecentryczności: ustawieniu centrycznym, 2,5 i 5,0 mm. Niecentryczność ustawiana ręcznie na stanowisku z dokładnością do 0,1 mm. Dla każdego pomiaru ustawiono identyczne parametry lampy rentgenowskiej (napięcie 130 kV, natężenie 300  $\mu\text{A}$ ) i detektora (czas integracji 1 ms - czas naświetlania podczas jednej projekcji, wzmocnienie 8,0 x) ustawiono również identyczną liczbę projekcji na pełny obrót mierzonego detalu (1000 projekcji -

prześwieleń). Im większa liczba projekcji tym dokładniejszy wynik pomiarów otrzymujemy [4]. Dodatkowo w celu sprawdzenia powtarzalności pomiarów wykonano trzy pomiary przy identycznym ustawieniu powiększenia i identycznej niecentryczności.

#### 4. WYNIKI POMIARÓW

Uzyskane z pomiarów chmury punktów eksportowano do programu CALYPSO wersja 5.2. Dla każdej z kul ustawiono identyczną strategię pomiarową. Obrabiając chmury punktów należy w strategii pomiarowej uwzględnić większą liczbę punktów pomiarowych niż podczas tradycyjnych pomiarów współrzędnościowych. Łącznie dla każdej z kul zebrano 13500 punktów pomiarowych (rozłożonych na 9 okręgach wokół trzech osi - po 500 punktów na okrąg). Siatkę rozmieszczenia punktów pomiarowych przedstawia rys. 3. W oknie programu widoczne jest rozmieszczenie zebranych punktów pomiarowych. Każdy z punktów przedstawiony jest w postaci strzałki ilustrującej kierunek wektora normalnego do powierzchni w punkcie pomiarowym.



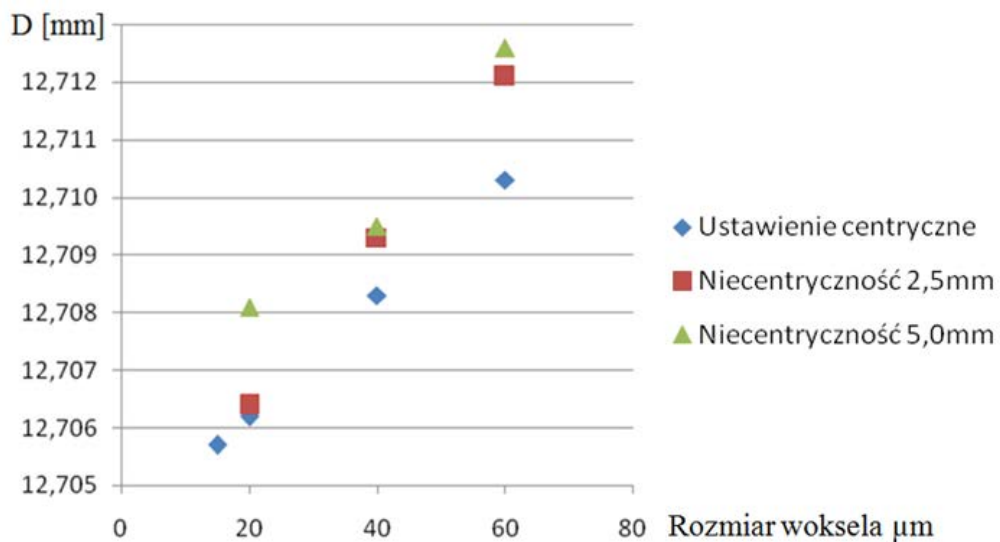
Rys. 3. Okno programu Calypso ukazujące siatkę rozmieszczenia punktów pomiarowych z ilustracją kierunku wektorów normalnych.

Uzyskane podczas badania wyniki pomiarów średnicy kuli D zestawiono w tab. 1. Pomiar przy ustawieniu centrycznym przy rozmiarze pojedynczego woksela wynoszącym 20  $\mu\text{m}$  wykonano trzykrotnie w celu określenia powtarzalności pomiarów. Na podstawie zestawionych w tabeli wartości sporządzono wykres ilustrujący zmianę średnicy mierzonej kuli w zależności od zastosowanego powiększenia (rozmiar pojedynczego woksela) oraz wprowadzonej niecentryczności. W przypadku pomiaru przy rozmiarze woksela 20  $\mu\text{m}$  na wykresie zaznaczono wartość średnią z trzech pomiarów bez zauważalnej niecentryczności.

Tab. 1. Zestawienie wyników pomiarów średnicy kuli.

Rozmiar wksela [ $\mu\text{m}$ ] / Niecentryczność [mm]	Średnica D [mm]
15 / 0	12,7057
20 / 0	12,7061
20 / 0	12,7063
20 / 0	12,7062
20 / 2,5	12,7064
20 / 5,0	12,7081
40 / 0	12,7083
40 / 2,5	12,7093
40 / 5,0	12,7095
60 / 0	12,7103
60 / 2,5	12,7121
60 / 5,0	12,7126

Na podstawie trzech pomiarów wykonanych przy identycznym ustawieniu parametrów pomiarowych oraz identycznej wartości powiększenia określono powtarzalność pomiarów na poziomie  $0,2 \mu\text{m}$  (wartość rozstępu pomiędzy wynikami).



Rys. 4. Wykres ilustrujący wyniki pomiaru średnicy mierzonej kuli w zależności od zastosowanego powiększenia (rozmiar pojedynczego wksela) oraz wprowadzonej niecentryczności.

Podczas badań zauważono wpływ ustawionego powiększenia oraz wprowadzonej niecentryczności na wyniki pomiarów średnicy kuli. Zarówno większa wartość powiększenia jak i wprowadzona niecentryczność wpływała na wzrost średnicy mierzonej kuli. Największa różnica wartości wyniosła 6,9  $\mu\text{m}$  przy deklarowanej dokładności tomografu na poziomie 4,5  $\mu\text{m}$ . Na podstawie wykresu widoczna jest liniowa zależność pomiędzy zastosowanym powiększeniem a wzrostem wartości średnic mierzonej kuli.

Nominalna wartość średnicy kulki wyznaczona przy pomocy współrzędnościowej maszyny pomiarowej ACCURA wyniosła 12,6993 mm przy odchyłce kształtu wynoszącej 0,6  $\mu\text{m}$ . Dokładność maszyny pomiarowej ACCURA wyrażona wartością  $MPE_E$  jest równa  $1,7+L/333$   $\mu\text{m}$  (L długość mierzona w mm). Wartość wyznaczona za pomocą WMP (z uwzględnieniem  $MPE_E$ ) obejmuje wartość ze świadectwa kuli wynoszącą 1/2 cala. Wyniki uzyskane z przemysłowego tomografu komputerowego różnią się od wartości nominalnej w zakresie od 6,4 do 13,3  $\mu\text{m}$  przy czym każda wartość ze zmierzonych średnic była większa od wartości nominalnej.

Dodatkowo w programie Statgraphics Centurion przeprowadzono nieparametryczny test Kruskala-Wallisa. Jako zmienną zależną przyjęto wartość średnicy kuli natomiast jako czynniki niecentryczność oraz rozmiar woksela. Wartości prawdopodobieństwa p z testu dla niecentryczności wyniosła 0,40, ponieważ wartość ta jest większa od 0,05 niecentryczność nie ma statystycznie istotnego wpływu na średnicę kuli na poziomie ufności 95%. Natomiast wynik testu dla rozmiaru woksela wykazał istotny statystyczny wpływ na zmianę średnicy kuli na poziomie ufności 95% (wartość prawdopodobieństwa p - 0,039).

## 5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono wpływ obydwu sprawdzanych czynników na zmianę wymiaru mierzonego elementu (statystycznie istotny wpływ jednego czynnika - rozmiar pojedynczego woksela). Aniza wpływu rozmiaru pojedynczego woksela wykazała pewien trend. Im większą wartość rozmiaru pojedynczego woksela ustawiono tym większą wartość średnicy otrzymano przy zachowaniu centrycznego ustawienia. Maksymalna różnica średnic wyniosła 4,6  $\mu\text{m}$  (różnica pomiędzy rozmiarami woksela 15 i 60  $\mu\text{m}$ ).

Dodatkowo zaobserwowano wzrost wartości średnic przy zwiększonej wartości niecentryczności ustawienia elementu pomiarowego. Zaobserwowano następujące wzrosty wartości średnic 1,9  $\mu\text{m}$  przy rozmiarze woksela 20  $\mu\text{m}$ , 1,2  $\mu\text{m}$  przy rozmiarze woksela 40  $\mu\text{m}$  oraz 2,3  $\mu\text{m}$  przy rozmiarze woksela 60  $\mu\text{m}$ .

Uwzględniając obydwie czynniki (rozmiar woksela oraz niecentryczność) maksymalna różnica wartości pomiędzy pomiarami średnic wyniosła 6,9  $\mu\text{m}$ . Wartość ta jest większa od deklarowanej przez producenta wartości maksymalnego dopuszczalnego błędu wskazania tomografu komputerowego wynoszącej 4,6  $\mu\text{m}$

(przy uwzględnieniu członu związanego z długością mierzonego elementu).

Najdokładniejsze wyniki pomiarów średnicy kuli na tomografie METROTOM 800 uzyskano przy ustawieniu centrycznym elementu przy zastosowaniu największego powiększenia (najmniejszego rozmiaru pojedynczego woksela wynoszącego 15  $\mu\text{m}$ ). Wprowadzenie dodatkowej niecentryczności oraz zwiększenie rozmiaru pojedynczego woksela powodowało pogorszenie uzyskiwanych wyników pomiaru średnicy kuli. Przeprowadzony nieparametryczny test statystyczny potwierdził istotny statystyczny wpływ rozmiaru pojedynczego woksela na wartość średnicy kuli na poziomie ufności wynoszącym 95%.

#### LITERATURA

- [1] GAPIŃSKI B., WIECZOROWSKI M., MARCINIAK-PODSADA L., DYBALA B., ZIOLKOWSKI G., *Comparison of different method of measurement geometry using CMM, optical scanner and computed tomography 3D*. 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013.
- [2] KOWALUK T., WOŹNIAK A., *Study of computer tomography resolution using image quality indicators*. X-th International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique, Bielsko-Biała, Poland, April 2012, Accuracy in coordinate metrology, eds. Wozniak A. et al, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku Białej, Bielsko-Biała 2012, 96-103.
- [3] KOWALUK T., WOŹNIAK A., *Badanie stabilności temperatury mierzonego elementu podczas pomiarów tomograficznych*, W: Pomiary Automatyka Kontrola, 5/2012, 445-447.
- [4] KRUTH J.P., BARTSCHER M., CARMIGNATO S., SCHMITT R., DE CHIFFRE L., WECKENMANN A.: *Computed tomography for dimensional metrology*. W: CIRP Annals - Manufacturing Technology. 60 (2011), 821-842.
- [5] LINGARD, P.S., PURSS, M., SONA, C.M., THWAITE, E.G., MARIASSON, G.H., *Temperature perturbation effects in a high precision CMM*. W: Precision Engineering, v 13, n 1, Jan 1991, 41-51.
- [6] RATAJCZYK E.: *Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych*. W: Mechanik nr 2/2011, s.112-117; nr 3/2011, s.226-231; nr 4/2011 s.326-331.
- [7] RATAJCZYK E.: *Tomografia komputerowa w pomiarach geometrycznych 3D*. W: Pomiary Automatyka Kontrola PAK vol. 57, nr 2/2011 s. 220-223.
- [8] RATAJCZYK E.: *Współrzędnościowa Technika Pomiarowa*. Ofic. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [9] WIECZOROWSKI M., GAPIŃSKI B.: *X-ray CT in metrology of geometric feature*. W: ACTA Tehnica Corviniensis - Bulletin of Engineering, Tome VII (2014), 95-100



# DIAGNOSTYKA PROCESU SZLIFOWANIA KŁOWEGO WAŁKÓW

Paweł LAJMERT<sup>1</sup>, Bogdan KRUSZYŃSKI<sup>1</sup>, Małgorzata SIKORA<sup>1</sup>,  
Dariusz OSTROWSKI<sup>1</sup>

## 1. WSTĘP

W procesie diagnostyki szlifowania kłowego wałków pomiarem może być objętych szereg sygnałów takich jak moc lub składowe siły szlifowania, sygnały drgań, czy emisji akustycznej AE (ang. acoustic emission) [6, 10, 12, 16]. W wyniku odpowiedniego przetwarzania tych sygnałów w dziedzinie czasu, częstotliwości lub czasu i częstotliwości możliwe jest uzyskanie pojedynczej cechy bądź zbioru cech skorelowanych z analizowanym zjawiskiem. Analizie mogą podlegać zjawiska związane ze zużywaniem się narzędzia ściernego, powstawaniem drgań samowzbudnych, uszkodzeniami cieplnymi przedmiotu bądź wynikowymi parametrami geometrii szlifowanych przedmiotów. W szczególności podczas obróbki materiałów trudnoobrabialnych, takich jak stale wysokostopowe czy stopy na bazie niklu, mogą powstawać duże siły oraz wysokie temperatury szlifowania. Właściwości, które czynią te materiały tak przydatne w produkcji odpowiedzialnych części maszyn czynią je jednak dość kłopotliwe w obróbce ścierniej. Z tych powodów konieczne jest ciągłe monitorowanie stanu procesu w celu modyfikacji jego przebiegu bądź podjęcia decyzji o kondycjonowaniu ściernicy.

W diagnostyce procesu szlifowania pomiar mocy bądź siły szlifowania może być wykorzystany do estymacji zdolności skrawnej ściernicy [16]. Natomiast emisja akustyczna jest związana ze zjawiskami składającymi się na procesy skrawania i dlatego może być użyta do estymacji parametrów geometrycznych warstwy wierzchniej szlifowanej powierzchni, parametrów czynnej powierzchni ściernicy CPS lub identyfikacji niepożądanych stanów procesu, takich jak uszkodzenia cieplne przedmiotu [2, 3, 8, 11, 14, 15]. Sygnał drgań jest z kolei podstawą do identyfikacji

---

<sup>1</sup> Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i TBM, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

zjawisk związanych z powstawaniem drgań samowzbudnych i może być wykorzystany do estymacji falistości obrabianego przedmiotu i makrogeometrii CPS [11].

W artykule porównano różne metody przetwarzania sygnałów w dziedzinie czasu, częstotliwości oraz czasu i częstotliwości w zastosowaniu do diagnostyki stanu procesu szlifowania kłowego wałków. Opisano wady i zalety poszczególnych metod. Przedstawiono strukturę budowanego systemu diagnostyki procesu szlifowania oraz przykładowe wyniki badań. W trakcie prób szlifowano próbki wykonane ze stali 38HMJ ulepszonej do około 50 HRC o średnicy 70 mm i szerokości 15 mm przy użyciu ściernicy ceramicznej 38A60K6VBE. Stosowano prędkość skrawania równą 35 m/s. W każdym cyklu szlifowania zbierano około 22 mm<sup>3</sup>/mm materiału. Jako chłodziwo stosowano 3% wodny roztwór emulsji syntetycznej Mobilcut 321.

## 2. PRZEGLĄD METOD ANALIZY SYGNAŁÓW

Rejestrowane sygnały we współczesnych systemach akwizycji danych przyjmują postać dyskretnych szeregów czasowych i wymagają dalszego przetwarzania w celu wydobywania informacji powiązanej z analizowanym zjawiskiem. Analizowane sygnały (siła, drgania, emisja akustyczna, itp.) zawierają ważne informacje w dziedzinie czasu, częstotliwości, jak również czasu i częstotliwości.

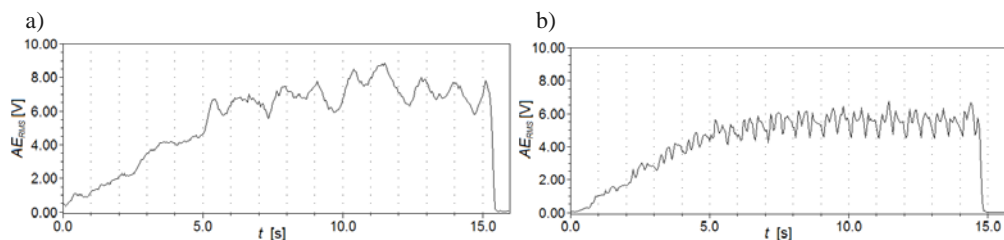
### 2.1. ANALIZA W DZIEDZINIE CZASU

W przypadku przetwarzania w dziedzinie czasu wyznaczanie miar może odbywać się na podstawie miar statystycznych sygnałów, takich jak wartość średnia, wartość skuteczna, odchylenie standardowe, kurtoza, skośność, itp.. W nadzorze procesów szlifowania praktyczne zastosowanie znalazło monitorowanie amplitudy sygnału drgań (kontrola niewyważenia ściernicy) oraz monitorowanie wartości skutecznej sygnału AE. Ponadto monitorowaniu podlegać mogą wybrane miary tego sygnału, np. skośność czy kurtoza. Miary te są wykorzystywane do diagnostyki stanu narzędzia ściernego, identyfikacji przypaleń przedmiotu, czy też do estymacji naprężeń własnych w warstwie wierzchniej szlifowanych przedmiotów.

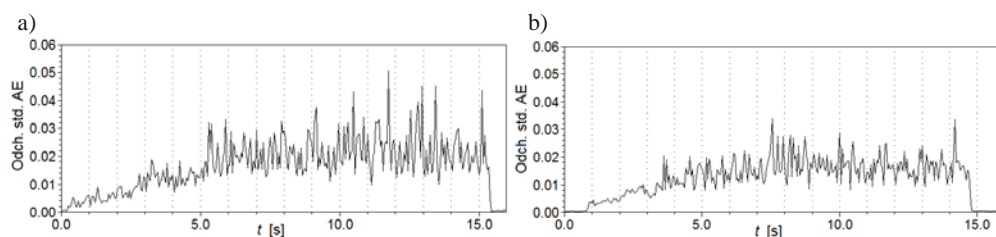
Na rysunku 1 i 2 przedstawiono wybrane przebiegi odpowiednio wartości skutecznej sygnału  $AE_{rms}$  i odchylenia standardowego surowego sygnału  $AE_{std}$  dla pracy w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu i w optymalnym obszarze szlifowania. Widać, iż zarówno wartość skuteczna jak i odchylenie standardowe tego sygnału znacząco wzrasta dla pracy w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu.

Innymi metodami przetwarzania sygnałów w dziedzinie czasu są metody analizy składowych głównych PCA (ang. Principal Component Analysis) [7] i składowych niezależnych ICA (ang. Independent Component Analysis) [5]. W przypadku metody PCA, jak i nowo opracowanej metody ICA celem jest znalezienie liniowej

reprezentacji oryginalnego sygnału tak, aby wyznaczone składowe sygnału były ze sobą nieskorelowane, albo w przypadku metody ICA dodatkowo statystycznie niezależne. Pozwala to na uchwycenie zasadniczej struktury sygnału i jego dekompozycję na niezależne składowe pochodzące z różnych źródeł informacji w analizowanym procesie.



Rys. 1. Zmiany wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej  $AE_{rms}$  podczas szlifowania z wydajnością  $Q'_w = 1.5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$  dla pracy: a) w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu ( $v_w = 0.05 \text{ m/s}$ ); b) w optymalnych warunkach szlifowania ( $v_w = 0.2 \text{ m/s}$ )



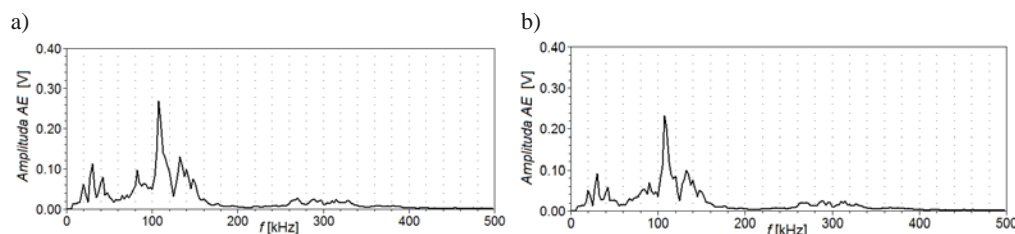
Rys. 2. Zmiany odchylenia standardowego surowego sygnału emisji akustycznej  $AE_{rms}$  podczas szlifowania z wydajnością  $Q'_w = 1.5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$  dla pracy: a) w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu ( $v_w = 0.05 \text{ m/s}$ ); b) w optymalnych warunkach szlifowania ( $v_w = 0.2 \text{ m/s}$ )

Tak wyznaczone miary sygnałów, choć częściowo skorelowane z analizowanym zjawiskiem, mogą jednak zawierać informację pochodzącą z wielu innych zjawisk, występujących w różnych zakresach częstotliwościowych analizowanych sygnałów.

## 2.2. ANALIZA W DZIEDZINIE CZĘSTOTLIWOŚCI

W diagnostyce procesu szlifowania podstawową metodą analizy sygnałów w dziedzinie częstotliwości jest szybka transformata Fouriera FFT [9]. Wykorzystuje ona jako podstawę sinusoidalne funkcje okresowe, reprezentujące jedną częstotliwość. Powoduje to utratę informacji o czasie wystąpienia poszczególnych zdarzeń częstotliwościowych. Na rysunku 3 przedstawiono widmo częstotliwościowe surowego sygnału AE dla ściernicy ostrej, gdzie występują procesy wykruszania się

naruszonych ziaren lub mostków spoiwa bezpośrednio po procesie kondycjonowania ściernicy oraz dla ściernicy stępionej (zalepienie ściernicy).



Rys. 3. Widmo surowego sygnału AE podczas szlifowania z wydajnością  $Q'_w = 1.5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$  ( $v_w = 0.2 \text{ m/s}$ ) dla: a) ściernicy ostrej (pierwszy cykl szlifowania); b) ściernicy stępionej (10 cykl szlifowania)

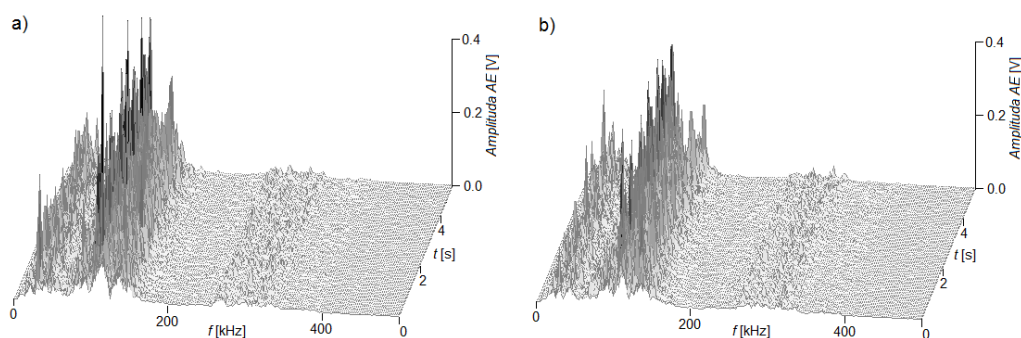
Widać, że amplituda uśrednionego widma surowego sygnału AE dla ściernicy ostrej jest tylko nieznacznie większa niż dla ściernicy zalepionej, chociaż chwilowe wartości amplitudy podlegają wyraźnym wahaniom. Jest to spowodowane uśrednianiem amplitudy sygnału w dziedzinie czasu, przez co występujące w sygnale krótkotrwałe zdarzenia, związane np. z wykruszaniem się ziaren ściernicy, mogą być niewidoczne w widmie FFT.

## 2.2. ANALIZA W DZIEDZINIE CZASU I CZĘSTOTLIWOŚCI

Aby pokonać wadę związaną z uśrednianiem amplitudy w dziedzinie czasu można zastosować krótko czasową transformatę Fouriera STFT (ang. Short Time Fourier Transform), w której wykonuje się transformatę Fouriera na sygnale okienkowanym w ramach analizowanego ciągu czasowego, przy czym okno jest przesuwane monotonicznie w czasie, przez co możliwe jest wychwycenie krótkotrwałych zmian widma sygnału w kolejnych chwilach czasu. O czułości tej metody decyduje głównie szerokość okna. Na rysunku 4 przedstawiono zmiany widma surowego sygnału AE odpowiadające warunkom z rysunku 3. Widać, że dla ściernicy ostrej, bezpośrednio po procesie kondycjonowania, chwilowe wartości amplitudy podlegają wyraźnym zmianom i są większe niż dla ściernicy stępionej, co nie jest widoczne na wykresie uśrednionego widma sygnału AE przedstawionego na rysunku 3. Jednakże główną wadą transformaty STFT jest stała szerokość okna czasowego, co powoduje, że jakość informacji częstotliwościowej jest odwrotnie proporcjonalna do jakości informacji czasowej.

Metodą wolną od tej wady jest dyskretna DWT, bądź ciągła transformata falkowa CWT (ang. Discrete and Continuous Wavelet Transform). W metodach tych szerokość okien maleje wraz ze wzrostem analizowanych częstotliwości, przez co charakteryzują się one większą czułością niż transformata STFT. Obie metody są głównie

wykorzystywane do analizy sygnałów niestacjonarnych, takich jak sygnały drgań i emisji akustycznej. Główny obszar zastosowania transformat STFT i DWT obejmuje analizę sygnału AE w celu identyfikacji przypaleń przedmiotu obrabianego, naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu, czy też identyfikacji zużycia narzędzia ściernego [13].

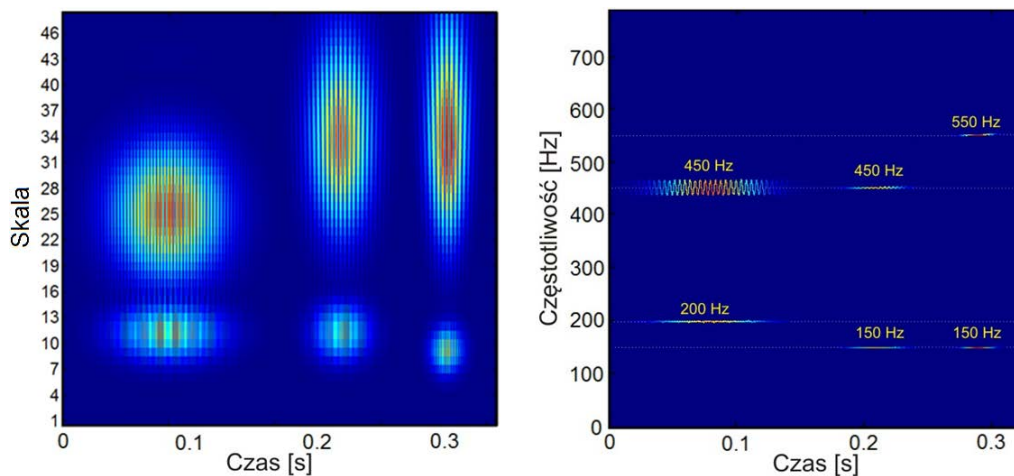


Rys. 4. Zmiany widma surowego sygnału AE podczas szlifowania z wydajnością  $Q'_w = 1.5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$  ( $v_w = 0.2 \text{ m/s}$ ) dla: a) ściernicy ostrej (pierwszy cykl szlifowania); b) ściernicy stopionej (10 cykl szlifowania)

Kolejną metodą przetwarzania sygnałów w dziedzinie czasu i częstotliwości stosowaną w diagnostyce procesu szlifowania, pozwalającą ponadto analizować sygnały nieliniowe, jest transformata Hilberta-Huanga HHT (ang. Hilbert-Huang Transform) [4]. Metoda ta pozwala analizować sygnały, które mogą się zmieniać nawet w ramach jednego okresu oscylacji sygnału. Wykorzystuje ona dwie techniki przetwarzania sygnałów:

- empiryczną dekompozycję sygnału na nieliniowe składowe modalne (ang. Intrinsic Mode Functions IMF), przy czym w przeciwieństwie do typowych składowych harmonicznych funkcje te mogą posiadać zmienną amplitudę oraz częstotliwość w dziedzinie czasu,
- transformatę Hilberta, która wyznacza zmiany amplitudy i częstotliwości poszczególnych składowych modalnych w czasie.

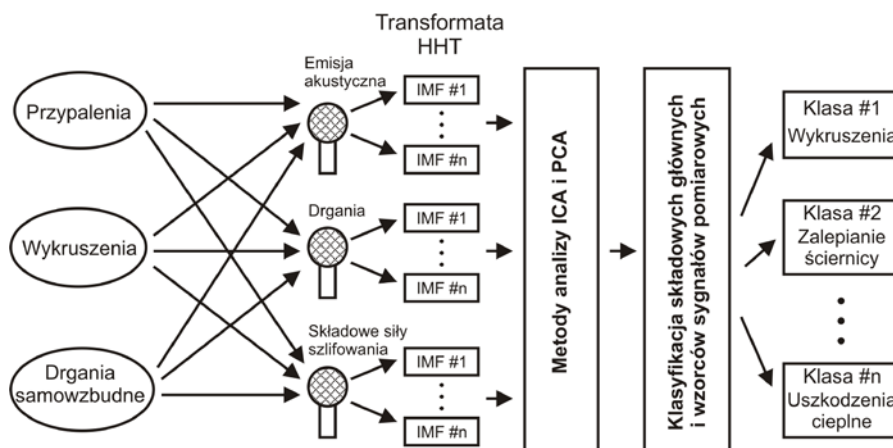
W celu zweryfikowania użyteczności transformaty falkowej i transformaty HHT stworzono sygnał testowy składający się z trzech par interferujących ze sobą narastających i malejących wykładniczo fal sinusoidalnych o różnych częstotliwościach i czasach trwania w celu symulacji długotrwałych i krótkotrwałych, gwałtownie narastających sygnałów, które mogą być znalezione w rejestrowanych przebiegach sygnału emisji akustycznej bądź sygnału drgań. Wyniki przetwarzania tego sygnału dla obu metod przedstawiono na rysunku 5. Widać, że transformata HHT pozwala na bardzo dokładną lokalizację energii zawartej w analizowanym sygnale w dziedzinie czas-częstotliwość.



Rys. 5. Widmo syntetycznego sygnału testowego z zastosowaniem ciągłej transformaty falkowej oraz transformaty HHT

### 3. STRUKTURA SYSTEMU DIAGNOSTYKI

Przedstawione metody przetwarzania sygnałów mogą być podstawą do budowy efektywnych systemów diagnostyki procesu szlifowania. Strukturę inteligentnego systemu wydobywania informacji z danych pomiarowych oraz diagnostyki stanu procesu szlifowania budowanego w Instytucie Obrabiarek i TBM PŁ przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Struktura automatycznego systemu wydobywania informacji z danych pomiarowych oraz diagnostyki stanu procesu szlifowania

Przedstawiony system wykorzystuje w pierwszej kolejności transformatę HHT w celu wyznaczenia kolejnych nieliniowych składowych IMF dla surowego sygnału emisji akustycznej, sygnału drgań oraz sygnałów składowych siły szlifowania. Składowe te zawierają informacje o chwilowej amplitudzie sygnału oraz jego chwilowych częstotliwościach. Dzięki zastosowaniu transformaty HHT wyznaczane są składowe zawierające skokowe zmiany amplitudy, pojawiające się np. podczas procesu wykruszania ziaren ściernych, jak również składowe zawierające powolne zmiany amplitudy, np. związane z rozwojem drgań samowzbudnych ściernicy lub jej zalepianiem. Dla poszczególnych składowych IMF wyznaczane są następnie wybrane cechy statystyczne obejmujące wartość maksymalną sygnału, wartość średnią, odchylenie standardowe, kurtozę, skośność rozkładu sygnału, itp. W następnej kolejności stosowana jest analiza składowych głównych oraz składowych niezależnych w celu zredukowania wymiaru zbioru cech sygnałów bez istotnego obniżenia poziomu informacji zawartej w zredukowanym zbiorze cech [1, 7, 11]. Ostatecznie przeprowadzana jest klasyfikacja wzorców sygnałów w celu ustalenia stanu procesu bądź parametrów wynikowych procesu szlifowania.

#### 4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono i porównano wybrane metody przetwarzania sygnałów pomiarowych oraz przedstawiono budowany system diagnostyki procesu szlifowania kłowego wałków. Wydaje się, że najlepszym podejściem będzie zastosowanie metod przetwarzania w dziedzinie czasu i częstotliwości, np. transformaty HHT. Do budowy systemu diagnostyki planuje się zastosowanie metod hybrydowych, wykorzystujących nieliniowe wersje analizy składowych głównych lub analizy dyskryminacyjnej z metodami modelowania danych takimi jak sieci neuronowe bądź metody regresji. Zastosowanie takiego podejścia umożliwi budowę automatycznych systemów diagnostyki procesu szlifowania oraz jego efektywny nadzór.

*Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

#### LITERATURA

- [1] BAIR E., HASTIE T., PAUL D., TIBSHIRANI R., *Prediction by supervised principal components*. W: Journal of the American Statistical Association. Vol. 101/473, 2006, 119-137.
- [2] CHEN X., GRIFFIN J., *Grinding acoustic emission classification in terms of mechanical behaviours*. W: Key Engineering Materials, Vol. 329, 2007, 15-20.

- [3] HUNDT W., LEUENBERGER D., REHSTEINER F., GYGAX P., *An approach to monitoring of the grinding process using acoustic emission (AE) technique*. W: Annals of the CIRP, Vol. 43/1, 1994, 295-298.
- [4] HUANG N., et al., *The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis*. Proc. Roy. Soc. Lond., 1998.
- [5] HYVÄRINEN A., OJA E., *Independent component analysis: algorithms and applications*. W: Neural Networks, Vol. 13, 2000, 411-430.
- [6] INASAKI I., KARPUSZEWSKI B., LEE H., *Grinding chatter – origin and suppression*. W: Annals of the CIRP, Vol. 50/2, 2001, 515-535.
- [7] JOLLIFFE, I.T., *Principal Component Analysis*. Springer Verlag, New York, 2002.
- [8] KARPUSZEWSKI B., WEHMEIER M., INASAKI I., *Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors*. W: Annals of the CIRP, Vol. 49/1, 2000, 235-240.
- [9] KORBICZ J., KOŚCIELNY J.M., *Modelowanie, diagnostyka i sterowanie nadrzędne procesami*. Warszawa, WNT, 2009.
- [10] LAJMERT P., KRUSZYŃSKI B., *A diagnostic system for cylindrical plunge grinding process based on Hilbert Huang transform and principal component analysis*. W: Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 34/3, 2010, 19-35.
- [11] LAJMERT P., KRUSZYŃSKI B., WRĄBEL D., *Modelowanie zależności w procesie szlifowania kłowego wałków z wykorzystaniem metody analizy składowych głównych i drzew decyzyjnych*. W: Mechanik nr 8-9, 2012.
- [12] LAJMERT P., KRUSZYŃSKI B., WRĄBEL D., SIKORA M., *Stanowisko do wieloaspektowego badania procesu szlifowania kłowego wałków*. W: Mechanik 8-9, 2013, 273-282.
- [13] LIAO T. W. TING C., QU J., BLAU P.J., *A wavelet-based methodology for grinding wheel condition monitoring*. W: International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.47, 2007, 580-592.
- [14] LIAO T., *Feature extraction and selection from acoustic emission signals with an application in grinding wheel condition monitoring*. W: Journal Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 23/1, 2010, 74-84.
- [15] WEBSTER J., MARINESCU I., *Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding*. W: Annals of the CIRP, Vol. 43/1, 1994, 299-304.
- [16] WEGENER K., HOFFMEISTER H.-W., KARPUSCHEWSKI B., KUSTER F., HAHMANN W.-C., RABIEY M., *Conditioning and monitoring of grinding wheels*. W: Annals of the CIRP, Vol. 60/2, 2011, 757-777.



## **STANOWISKO DO BADANIA PROCESU SZLIFOWANIA WGŁĘBNEGO WAŁKÓW**

Paweł LAJMERT<sup>1</sup>, Dariusz OSTROWSKI<sup>1</sup>, Małgorzata SIKORA<sup>1</sup>,  
Bogdan KRUSZYŃSKI<sup>1</sup>

### **1. WSTĘP**

Niezbędnym warunkiem realizacji wiarygodnych badań dowolnego procesu szlifowania jest wyposażenie stanowiska badawczego w odpowiednio zintegrowane zespoły pomiarowe i sterujące [9]. Wybór właściwych układów pomiarowych stanowi podstawę do monitorowania wielu wielkości towarzyszących procesowi szlifowania, w których zawarta jest informacja o jego stanie, co w efekcie pozwala na przewidywanie niepożądanych stanów procesu oraz przewidywanie parametrów wynikowych obrabianych przedmiotów [1, 3, 4, 6]. W pracy omówiono przyjętą strukturę autorskiego układu sterowania stanowiska do badania procesu szlifowania kłowego wałków. Następnie przedstawiono opis urządzeń kontrolnych i pomiarowych wchodzących w skład zastosowanych torów pomiarowych i omówiono przykładowe wyniki badań. Badania prowadzono dla różnych warunków szlifowania, tj. dla optymalnych warunków szlifowania, w strefie uszkodzeń cieplnych przedmiotu oraz w strefie drgań regeneracyjnych ściernicy. Podczas badań szlifowano próbki w postaci pierścieni o średnicy 70 mm i szerokości 15 mm wykonane ze stali stopowej 38HMJ ulepszonej do  $50\pm 2$  HRC mocowane na trzpieniu. Zastosowano ściernicę ceramiczną z ziarnem mikrokryształicznym 3HA060J8V114 firmy Molemab. Prędkość szlifowania wynosiła 35 m/s. Badania prowadzono w uproszczonych cyklach szlifowania, w których zeszlifowywano około  $22 \text{ mm}^3/\text{mm}$  materiału.

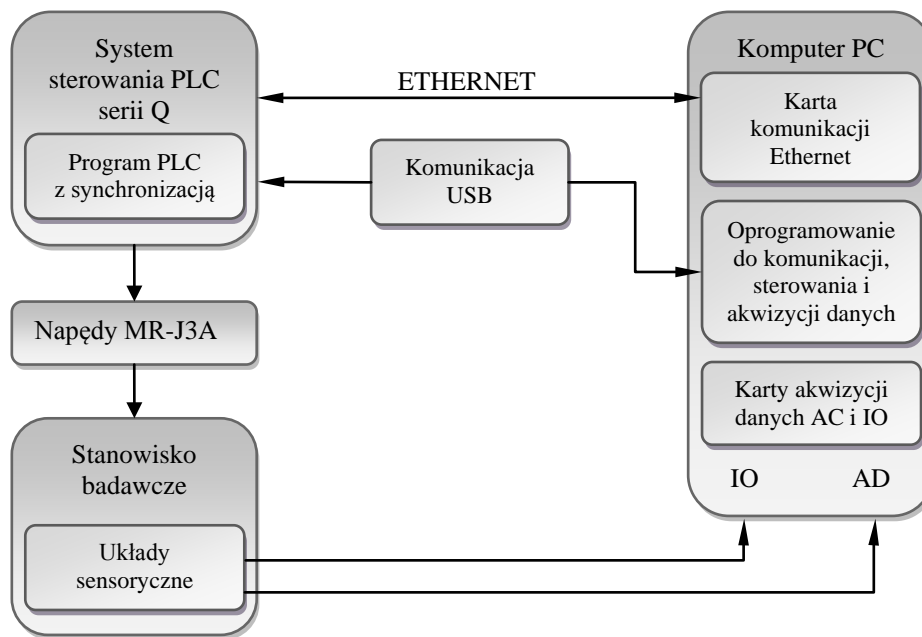
### **2. OGÓLNA BUDOWA UKŁADU STEROWANIA**

Układ sterowania zbudowanego stanowiska do szlifowania wgłębnego wałków

---

<sup>1</sup> Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i TBM, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

oparto o zaawansowany sterownik PLC serii Q Mitsubishi oraz pulpit dotykowy GOT. Schemat blokowy struktury systemu sterowania pracą zespołów napędowych oraz układów diagnostycznych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Ogólna struktura systemu sterowania

Autorskie oprogramowanie dla sterownika PLC oraz panelu operatora pozwala na edycję parametrów maszynowych, programów NC, bieżącą modyfikację parametrów obróbki w kolejnych fazach cyklu szlifowania oraz bezpośrednie sterowanie położeniem i prędkością wszystkich układów napędowych poprzez interfejs Ethernet z zewnętrznego nadrzędnego komputera PC.

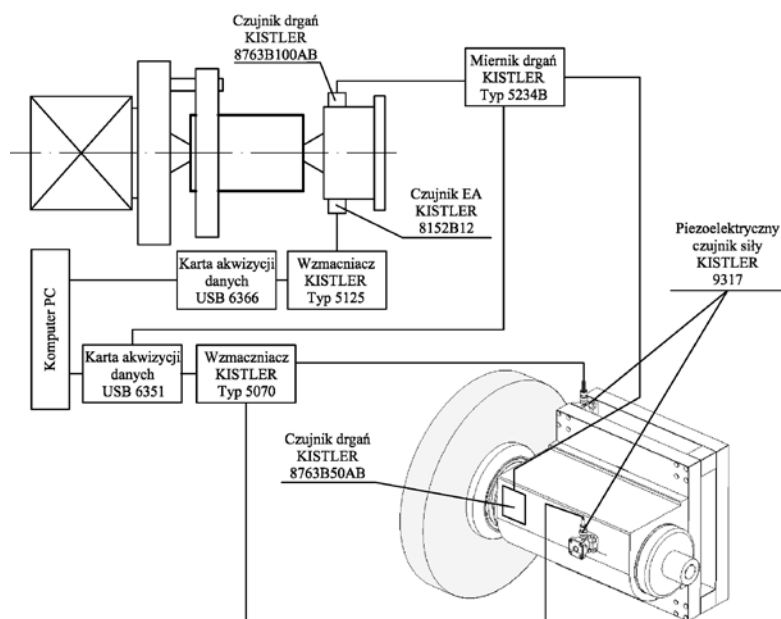
### 3. STRUKTURA UKŁADÓW MONITOROWANIA PROCESU SZLIFOWANIA

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury oraz dotychczasowych badań własnych [5, 6, 9] wybrano potencjalnie użyteczne sygnały pomiarowe, kierując się przy tym możliwością montażu układów pomiarowych na szlifiernie. Przyjęto, że układ monitorowania stanu procesu powinien obejmować następujące sygnały rejestrowane w trakcie trwania prób szlifowania w sposób ciągły:

- pomiar sygnału drgań na kle konika oraz na wrzecienniku ściernicy,
- pomiar sygnału emisji akustycznej (AE) na kle konika,
- pomiar składowych siły szlifowania,

- pomiar momentu,
- pomiar mocy szlifowania.

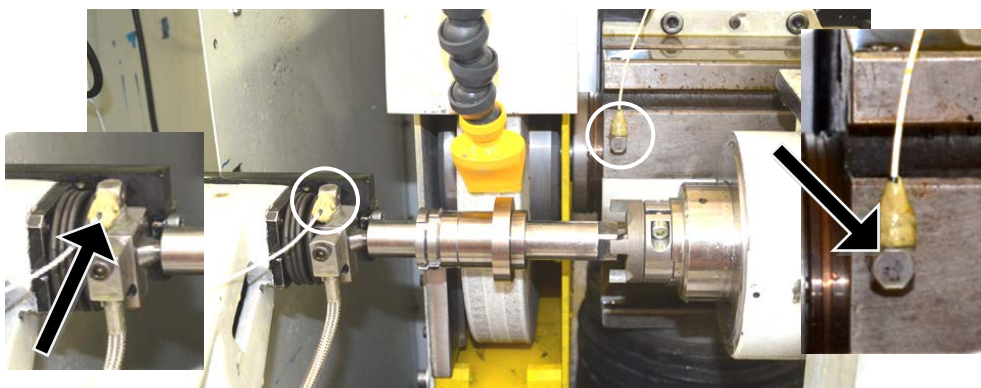
Na rysunku 2 przedstawiono strukturę zastosowanych układów pomiarowych.



Rys. 2. Struktura układów pomiarowych stanowiska badawczego

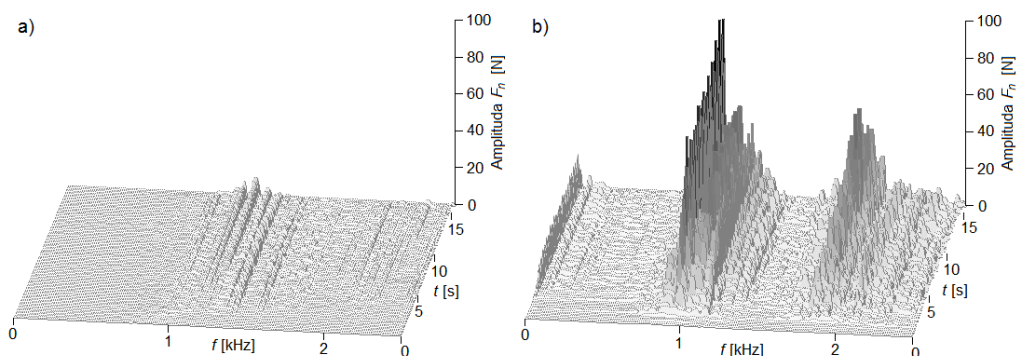
### 3.1. UKŁADY POMIARU DRGAŃ

W celu pomiaru sygnału drgań zastosowano trzyosiowe akcelerometry firmy Kistler typ 8763B100 oraz 8763B050 zamocowane odpowiednio na kle konika szlifierki oraz na przedniej ścianie korpusu wrzeciennika ściernicy w osi wrzeciona. Takie umiejscowienie czujników podyktowane było między innymi wymogiem uzyskania możliwie największego stosunku sygnału użytecznego do szumu oraz z fizycznej możliwości zamocowania ich na szlifierce. W przypadku czujnika zamocowanego na wrzecienniku ściernicy zachowany został ponadto warunek stałej odległości od strefy skrawania dla wszystkich przypadków technologicznych. Na rysunku 3 przedstawiono widok zamontowanych czujników drgań na wrzecienniku ściernicy i kle konika. Sygnały drgań z obu czujników kondycjonowano z wykorzystaniem wzmacniacza Kistler typ 5134B. Ponieważ pasma przenoszenia czujników wynosiły 7 kHz sygnały pomiarowe były następnie poddawane filtracji przy użyciu filtra antyaliasingowego o wartości 10 kHz.



Rys. 3. Umiejscowienie czujników drgań na wrzecienniku ściernicy i koniku

Z każdego czujnika rejestrowano składowe sygnały drgań w kierunku stycznym i normalnym do wektora prędkości dosuwu wrzeciona ściernicy. Do rejestracji składowych sygnałów drgań wykorzystano kartę akwizycji danych NI USB 6351. Składowe sygnały drgań były rejestrowane w sposób ciągły z częstotliwością 40 kHz. Na rysunku 4 przedstawiono widmo składowej normalnej sygnału drgań zarejestrowanego na kle konika.



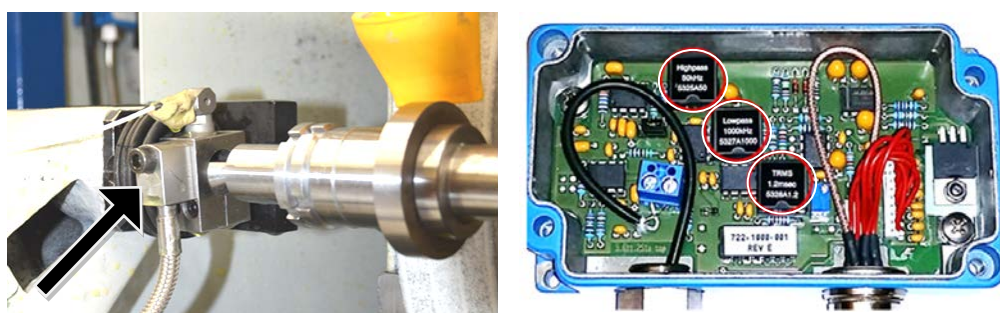
Rys. 4. Widmo normalnej składowej sygnału drgań zarejestrowanego na kle konika podczas szlifowania z wydajnością  $Q'_w = 1.5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$  ( $v_w = 0.2 \text{ m/s}$ ) dla: a) ściernicy ostrej i b) stopionej (10 cykl szlifowania po zeszlifowaniu  $V'_w = 220 \text{ mm}^3/\text{mm}$ )

Z przedstawionych wykresów wynika, że w sygnale drgań znajdują się różne składowe częstotliwościowe, będące częstościami drgań własnych szlifowanego wałka i struktury obrabiarki. Utrudnia to wykorzystanie tego sygnału do prognozowania makrogeometrii ściernicy, czy falistości przedmiotu.

### 3.2. UKŁAD POMIARU SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ

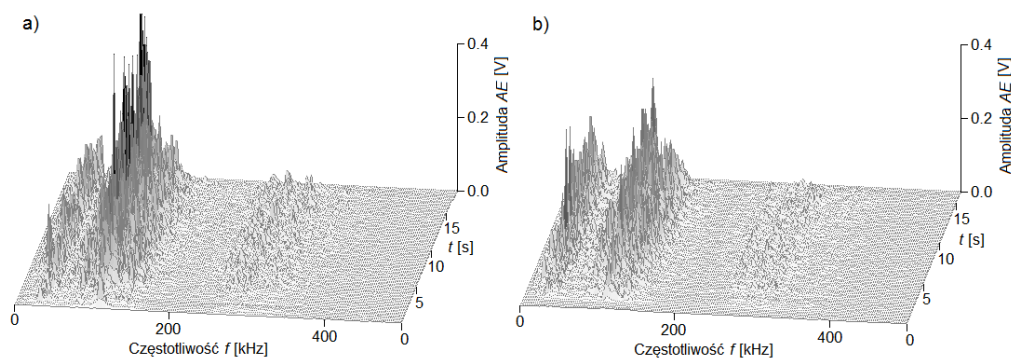
Kolejnym z sygnałów pozwalających scharakteryzować proces szlifowania jest sygnał emisji akustycznej. Jest on szczególnie często wykorzystywany do monitorowania stanu narzędzia ściernego (mikro-geometrii czynnej powierzchni ściernicy CPS), identyfikacji uszkodzeń cieplnych i estymacji parametrów warstwy wierzchniej przedmiotu [1, 4, 7, 8].

Do rejestracji sygnału emisji akustycznej wykorzystano małogabarytowy przewodowy czujnik AE firmy Kistler 8152B12. Widok zainstalowanego czujnika oraz dedykowanego wzmacniacza typ 5125A przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Widok czujnika emisji akustycznej na kle konika oraz wzmacniacza Kistler typ 5125A wraz z filtrami dla surowego sygnału AE i przetwornikiem wyznaczającym sygnał wartości skutecznej  $AE_{rms}$

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe wykresy zmian widma surowego sygnału AE dla ściernicy ostrej i stępionej odpowiadające warunkom z rysunku 4. Widać, że w przypadku ściernicy stępionej, z powodu jej zalepienia, amplituda sygnału AE maleje, co może być miarą jej zużycia.



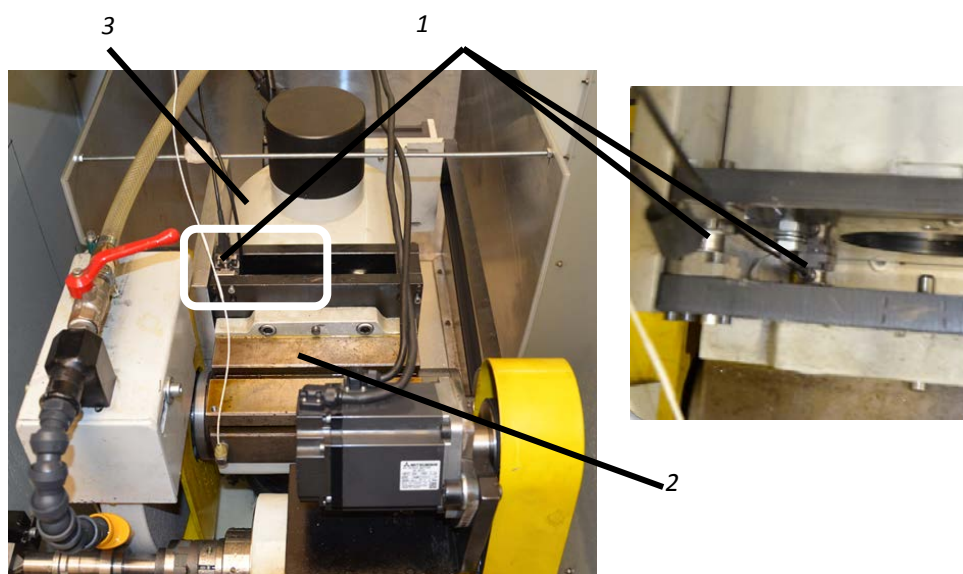
Rys. 6. Widmo surowego sygnału emisji akustycznej AE dla ściernicy: a) ostrej; b) stępionej

Wybór tego czujnika oraz jego umiejscowienia był podyktowany względami praktycznymi związanymi z montażem możliwe blisko strefy skrawania. Surowy sygnał emisji akustycznej oraz jego wartość skuteczną rejestrowano z wykorzystaniem karty pomiarowej NI USB 6366 w sposób ciągły z częstotliwością wynoszącą 2 MHz.

### 3.3. UKŁAD POMIARU SKŁADOWYCH SIŁY SZLIFOWANIA ORAZ MOCY SZLIFOWANIA

W celu uzyskania pełnego obrazu zjawisk zachodzących w procesie szlifowania równoległe z pomiarami sygnału drgań i emisji akustycznej dokonywane były pomiary składowych siły oraz mocy szlifowania.

Do pomiaru składowych siły szlifowania zastosowano piezoelektryczne trójosiowe czujniki siły firmy Kistler 9317B. Czujniki te umieszczono pomiędzy korpusem obudowy wrzeciona ściernicy a korpusem obrotnicy szlifierki. Sposób zamocowania czujników przedstawiono na rysunku 7. Należy tutaj nadmienić, że montaż tych czujników wymagał największej ingerencji w układ konstrukcyjny wrzeciennika ściernicy.

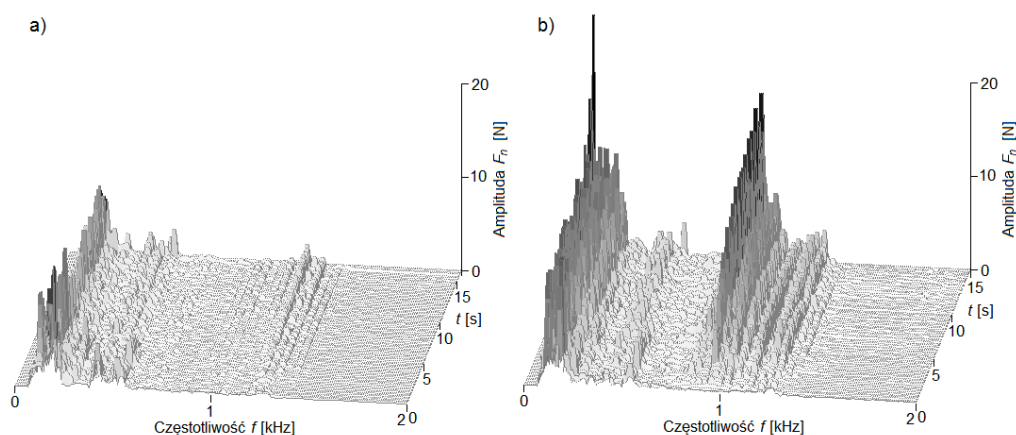


Rys. 7. Umiejscowienie czujników siły: 1 – piezoelektryczne czujniki siły, 2 – obudowa wrzeciona ściernicy, 3 – obrotnica szlifierki)

Sygnały pomiarowe składowych siły szlifowania były rejestrowane w sposób ciągły z częstotliwością 40 kHz przy wykorzystaniu karty pomiarowej NI USB 6351. Opracowany układ pomiarowy pozwala na pomiar zarówno składowych statycznych jak i dynamicznych siły szlifowania w zakresie do około 2 kHz.



Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe zmiany widma składowej normalnej siły szlifowania dla ściernicy ostrej i stępionej po zeszlifowaniu około  $220 \text{ mm}^3/\text{mm}$  materiału podczas szlifowania w warunkach drgań regeneracyjnych na ściernicy. Widać, że z powodu rozwoju falistości na ściernicy amplituda sygnału składowej odporowej rośnie w dwóch zakresach częstotliwości. Drugi zakres od około 0.8 do 1.3 kHz związany jest drganiami regeneracyjnymi na ściernicy.



Rys. 8. Zmiany widma sygnału składowej normalnej siły szlifowania podczas szlifowania z wydajnością  $Q'_w = 1.5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$  ( $v_w = 0.2 \text{ m/s}$ ) dla: a) ściernicy ostrej i b) stępionej (10 cykl szlifowania po zeszlifowaniu  $V'_w = 220 \text{ mm}^3/\text{mm}$ )

Ponadto zbudowane stanowisko pozwala na pomiar mocy szlifowania i momentu na wrzecionie przedmiotu w postaci sygnału napięciowego generowanego przez wzmacniacze napędu wrzeciona ściernicy i przedmiotu. Moment rejestrowany na wrzecionie przedmiotu pozwala przy znajomości średnicy przedmiotu na estymację składowej stycznej siły szlifowania.

#### 4. WNIOSKI

W artykule omówiono stanowisko do badania procesu szlifowania kłowego wałków. Przyjęty zestaw sygnałów pomiarowych może być z powodzeniem zastosowany do identyfikacji niepożądanych stanów, takich jak stępienie ściernicy, praca w strefie uszkodzeń cieplnych czy drgania samowzbudne oraz do estymacji parametrów wynikowych procesu szlifowania. Wymaga to jednak zastosowania zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów niestacjonarnych i nieliniowych oraz wyznaczenia odpowiednich cech tych sygnałów skorelowanych z różnymi stanami procesu [2]. Zbudowane stanowisko badawcze oraz uzyskane wyniki badań będą podstawą do opracowania inteligentnego systemu szlifowania kłowego wałków.

*Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

#### LITERATURA

- [1] CHEN X., GRIFFIN J., *Grinding acoustic emission classification in terms of mechanical behaviours*. Key Engineering Materials, Vol. 329, 2007, 15-20.
- [2] HUANG N., et al., *The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis*. Proc. Roy. Soc. Lond., 1998.
- [3] INASAKI I., KARPUSZEWSKI B., LEE H.-S., *Grinding chatter – origin and suppression*. W: Annals of the CIRP Vol. 50/2, 2001, 515-534.
- [4] KARPUSZEWSKI B., WEHMEIER M., INASAKI I., *Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors*. W: Annals of the CIRP Vol. 49/1, 2000, 235-240.
- [5] LAJMERT P., KRUSZYŃSKI B., *A diagnostic system for cylindrical plunge grinding process based on Hilbert Huang transform and principal component analysis*. W: Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 34/3, 2010, 19-35.
- [6] LAJMERT P., KRUSZYŃSKI B., WRĄBEL D., *Modelowanie zależności w procesie szlifowania kłowego wałków z wykorzystaniem metody analizy składowych głównych i drzew decyzyjnych*. W. Mechanik nr 8-9, 2012.
- [7] LIU Q., GINDY N., *Investigating of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn*. W: Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, 2006, 284-292.
- [8] WANG Z., WILLET P., DEAGUIAR P., R., WEBSTER J., *Neural network detection of grinding burn from acoustic emission*. W: Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 41, 2001, 283-309.
- [9] WEGENER K., HOFFMEISTER H.-W., KARPUSCHEWSKI B., KUSTER F., HAHMANN W.-C., RABIEY M., *Conditioning and monitoring of grinding wheels*. W: Annals of the CIRP, Vol. 60/2, 2011, 757-777.



# FILTRACJA MORFOLOGICZNA W POMIARACH POWIERZCHNI USZKODZONYCH

Aneta ŁĘTOCHA<sup>1</sup>, Tatiana MILLER<sup>1</sup>

## 1. WSTĘP

Obecnie najpopularniejszą metodą filtracji stosowaną w analizie sygnałów mierzonych powierzchni jest filtracja Gaussa. Kilka lat temu wprowadzone zostały nowe typy filtrów: odporny regresji Gaussa, falkowy, funkcjami sklejanymi, odporny funkcjami sklejanymi oraz morfologiczny. Każdy z nich charakteryzuje odmienny algorytm obliczania profilu chropowatości i falistości. Biorąc pod uwagę tę różnorodność warto zastanowić się nad dodatkowymi możliwościami analizy danych, jakie dają nowe metody filtracji. Filtry morfologiczne mogą być wykorzystywane np. do wstępnej filtracji profilu zmierzonego – w celu usunięcia przekłamań w postaci pików, pojawiających się często w pomiarach wykonywanych metodami optycznymi. Innym przykładem zastosowania może być filtrowanie powierzchni uszkodzonych. Przykłady takiego zastosowania przedstawiono w referacie.

## 2. MORFOLOGICZNY FILTR DYSKOWY

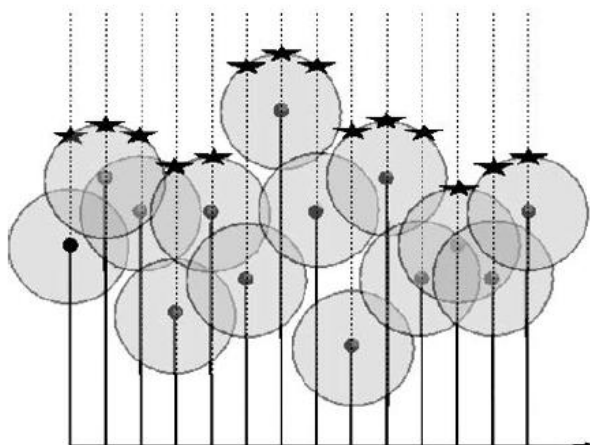
Filtracja morfologiczna oparta jest na otaczaniu za pomocą elementu strukturyzującego profilu zmierzonego. W normach dotyczących filtrów morfologicznych przedstawione są dwa takie elementy – linia prosta i dysk, który jest zalecany do praktycznego stosowania. Filtry morfologiczne złożone są z kombinacji operacji morfologicznych, które można podzielić na pierwszego (poszerzenie i erozja) oraz drugiego rzędu (otwieranie i zamykanie). Operacje drugiego rzędu są jednocześnie najmniej złożonymi filtrami morfologicznymi.

---

<sup>1</sup> Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, ul. Wrocławska 37a, 30-011 Kraków,  
[aneta.letocha@ios.krakow.pl](mailto:aneta.letocha@ios.krakow.pl) [tatiana.miller@ios.krakow.pl](mailto:tatiana.miller@ios.krakow.pl)

W filtracji morfologicznej wykorzystywane są specjalne obliczenia przekształcające zmierzony profil oraz powierzchnię w zbiory na których wykonywane są działania z użyciem innego zbioru – elementu strukturyzującego. Nie ma zastosowania natomiast twierdzenie opisujące operacje i filtry morfologiczne, które byłoby równoważne twierdzeniu Nyquista (filtracja Gaussa). Dla filtrów i operacji morfologicznych nie można znaleźć uniwersalnego, równoodległego próbkowania nie powodującego utraty danych [3,4,6].

Jedną z operacji pierwszego rzędu jest poszerzenie. Polega na dodaniu dysku lub kuli o zadanym promieniu do profilu lub powierzchni zmierzonej. W każdym zmierzonym punkcie umieszczany jest środek dysku, następnie wszystkie dyski są sumowane, a dla każdego punktu przypisywana jest odpowiadająca mu wartość maksymalna, tak jak to zobrazowano na rysunku 1 [3,4,6].

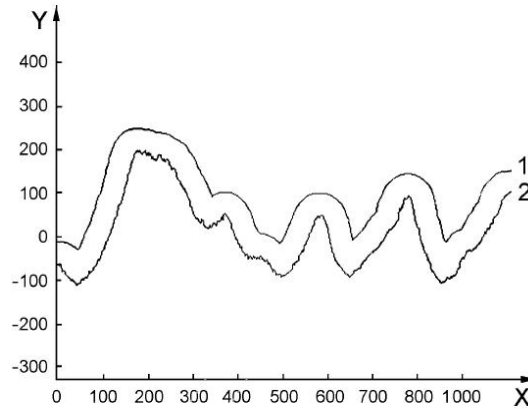


Rys. 1. Ilustracja działania operacji poszerzenia za pomocą dysku [4]

Poszerzenie określane jest wzorem ( $P$  – poszerzenie,  $A$  – zbiór punktów zmierzonych,  $B$  – dysk) [3]:

$$P(A,B) = A \oplus B \tag{1}$$

Efekt końcowy morfologicznej operacji poszerzenia znajduje się powyżej profilu pierwotnego, przedstawiono to na rysunku 2.

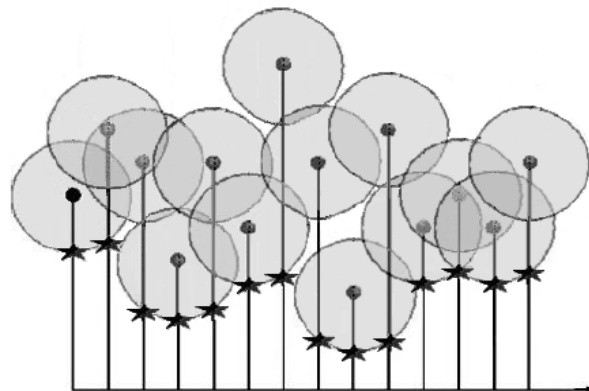


Rys. 2. Operacja morfologiczna – poszerzenie: 1 – wynik, 2 – profil pierwotny [3]

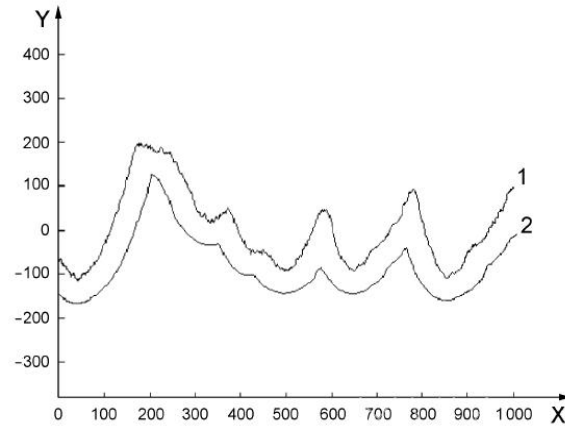
Erozja jest drugą operacją morfologiczną pierwszego rzędu, opartą na odejmowaniu kuli lub dysku o znanym promieniu od powierzchni lub profilu zmierzonego. W każdym zmierzonym punkcie umieszczany jest środek dysku, następnie wszystkie dyski są sumowane, a dla każdego punktu przypisywana jest odpowiadająca mu wartość minimalna, tak jak to przedstawiono na rysunku 3. Efekt końcowy morfologicznej operacji erozji znajduje się poniżej profilu pierwotnego, przedstawiono to na rysunku 4. Erozja określana jest wzorem (E – erozja, A – zbiór punktów zmierzonych, B – dysk) [3,4,6]:

$$E(A,B) = A \ominus B$$

(2)



Rys. 3. Ilustracja działania operacji erozji za pomocą dysku

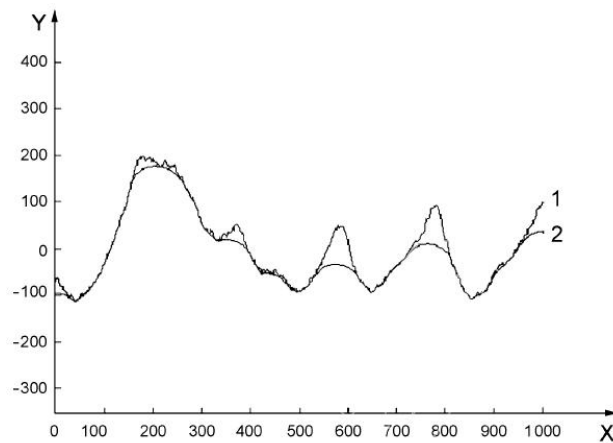


Rys. 4. Operacja morfologiczna – erozja: 1 – profil pierwotny, 2 – wynik [3]

Aby uzyskać filtr otwierania (operację otwierania) konieczne jest wykonanie: erozji, a następnie poszerzenia. Efekt końcowy otwierania znajduje się poniżej profilu pierwotnego, tak jak to pokazano na rysunku 5. Otwieranie określane jest wzorem (O – otwieranie, A – zbiór punktów zmierzonych, B – dysk, P – poszerzenie, E – erozja) [3]:

$$O(A,B) = P(E(A,B),B)$$

(3)

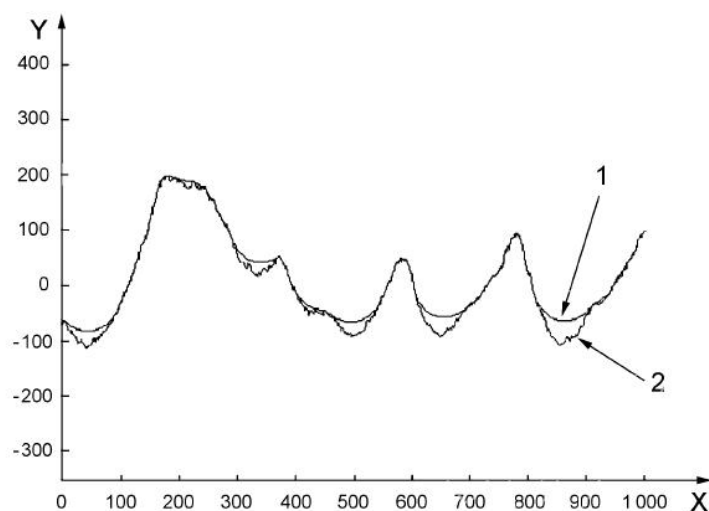


Rys. 5. Filtr morfologiczny – otwieranie: 1 – profil pierwotny, 2 – wynik [3]

Filtr zamykania uzyskamy, gdy wykonane zostanie poszerzenie, a następnie erozja. Wynik zamykania znajduje się powyżej profilu pierwotnego, tak jak przedstawiono na rysunku 6.

Zamykanie określane jest wzorem (Z – zamykanie, A – zbiór punktów zmierzonych, B – dysk, E – erozja, P – poszerzenie) [3]:

$$Z(A, B) = E(P(A, B), B) \quad (4)$$



Rys. 6. Filtr morfologiczny – zamykanie: 1 – wynik, 2 – profil pierwotny [3]

Aby wyeliminować zarówno wzniesienia, jak i wgłębienia w tym samym czasie musimy odpowiednio połączyć operacje morfologiczne drugiego rzędu. Jedną z możliwości jest wykonanie otwierania, a następnie zamykania.

Oznaczenia filtrów morfologicznych: zamykania dyskiem – FPMCD, otwierania dyskiem – FPMOD, naprzemienny dyskiem – FPMAD [4,5].

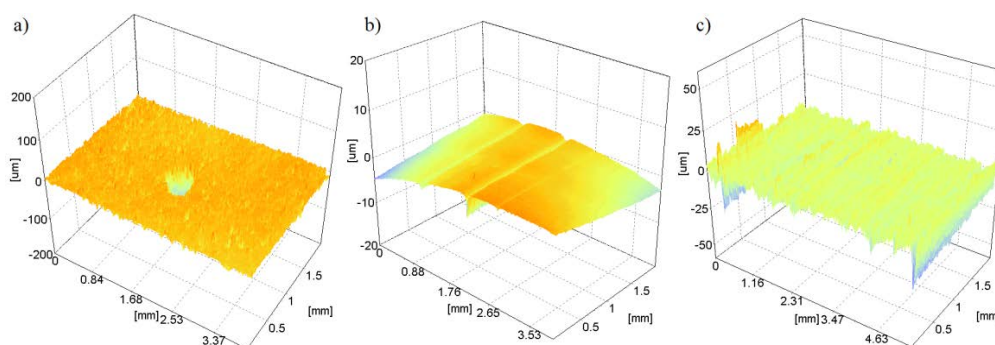
Podczas analizy z użyciem filtrów morfologicznych należy pamiętać, że promień użytego dysku filtru powinien być większy lub równy promieniowi końcówki wykorzystanego czujnika pomiarowego.

Promień dysku filtru morfologicznego, zgodnie z informacjami zawartymi w projektach norm powinien być wybierany z podanego szeregu logarytmicznego [4,5]:

... 1  $\mu$ m, 2  $\mu$ m, 5  $\mu$ m, 10  $\mu$ m, 20  $\mu$ m, 50  $\mu$ m, 100  $\mu$ m, 200  $\mu$ m, 500  $\mu$ m, 1 mm, 2 mm, 5 mm, 10 mm, ...

### 3. PRZEPROWADZONE BADANIA

Pomiary zostały przeprowadzone z użyciem stykowego profilometru TOPO 01P konstrukcji Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania wyposażonego w głowicę indukcyjną z końcówką diamentową o promieniu  $2\ \mu\text{m}$ . Wykonano pomiary powierzchni próbek ceramicznych oraz stalowej szlifowanej w obszarach zawierających uszkodzenia w postaci zarysowań lub wykruszeń. Rysunek 7 przedstawia widoki 3D zmierzonych powierzchni.

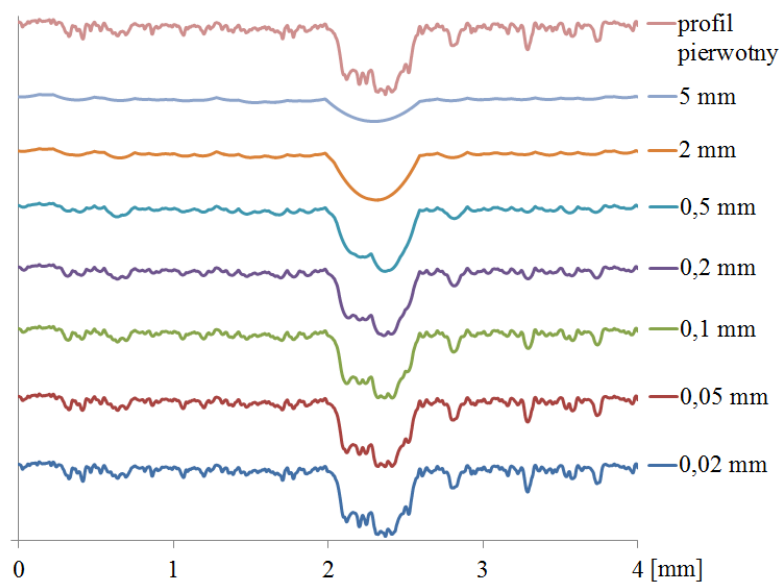


Rys. 7. Zmierzone powierzchnie: a) ceramiczna zawierająca wykruszenie, b) ceramiczna zawierająca rysy, c) stalowa szlifowana zawierająca rysy

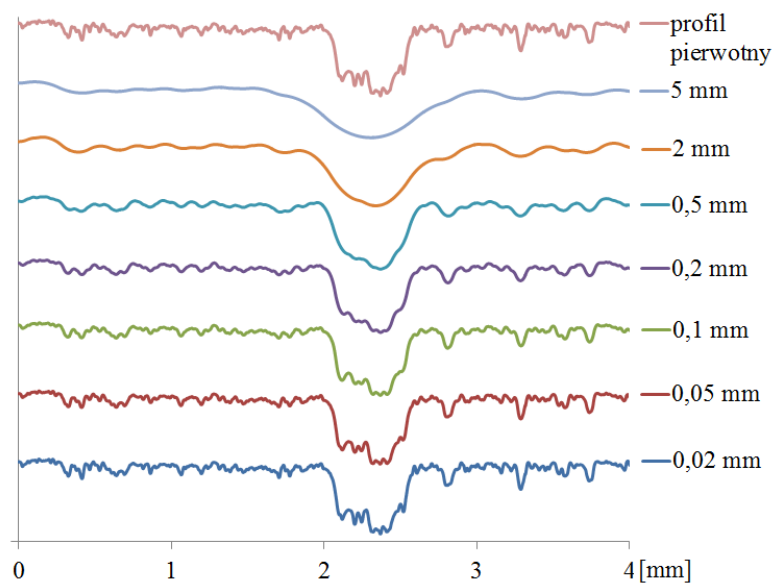
Wyniki przekształcono w serie profili. Analizę pomiarów przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania Topografia (IZTW) oraz AltıMAP (Altımet). Wykorzystano dyskowy filtr morfologiczny zamykania oraz naprzemienny dyskowy filtr morfologiczny składający się z następującej sekwencji operacji morfologicznych: otwieranie i zamykanie. Wybrano wartości promieni dysków: 0,02 mm; 0,05 mm; 0,1 mm; 0,2 mm, 0,5 mm; 2 mm oraz 5 mm.

### 4. WYNIKI

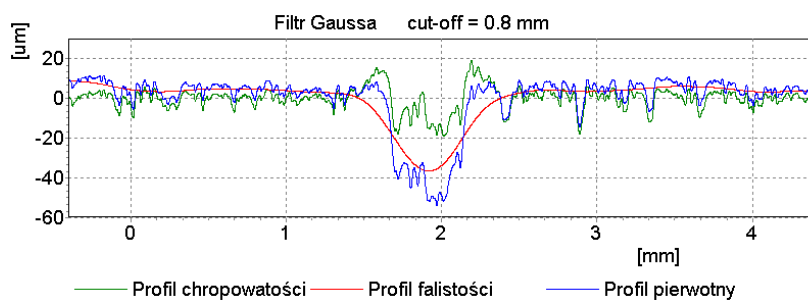
Rysunki 8 oraz 9 przedstawiają profil powierzchni ceramicznej zawierającej wykruszenie, który poddano filtracji morfologicznej zamykania oraz naprzemienną filtracji morfologicznej z zastosowaniem różnych wartości promienia dysku. Rysunki 10 i 11 przedstawiają te same profile, po zastosowaniu filtracji Gaussa z wartością fali cut-off wynoszącą 0,8 mm.



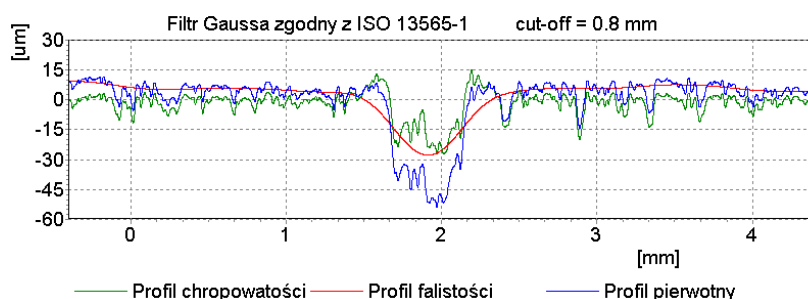
Rys. 8. Profil chropowatości próbki ceramicznej zawierający wykruszenie, po zastosowaniu filtra morfologicznego zamykania z użyciem różnych wartości promienia dysku



Rys. 9. Profil chropowatości próbki ceramicznej zawierający wykruszenie, po zastosowaniu naprzemiennego filtra morfologicznego z użyciem różnych wartości promienia dysku



Rys. 10. Profil powierzchni ceramicznej zawierający wykruszenie, po zastosowaniu filtracji Gaussa zgodnej z ISO 16610-21

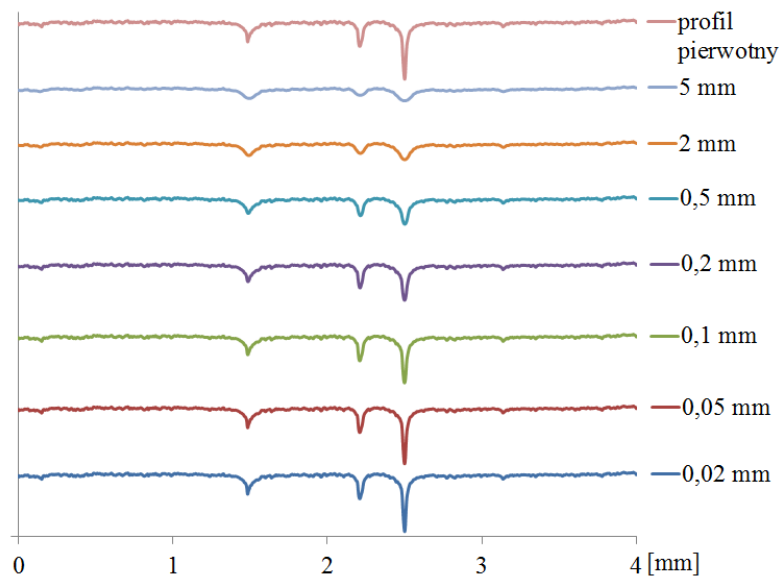


Rys. 11. Profil powierzchni ceramicznej zawierający wykruszenia, po zastosowaniu filtru Gaussa zgodnego z ISO 13565-1

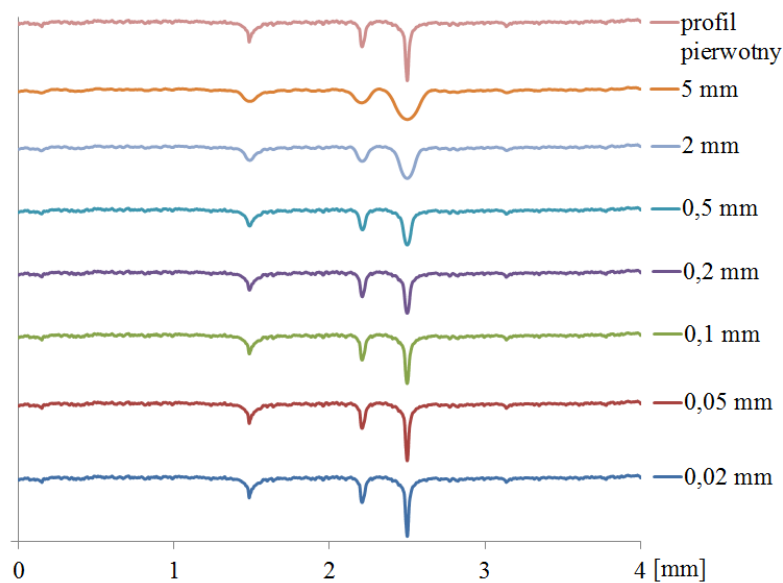
Istotną różnicę, którą można zauważyć jest kształt profilu chropowatości w okolicach uszkodzenia. Po zastosowaniu filtracji Gaussa, zarówno zgodnej z normą ISO 16610-21, jak i z ISO 13565-1 profil chropowatości jest podniesiony do góry, na brzegach uszkodzenia pojawiają się wzniesienia, które nie występują na profilu pierwotnym. Natomiast, gdy stosowane są obie metody filtracji morfologicznej, przekłamanie takie nie występuje.

Rysunki 12 oraz 13 przedstawiają profil powierzchni ceramicznej zawierającej rysy, który poddano filtracji morfologicznej zamykania oraz naprzemiennej filtracji morfologicznej z zastosowaniem różnych wartości promienia dysku. Rysunki 14 i 15 przedstawiają te same profile, po zastosowaniu filtracji Gaussa z wartością fali cut-off wynoszącą 0,25 mm.

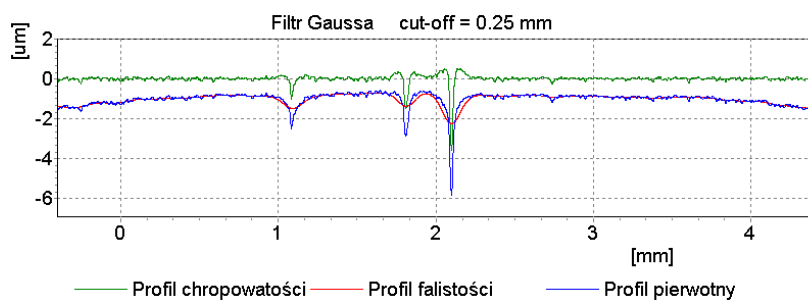




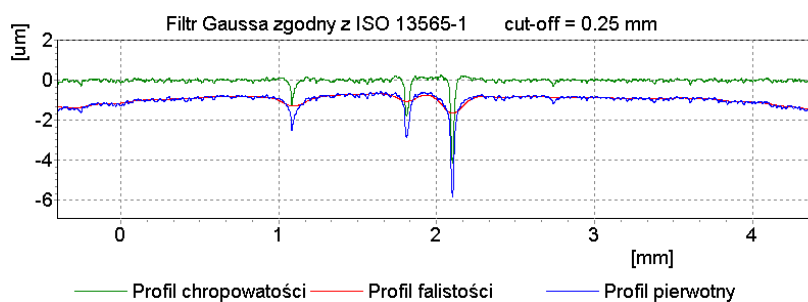
Rys. 12. Profil chropowatości próbki ceramicznej zawierający rysy, po zastosowaniu filtru morfologicznego zamykania z użyciem różnych wartości promienia dysku



Rys. 13. Profil chropowatości próbki ceramicznej zawierający rysy, po zastosowaniu naprzemiannego filtru morfologicznego z użyciem różnych wartości promienia dysku



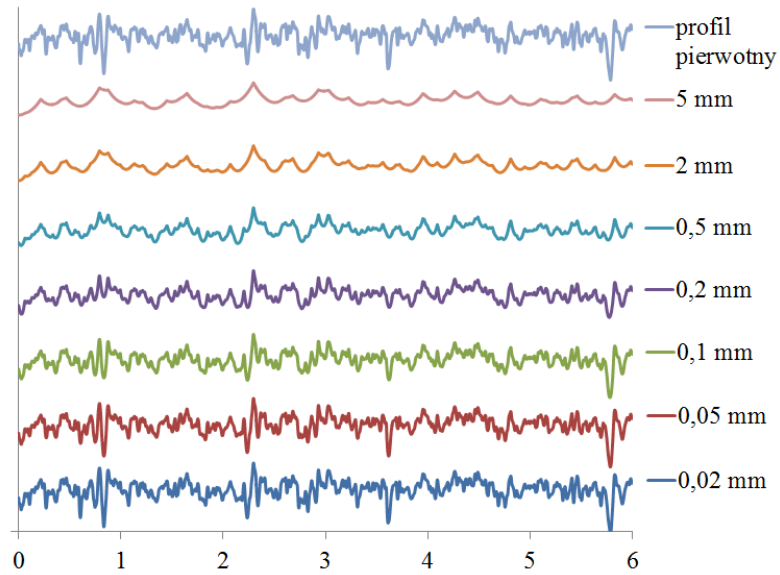
Rys. 14. Profil powierzchni próbki ceramicznej zawierający rysy, po zastosowaniu filtracji Gaussa zgodnej z ISO 16610-21



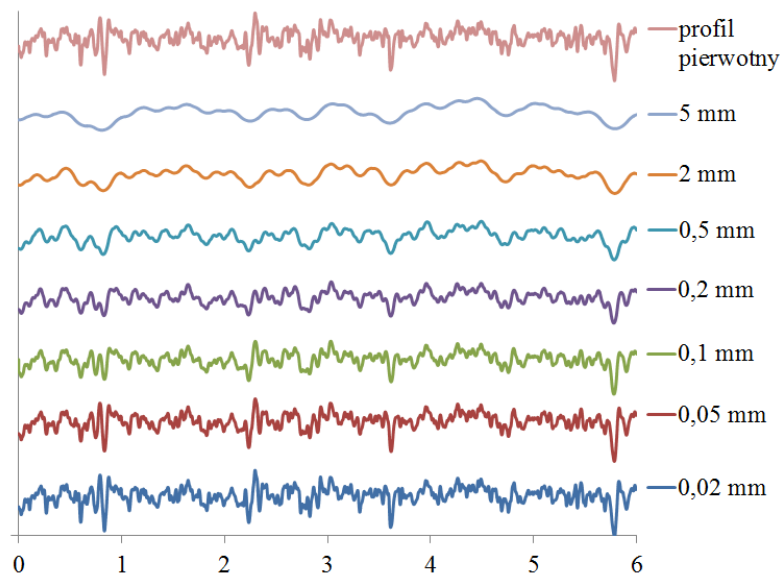
Rys. 15. Profil powierzchni ceramicznej zawierający rysy, po zastosowaniu filtru Gaussa zgodnego z normą ISO 13565-1

Również w tym przypadku, można zauważyć przekłamania w profilu chropowatości uzyskanym z użyciem filtracji Gaussa, jak to było dla poprzedniej próbki. Natomiast filtracja morfologiczna ponownie nie zniekształciła zmierzonego profilu.

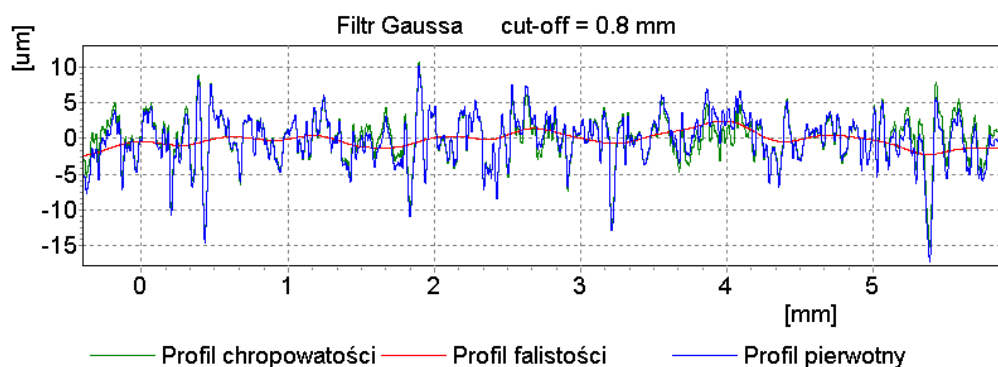
Rysunki 16 oraz 17 przedstawiają profil powierzchni stalowej szlifowanej zawierającej rysy, który poddano filtracji morfologicznej zamykania oraz naprzemiennej filtracji morfologicznej z zastosowaniem różnych wartości promienia dysku. Rysunki 18 i 19 przedstawiają te same profile, po zastosowaniu filtracji Gaussa z wartością fali cut-off wynoszącą 0,8 mm.



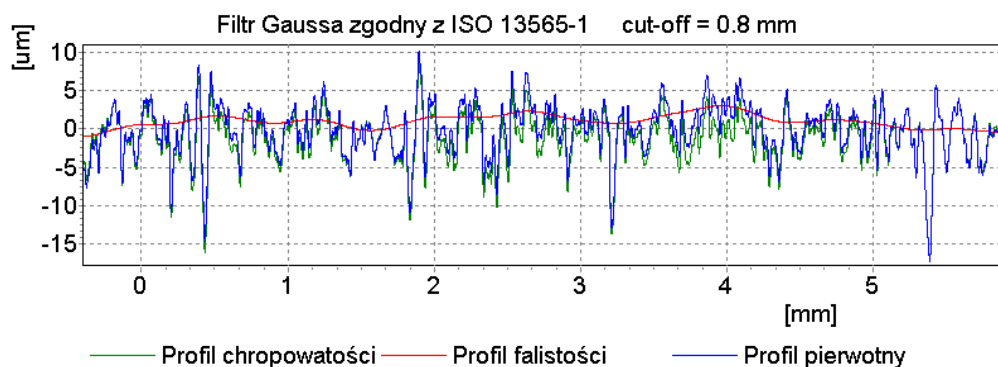
Rys. 16. Profil chropowatości próbki stalowej, szlifowanej zawierający rysy, po zastosowaniu filtru morfologicznego zamykania z użyciem różnych wartości promienia dysku



Rys. 17. Profil chropowatości próbki stalowej, szlifowanej, po zastosowaniu naprzemiennego filtru morfologicznego z użyciem różnych wartości promienia dysku



Rys. 18. Profil powierzchni stalowej szlifowanej zawierający rysy, po zastosowaniu filtracji Gaussa zgodnej z ISO 16610-21



Rys. 19. Profil powierzchni stalowej szlifowanej zawierający rysy, po zastosowaniu filtru Gaussa zgodnego z ISO 13565-1

## 5. WNIOSKI

Filtr Gaussa cechuje próbkowanie zgodne z twierdzeniem Nyquista umożliwiające rekonstrukcję profilu przefiltrowanego, ale jego użycie wiąże się z występowaniem efektów końcowych. Aby tego uniknąć konieczne jest dodawanie do analizy danych dodatkowych odcinków lub obszarów metodami zgodnymi z normą ISO 16610-28. Dodatkowo jest on wrażliwy na duże pochylenia i strome zbocza. Pomiary uszkodzonych próbek wykazały, że oba algorytmy filtracji Gaussa (zgodny z ISO 16610-21 oraz zgodny z ISO 13565-1), powodują pojawianie się na granicach uszkodzeń, wzniesień, które nie istnieją na profilu pierwotnym.

Użycie morfologicznego filtru dyskowego nie powoduje powstawania efektów końcowych oraz nie wymaga usuwania odchyłek kształtu. Im większy promień

morfologicznego filtru dyskowego, tym więcej informacji jest odfiltrowywanych. Filtracja morfologiczna, bez względu na wartość promienia dysku, nie zniekształca profilu pierwotnego, co pozwala na dokładną i rzetelną ocenę chropowatości.

#### LITERATURA

- [1] PN-EN ISO 16610-21, *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Filtrowanie – Część 21: Liniowe filtry profilu: Filtry Gaussa*, 2013.
- [2] PN-EN ISO 13565-1, *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni – Metoda profilowa – Powierzchnie o warstwowych właściwościach funkcjonalnych: Filtrowanie i ogólne warunki pomiaru*, 1999.
- [3] ISO/DIS 16610-40, *Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 40: Morphological profile filters: Basic concepts*, 2006.
- [4] ISO/TS 16610-41, *Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 41: Morphological profile filters: Disk and horizontal line-segment filters*, 2006.
- [5] ISO/DIS 16610-49, *Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 49: Morphological profile filters: Scale space techniques*, 2006.
- [6] WIECZOROWSKI M., *Podstawy teoretyczne filtracji morfologicznej w pomiarach chropowatości powierzchni*, W: Arch. Technol. Masz. i Autom., 2009, t. 29, nr 4, s. 41-49.
- [7] ISO/TS 16610-28, *Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 28: Profile filters: End effects*, 2010.

# PORÓWNANIE WYNIKÓW POMIARÓW WSPÓLRZĘDNOŚCIOWYCH PIÓRA ŁOPATKI TURBINY

Marek MAGDZIAK<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Pomiary współrzędnościowe powierzchni krzywoliniowych wyrobów mogą być przeprowadzane zarówno z użyciem stykowych, jak i bezstykowych współrzędnościowych systemów pomiarowych. Przykładami bezstykowych systemów pomiarowych są urządzenia fotogrametryczne, systemy bazujące na triangulacji laserowej i tomografy komputerowe [1]. W ramach niniejszego artykułu zaprezentowano analizę wyników pomiarów współrzędnościowych powierzchni swobodnych, z których jest zbudowane wybrane pióro łopatki turbiny. Analizę przeprowadzono z użyciem dwóch wybranych oprogramowań pomiarowych firmy *Carl Zeiss*. Programy te współpracują ze współrzędnościową maszyną pomiarową (CMM). Tego rodzaju system pomiarowy należy do grupy stykowych współrzędnościowych systemów pomiarowych.

Na dokładność pomiarów współrzędnościowych pióra łopatki turbiny z użyciem ww. dwóch grup urządzeń pomiarowych ma wpływ szereg czynników, do których należą m.in. algorytmy obliczeniowe będące częścią stosowanych oprogramowań pomiarowych. Potwierdzają to wyniki badań przedstawionych w artykule [2], w ramach którego przeprowadzono weryfikację dokładności obliczania odchyłek kształtu powierzchni krzywoliniowych pióra łopatki turbiny przez oprogramowanie *Calypso* firmy *Carl Zeiss*. Na podstawie wyników zrealizowanych badań numerycznych, które wykonano dla różnej liczby punktów pomiarowych i różnych ich rozrzutów, stwierdzono występowanie odchyłek kształtu analizowanych powierzchni swobodnych danego wyrobu przekraczających przyjęte na etapie symulacji wartości rozstępów punktów pomiarowych. Wyniki badań symulacyjnych, zaprezentowanych

---

<sup>1</sup> Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Techniki Wytwarzania i Automatykacji, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

w artykule [2], mogą być podstawą do określenia minimalnej liczby punktów pomiarowych w trakcie realizacji rzeczywistych pomiarów współrzędnościowych pióra łopatką turbiny z wykorzystaniem CMM.

Powierzchnie krzywoliniowe wyrobów mogą być mierzone z użyciem różnych elementów pomiarowych, których wybór zależy od użytkownika danego oprogramowania pomiarowego. W związku z tym w artykule [2] porównano także wyniki pomiarów współrzędnościowych rozpatrywanego wyrobu, które uzyskano z użyciem dwóch wybranych elementów pomiarowych (*krzywej 2D* i *krzywej 3D*). Rezultaty przeprowadzonych testów wskazują na istotny wpływ rodzaju przyjętego, w programie *Calypso*, elementu pomiarowego na wyniki pomiarów powierzchni krzywoliniowych wyrobów. Jego wybór powinien zależeć od kształtu mierzonego przedmiotu.

Oprogramowania współrzędnościowych maszyn pomiarowych mogą uwzględniać także różne metody korekcji promieniowej, które służą do obliczania współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych na podstawie współrzędnych zaobserwowanych punktów pomiarowych. W ramach pracy [3] porównano dokładność obliczania kierunku korekcji promieniowej przez programy firm *Mitutoyo* i *Carl Zeiss*. Rozpatrywanymi programami były odpowiednio *Mcosmos* i *Calypso*. Jednym z rejestrowanych błędów była odchyłka między skorygowanymi punktami pomiarowymi obliczonymi przez analizowane oprogramowania, a punktami wygenerowanymi z użyciem opracowanego symulatora pomiarów współrzędnościowych. Wykonano szereg badań symulacyjnych dla różnych wartości promienia końcówki pomiarowej oraz kroku próbkowania. Na podstawie uzyskanych wyników lepsze rezultaty, w zakresie dokładności obliczania współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych, szczególnie dla odległości między punktami pomiarowymi równej 0.1 mm osiągnięto w przypadku oprogramowania *Calypso*.

W artykule [4] zwrócono uwagę na różne algorytmy obliczania odchyłki bicia promieniowego w przypadku pomiarów kół zębatych stożkowych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Algorytmy te mogą wchodzić w skład oprogramowania pomiarowego współpracującego z CMM i wpływać na dokładność uzyskiwanych rezultatów pomiarów współrzędnościowych. Na podstawie zrealizowanych badań doświadczalnych stwierdzono występowanie dużych różnic między wynikami pomiarów bicia promieniowego w przypadku rozpatrywanego rodzaju koła zębatego, które uzyskano z użyciem wybranych współrzędnościowych maszyn pomiarowych wyprodukowanych przez różnych producentów.

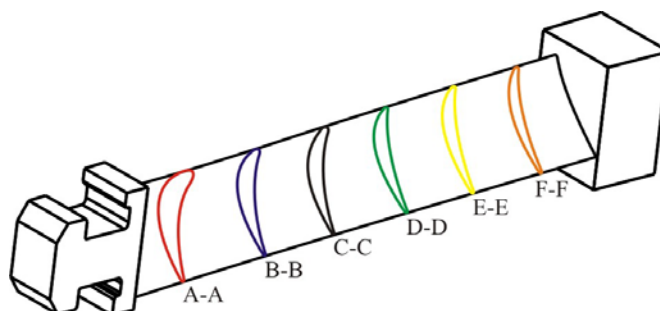
W niniejszym artykule wskazano na różnice między wynikami pomiarów współrzędnościowych pióra łopatką turbiny, które otrzymano z użyciem dwóch programów: *Calypso* i *Blade Pro*. Oprogramowanie *Calypso* jest programem uniwersalnym i powszechnie stosowanym w zakresie pomiarów współrzędnościowych, które umożliwia m.in. stykowe pomiary powierzchni swobodnych przedmiotów. Z kolei program *Blade Pro* jest oprogramowaniem

specjalistycznym i dedykowanym przede wszystkim do analizy wyników pomiarów piór łopatek turbin. Wymiana danych między tymi programami jest zautomatyzowana. W związku z tym weryfikacja dokładności wykonania pióra łopatki turbiny z użyciem rozpatrywanych programów może być wykonywana na podstawie tych samych danych źródłowych w postaci współrzędnych zaobserwowanych punktów pomiarowych. W artykule zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych. Badania eksperymentalne przeprowadzono z użyciem wybranej CMM.

## 2. BADANIA SYMULACYJNE

Badania numeryczne przeprowadzono dla następujących wartości rozstępów punktów pomiarowych:  $\pm 0.005$  mm,  $\pm 0.001$  mm,  $\pm 0.01$  mm. Zrealizowano je dzięki możliwości obsługi programu *Calypso* w trybie symulacji. Analizowaną charakterystyką pomiarową w oprogramowaniach *Calypso* i *Blade Pro* była odchyłka kształtu wyznaczonego zarysu, której pomiar był symulowany w poszczególnych przekrojach poprzecznych pióra łopatki turbiny. Odchyłka ta została obliczona na podstawie zmierzonych współrzędnych punktów pomiarowych i należy do podstawowych charakterystyk pomiarowych, które umożliwiają ocenę dokładności wykonania pióra łopatki turbiny. Wybór tej charakterystyki pomiarowej wynikał z możliwości jej pomiaru zarówno z użyciem programu *Calypso*, jak i *Blade Pro*.

Badania symulacyjne przeprowadzono bez dopasowania danych rzeczywistych do nominalnych dla sześciu wybranych przekrojów poprzecznych pióra łopatki turbiny (A-A ÷ F-F) (rys. 1). Zastosowanym elementem pomiarowym w programie *Calypso* była *krzywa 2D*. Wybór elementu pomiarowego *krzywa 2D* był wynikiem analizy kształtu rozpatrywanego pióra łopatki turbiny, które charakteryzowało się małą krzywizną wzdłuż jej osi.



Rys. 1. Przekroje poprzeczne łopatki turbiny, dla których przeprowadzono badania symulacyjne

W programie *Calypso* nie zastosowano filtracji wyników pomiarów współrzędnościowych i usuwania błędów nadmiernych. Pozostawiono domyślne



ustawienia w zakresie filtracji wyników w oprogramowaniu *Blade Pro*. W tabelach 1–3 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych w postaci wartości odchyłek kształtu wyznaczonego zarysu, które obliczono na podstawie tych samych grup punktów pomiarowych z użyciem oprogramowań *Calypso* i *Blade Pro*.

Tabela 1. Wyniki badań symulacyjnych dla rozstępu punktów pomiarowych  $\pm 0.001$  mm

Oprogramowanie	Przekrój poprzeczny pióra łopatki turbiny					
	A–A	B–B	C–C	D–D	E–E	F–F
<i>Calypso</i>	0.246	0.391	0.485	0.534	0.569	0.573
<i>Blade Pro</i>	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002

Tabela 2. Wyniki badań symulacyjnych dla rozstępu punktów pomiarowych  $\pm 0.005$  mm

Oprogramowanie	Przekrój poprzeczny pióra łopatki turbiny					
	A–A	B–B	C–C	D–D	E–E	F–F
<i>Calypso</i>	0.220	0.418	0.484	0.534	0.566	0.561
<i>Blade Pro</i>	0.011	0.011	0.011	0.010	0.011	0.011

Tabela 3. Wyniki badań symulacyjnych dla rozstępu punktów pomiarowych  $\pm 0.01$  mm

Oprogramowanie	Przekrój poprzeczny pióra łopatki turbiny					
	A–A	B–B	C–C	D–D	E–E	F–F
<i>Calypso</i>	0.243	0.375	0.492	0.521	0.587	0.608
<i>Blade Pro</i>	0.021	0.021	0.022	0.021	0.021	0.021

W celu dokładniejszej analizy wpływu rodzaju oprogramowania pomiarowego na uzyskane wyniki pomiarów pióra łopatki turbiny przeprowadzono jej rzeczywiste pomiary współrzędnościowe. Pomiary te wykonano z uwzględnieniem różnych strategii pomiarowych.

### 3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania eksperymentalne zrealizowano z użyciem współrzędnościowej maszyny pomiarowej *ACCURA II*, która była wyposażona w głowicę pomiarową *VAST XT*. Zastosowany system pomiarowy charakteryzuje się następującymi parametrami dokładnościowymi [5]:

- $E_{L, MPE} = 1.6 + L/333 \mu\text{m}$ ;
- $P_{FTU, MPE} = 1.7 \mu\text{m}$ ;
- $MPE_{Tij} = 2.5 \mu\text{m}$ ;
- $MPT_{ij} = 50.0$  s.

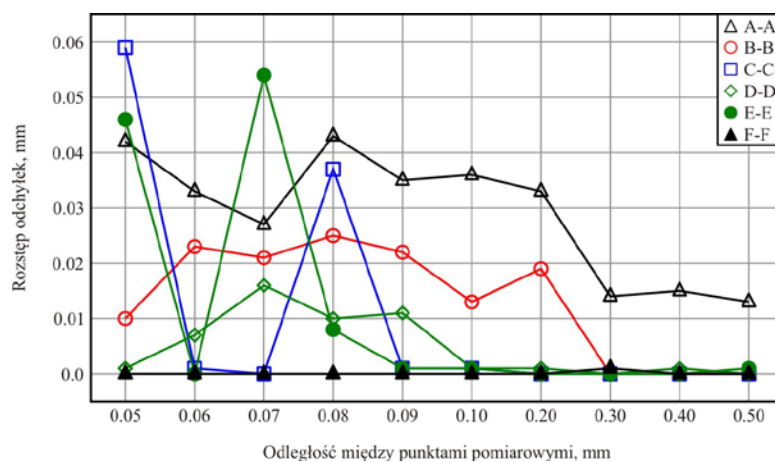
Pomiary współrzędnościowe pióra łopatki turbiny przeprowadzono w tych samych przekrojach poprzecznych (rys. 1), co w przypadku badań symulacyjnych oraz z użyciem tego samego typu elementu pomiarowego. Mierzoną charakterystyką pomiarową była także odchyłka kształtu wyznaczonego zarysu. Analogicznie do badań numerycznych – nie zastosowano dopasowania danych rzeczywistych do nominalnych oraz filtracji wyników i usuwania błędów nadmiernych w programie *Calypso*. Ustawień dotyczących filtracji wyników w oprogramowaniu *Blade Pro* nie modyfikowano.

Każdy z przekrojów poprzecznych pióra łopatki turbiny był mierzony z użyciem układu trzpieni pomiarowych, który składał się z dwóch końcówek pomiarowych. W obrębie każdego analizowanego przekroju w pierwszej kolejności zrealizowano pomiar części wklęsłej i fragmentów krawędzi natarcia oraz spływu pióra łopatki. Następnie przeprowadzono pomiar pozostałej części mierzonego przedmiotu z wykorzystaniem drugiej końcówki pomiarowej.

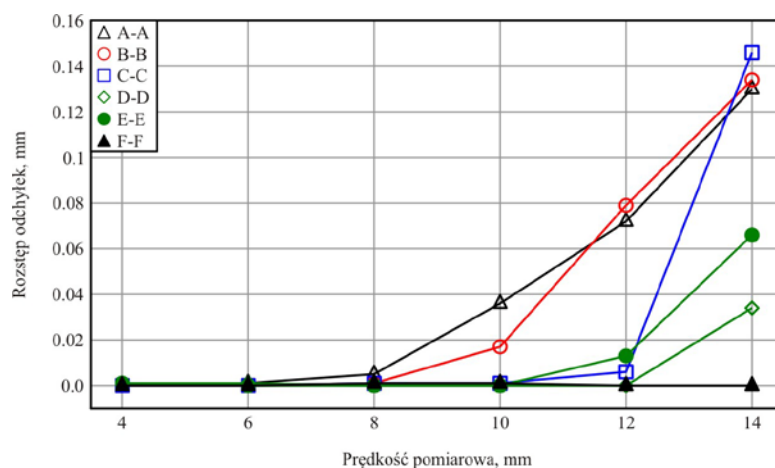
Badania doświadczalne zostały przeprowadzone dla różnych odległości między punktami pomiarowymi (0.05 mm – 0.50 mm) oraz różnych prędkości pomiarowych (4 mm/s – 14 mm/s). Liczba punktów pomiarowych i prędkość pomiarowa są elementami strategii stykowych pomiarów współrzędnościowych z użyciem CMM. Różne ustawienia w zakresie liczby punktów pomiarowych oraz prędkości pomiarowej umożliwiły uzyskanie zróżnicowanych grup punktów pomiarowych, dla których przeprowadzono obliczenia odchyłek kształtu wyznaczonego zarysu z zastosowaniem rozważanych oprogramowań pomiarowych firmy *Carl Zeiss*.

Na rysunku 2 przedstawiono rezultaty badań eksperymentalnych w postaci rozstępów wyników pomiarów współrzędnościowych pióra łopatki turbiny, które uzyskano z użyciem analizowanych oprogramowań dla różnej liczby punktów pomiarowych. Pierwszy etap badań doświadczalnych wykonano z użyciem prędkości pomiarowej równej 10 mm/s.

Z kolei rysunek 3 prezentuje różnice między wartościami odchyłek kształtu wyznaczonego zarysu, które otrzymano z użyciem programów *Calypso* i *Blade Pro* dla różnych wartości prędkości pomiarowych. Drugi etap badań eksperymentalnych zrealizowano dla odległości między punktami pomiarowymi wynoszącej 0.1 mm.



Rys. 2. Wpływ oprogramowania pomiarowego na wyniki pomiarów dla różnych odległości między punktami pomiarowymi



Rys. 3. Wpływ oprogramowania pomiarowego na wyniki pomiarów dla różnych prędkości pomiarowych

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań symulacyjnych stwierdzono występowanie wartości odchyłek kształtu wyznaczonego zarysu, obliczonych z użyciem programu *Calypso*, które przekraczają zastosowane wartości rozstępów punktów pomiarowych. W przypadku oprogramowania *Blade Pro* wartości odchyłek odpowiadają zadeklarowanym wartościom rozstępów. Przyczyną uzyskanych różnic między wynikami pomiarów, obliczonych z użyciem ww. dwóch programów, może być m.in. brak filtracji wyników pomiarów współrzędnościowych w oprogramowaniu *Calypso*.

Rezultaty badań doświadczalnych wskazują na zmniejszanie się wartości rozstępów wyników pomiarów, które uzyskano z użyciem rozpatrywanych programów, wraz ze zmniejszaniem się liczby punktów pomiarowych oraz na zwiększanie się ww. rozstępów przy jednoczesnym wzroście zastosowanych prędkości pomiarowych.

Uzyskane wartości rozstępów dla większych odległości między punktami pomiarowymi mogą być efektem wymuszonej, przez uwzględnienie mniejszej liczby punktów pomiarowych, filtracji wyników pomiarów współrzędnościowych w programie *Calypso*. Ponadto, większe wartości rozstępów dla większych prędkości pomiarowych mogą wynikać z dużego rozrzutu punktów pomiarowych, a tym samym dużych wartości odchylek kształtu wyznaczonego zarysu obliczonych z wykorzystaniem oprogramowania *Calypso*.

#### LITERATURA

- [1] SŁADEK J., *Dokładność pomiarów współrzędnościowych*. Kraków, Wydawnictwo PK, 2011.
- [2] KAWALEC A., MAGDZIAK M., *The accuracy of coordinate measurements' simulation of a turbine blade*. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowa Współrzędnościowa Technika Pomiarowa, 2014.
- [3] ERKAN T., MAYER R., WOŹNIAK A., *Surface probing simulator for the evaluation of CMM probe radius correction software*. W: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 55, nr 1-4, 2011, 307-315.
- [4] GUENTHER A., *Calculation of indirectly measured runout of bevel gears*. 11th International Symposium on Measurement and Quality Control, Kraków-Kielce, 2013.
- [5] PN-EN ISO 10360, Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Części 2, 4, 5.

# POMIARY DIAGNOSTYCZNE PIONOWEGO CENTRUM FREZARSKIEGO

Piotr MAJ<sup>1</sup>, Edward MIKO<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Ciągły rozwój technologii stawia coraz to nowe wymagania względem dokładności wymiarowo kształtowej przedmiotów wytwarzanych na obrabiarkach CNC. Na końcową jakość wyrobów wpływa wiele czynników. Można do nich zaliczyć: prawidłowość geometryczną realizacji ruchów elementarnych (prostoliniowość, bicie przy obrocie), dokładność pomiarów przemieszczeń liniowych i kątowych, dokładność i powtarzalność pozycjonowania osi sterowanych numerycznie, ustawienie osi względem siebie, dokładność realizowania kształtów torów, prędkości ruchów w stosunku do wartości zadanej [1, 2, 8, 9] i badanie luzów układu napędowego.

Celem badań było przeprowadzenie diagnostyki pionowego centrum frezarskiego DMU80 monoBLOCK. Do pomiarów wykorzystano Szybki Test Ballbar QC10 firmy Renishaw\*. Wykonane pomiary wykazały, że istotnymi błędami wpływającymi na końcową dokładność wytwarzanych przedmiotów jest różnica odchyłki pozycjonowania oraz odchyłka prostopadłości.

## 2. OPIS PRZYRZĄDÓW I STANOWISK BADAWCZYCH

Do oszacowania błędów centrum frezarskiego wykorzystano urządzenie firmy Renishaw - Ballbar QC10 (Rys. 1.). Aparatura ta umożliwia wykrycie błędów geometrycznych obrabiarki związanych z układami napędowymi. Można do tego

---

<sup>1</sup> Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Katedra Technologii Mechanicznej i metrologii, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

\* aparatura zakupiona z funduszy UE w ramach projektu MOLAB, „Rozwój bazy badawczej specjalistycznych laboratoriów uczelni publicznych rejonu świętokrzyskiego”

zaliczyć wszelkie niedokładności maszyny wynikające z układu mechanicznego, układu pomiarowego jak i serwonapędów. Pomiar dokonywany jest poprzez wykonywanie interpolacji kołowej względem zadanego punktu.



Rys 1. Urządzenie Ballbar QC10 zamontowane między stołem a wrzecionem frezarki [10]

Urządzenie Ballbar jest prętym kinematycznie kulkowym. Jest to inaczej teleskopowy czujnik położenia liniowego o bardzo dużej dokładności. Zakończony jest z dwóch stron stalowymi kulkami służącymi do montowania i ustalania położenia. Do mocowania służą również specjalne gniazda magnetyczne, z których jedno montuje się na stole obrabiarki, a drugie do wrzeciona lub jego obudowy. Taki system umożliwia rejestrowanie niewielkich zmian promienia podczas wykonywania przez obrabiarkę przemieszczenia po zaprogramowanym okręgu [4, 5, 7, 11].

Frezarka DMU 80 monoBLOCK pracowała w Zakładzie Mechaniczno-Elektromechanicznym „ZAMEL” w Skarżysku-Kamiennym. Obrabiarka przed dokonaniem pomiarów została przygotowana według zaleceń producenta. Była to maszyna realizująca na bieżąco zadania produkcyjne i w trakcie wykonywania pomiarów miała wypracowane 4712 godzin.

Parametry obrabiarki:

- ilość sterowanych osi - 5,
- przesuw osi X/Y/Z 980/630/630 mm,
- powierzchnia stołu 1250x700/ø700 mm,
- max. obciążenie stołu - 650 kg,
- prędkość obrotowa do 12000 obr./min,
- max. średnica narzędzia - 130 mm,
- pojemność magazynka narzędzi - 60 szt.

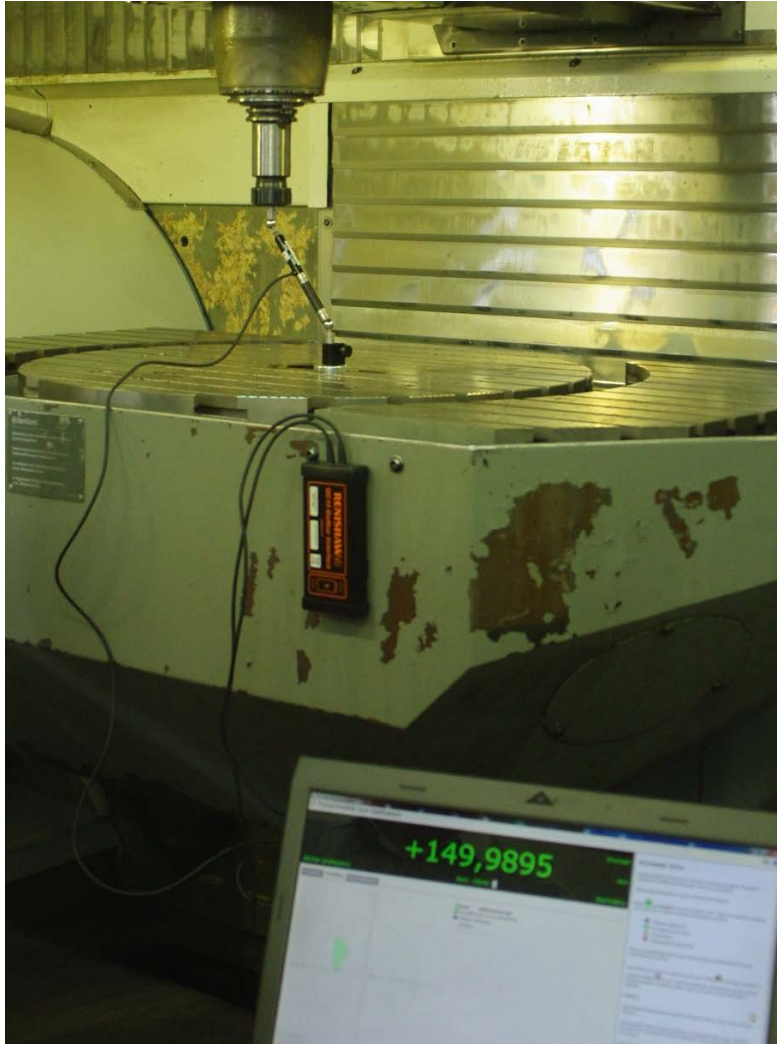
Maszyna została tak zaprogramowana aby wykonywała interpolacje kołowe względem zadanego punktu. Punkt ten znajdował się na uchwycie magnetycznym zamontowanym na stole frezarki. Drugi uchwyt był zamontowany na wrzecionie obrabiarki, które zostało wyłączone programowo. Pomiędzy nimi został umieszczony przyrząd Ballbar. Pręt kinematycznie kulkowy został wydłużony do wartości 150 mm za pomocą specjalnej przystawki. Oznaczało to, że będzie kreślony okrąg o średnicy 300 mm. Pomiar został wykonany w płaszczyźnie XY (Rys. 2.) poprzez dokonanie podwójnego ruchu wrzeciona po okręgu w dwóch kierunkach.



Rys. 2. Widok urządzenia Ballbar ustawionego do pomiaru błędów okrągłości i diagnostyki frezarki w płaszczyźnie XY

Dokonano również pomiarów diagnostycznych w płaszczyznach XZ i YZ. W tych płaszczyznach ze względu na ograniczenia konstrukcyjne maszyny pomiary zostały wykonane w zakresie  $180^\circ$ . Obrabiarka wykonywała łuki względem zadanego punktu umieszczonego na stole frezarki.

Na rysunku 3 przedstawiono widok stanowiska do diagnozowania obrabiarki w płaszczyźnie XZ.



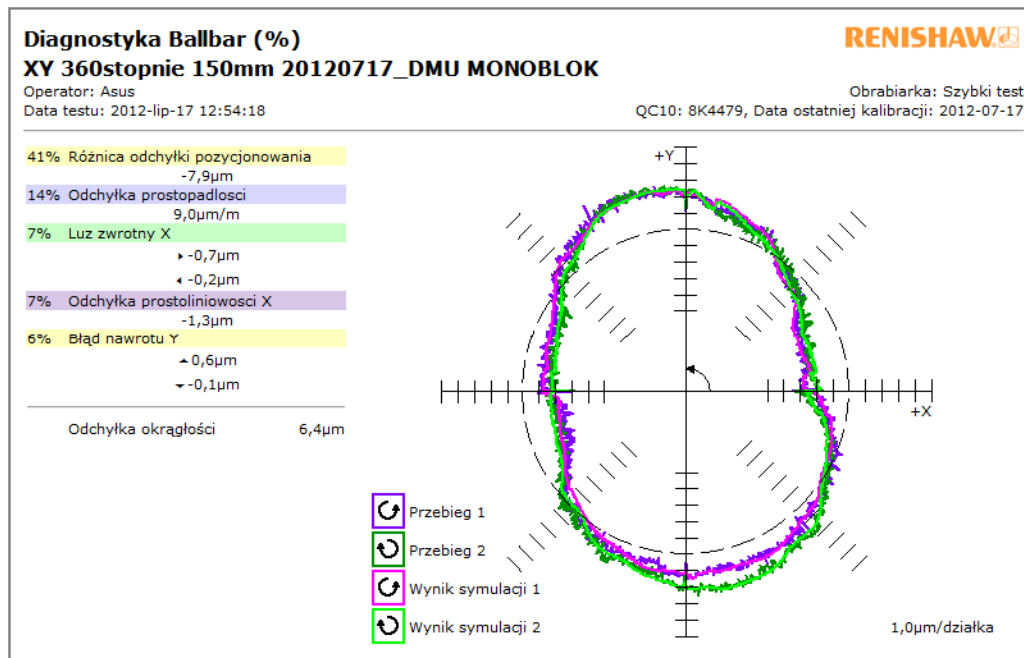
Rys. 3. Widok stanowiska do pomiaru błędów okrągłości i diagnostyki frezarki w płaszczyźnie XZ

Podczas przeprowadzania testu za pomocą przetwornika pomiarowego mierzony jest rzeczywisty promień wykonywanego okręgu. Aktualne położenie kątowe jest określone na podstawie czasu wykonania ruchu ze stałym posuwem [3].



### 3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Do analizy uzyskanych wyników zostało wykorzystane oprogramowanie dołączone do aparatury badawczej. Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów diagnostycznych i odchyłki okrągłości pionowego centrum frezarskiego.



Rys. 4. Raport diagnostyczny frezarki wykonany w płaszczyźnie XY

Wygenerowany raport dla płaszczyzny XY (Rys. 4) składa się z dwóch części. Z lewej strony znajduje się wykaz procentowego wpływu pięciu największych błędów, które mają istotny wpływ na dokładność obrabiarki. Z raportu można odczytać, że są nimi: różnica odchyłki pozycjonowania, odchyłka prostopadłości, luz zwrotny osi X, odchyłka prostopadłości osi X i błąd nawrotu osi Y. Przyczynami tych błędów są występujące luzy w układzie napędowym obrabiarki, zbyt wolna odpowiedź serwonapędów na sygnał sterowania oraz niewłaściwie wypoziomowana obrabiarka. Pomiar płaszczyzny XY wykazał, że odchyłka okrągłości wyniosła: 6,4 µm, różnica odchyłki pozycjonowania: -7,9 µm, a odchyłka prostopadłości: 9,0 µm/m. W prawej części raportu widać drogę zarejestrowaną przez aparaturę badawczą. Zarejestrowany kształt odbiegający od idealnego okręgu świadczy o występowaniu błędu prostopadłości osi [8]. Kolejną częścią raportu jest tabela

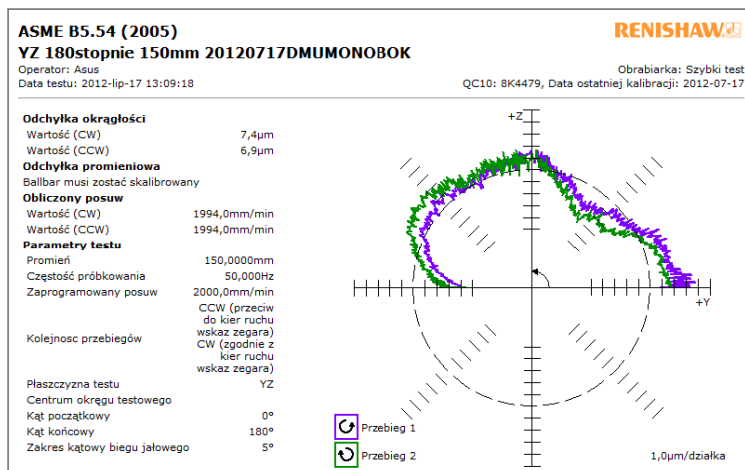
diagnostyczna ( Tabela 1). Znajdują się tam wszystkie możliwe błędy, które zostały zarejestrowane przez aparaturę diagnostyczną. Posiadają one własny ranking, od największego do najmniejszego błędu, który ujmuje procentowy ich udział w odchyłce okrągłości. Pozostałe informacje zawarte w tabeli to warunki przeprowadzenia pomiarów.

Tabela 1. Raport diagnostyczny pomiaru osi XY

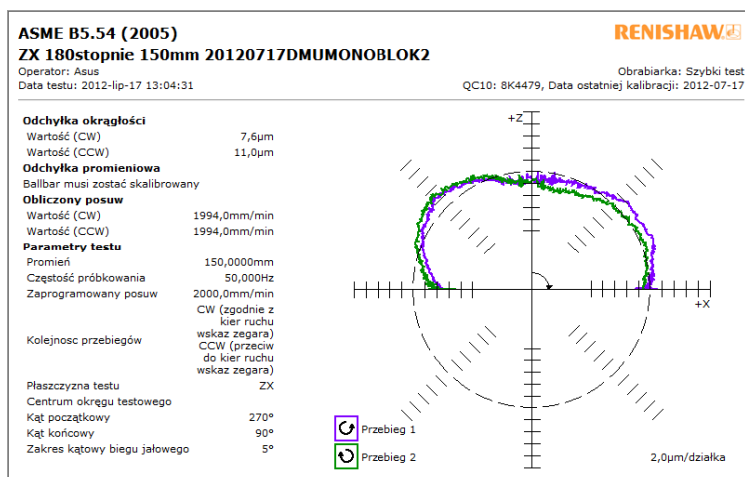
Tabela diagnostyczna Ballbar		RENISHAW		
XY 360stopnie 150mm 20120717_DMU MONOBLOK				
Operator: Asus		Obrabiarka: Szybki test		
Data testu: 2012-lip-17 12:54:18		QC10: 8K4479, Data ostatniej kalibracji: 2012-07-17		
Błąd	Wielkość		Okrągłość Wyznaczona niezależnie	Ranking
Luz zwrotny X	▶-0,7	◀ -0,2µm	0,7µm (7%)	(3)
Luz zwrotny Y	▲-0,3	▼ -0,1µm	0,3µm (3%)	(9)
Błąd nawrotu X	▶0,0	◀ 0,0µm	0,0µm (0%)	(13)
Błąd nawrotu Y	▲0,6	▼ -0,1µm	0,6µm (6%)	(5)
Luz poprzeczny X	▶1,0	◀ -0,7µm	0,5µm (5%)	(6)
Luz poprzeczny Y	▲0,7	▼ -0,0µm	0,5µm (5%)	(8)
Odchyłka okresowa X	↑0,2	↓0,5µm	0,5µm (5%)	(7)
Odchyłka okresowa Y	↑0,3	↓0,3µm	0,3µm (3%)	(10)
Błąd nadążania	0,01ms		0,2µm (2%)	(12)
Odchyłka prostokątności	9,0µm/m		1,4µm (14%)	(2)
Odchyłka prostoliniowości X	-1,3µm		0,7µm (7%)	(4)
Odchyłka prostoliniowości Y	-0,3µm		0,2µm (2%)	(11)
Różnica odchyłki pozycjonowania	-7,9µm		4,0µm (41%)	(1)
Skok śruby X	40,0000mm			
Skok śruby Y	35,0000mm			
Obliczony posuw	1802,6mm/min			
Przesunięcie środka X	49,4µm			
Przesunięcie środka Y	-18,5µm			
Odchyłka okrągłości	6,4µm			
<b>Parametry testu</b>				
Promień	150,0000mm			
Zaprogramowany posuw	2000,0mm/min			
Start/koniec/Bieg jałowy	0°/360°/180°			
Kolejność przebiegów	CCW (przeciw do kier ruchu wskaz zegara) CW (zgodnie z kier ruchu wskaz zegara)			
Centrum okręgu testowego				
Częstość próbkowania	50,000Hz			

Ponieważ niemożliwe było wykonanie pełnego ruchu po okręgu w płaszczyznach YZ i ZX maszyna została zaprogramowana do wykonywania półokręgów. Wygenerowane raporty pomiarowe tych płaszczyzn posiadają jedynie wartości odchyłki okrągłości. Nie ma na nich zawartych informacji o wielkościach wpływających na samą odchyłkę okrągłości ( Rys. 5).

a)



b)



Rys. 5. a) raport odchyłki okrągłości dla płaszczyzny YZ  
 b) raport odchyłki okrągłości dla płaszczyzny ZX

Dokonując analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że największą odchyłkę okrągłości posiada płaszczyzna ZX, wyniosła ona 11,0 µm. Analiza składowych błędów okrągłości płaszczyzny XY wykazała, że istotnymi wielkościami wpływającymi na dokładność pracy obrabiarki są: różnica odchyłki pozycjonowania wynosząca -7,9 µm, odchyłka prostopadłości 9 µm/m, luz zwrotny osi X -7,0 µm, odchyłka prostoliniowości -1,3 µm oraz błąd nawrotu osi Y 0,6 µm. Według producenta pionowego centrum frezarskiego DMU80 monoBLOCK odchyłka okrągłości nie powinna przekraczać dla każdej z płaszczyzn 4 µm [10]. Pomiary diagnostyczne

wykazały, że odchyłka okrągłości dla płaszczyzn XY/YZ/ZX wyniosła odpowiednio 6,4  $\mu\text{m}$ /7,4  $\mu\text{m}$ /11,0  $\mu\text{m}$ . Oznacza to, że płaszczyzny XY i YX nieznacznie przekraczają wymagania producenta, natomiast płaszczyzna ZX przekracza dopuszczalną wartość niemal trzykrotnie.

#### 4. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Badania diagnostyczne pionowego centrum frezarskiego DMU80 monoBLOCK pozwoliły stwierdzić, że:

1. Największa wartość odchyłki okrągłości została zarejestrowana w płaszczyźnie ZX, wyniosła ona 11,0  $\mu\text{m}$ .
2. W płaszczyźnie XY zarejestrowana odchyłka okrągłości wyniosła najmniej: 6,4  $\mu\text{m}$ .
3. Największymi wielkościami wpływającymi na dokładność pracy obrabiarki są: różnica odchyłki pozycjonowania wynosząca -7,9  $\mu\text{m}$ , odchyłka prostopadłości 9  $\mu\text{m}/\text{m}$ , luz zwrotny osi X -7,0  $\mu\text{m}$ , odchyłka prostoliniowości -1,3  $\mu\text{m}$  oraz błąd nawrotu osi Y 0,6  $\mu\text{m}$ .
4. W celu zmniejszania błędów obrabiarki zaleca się: sprawdzenie odpowiedniego ustawienia maszyny oraz wprowadzenie kompensacji w systemie sterującym centrum frezarskim.

#### LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., *Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistości i chropowatości*. W: Wydawnictwo Naukowo- Techniczne, 2008.
- [2] HONCZERENKO J., *Obrabiarki sterowane numerycznie*. WNT, 2009.
- [3] JÓŻWIK J. PIEŚKO P. KRAJEWSKI G., *Ocena testu QC10 do kontroli off-line obrabiarek sterowanych numerycznie CNC*. W: Eksploatacja i Niezawodność, Warszawa 2010.
- [4] *Laser measurement and ballbar diagnosis for motion system, XL-80 laser system, QC20-W wireless Ballbar system* Renishaw 2009.
- [5] MIKO E., JAREMA M., *Badania dokładności pozycjonowania pionowego centrum obróbkowego*. W: Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 56. nr 1/2012, 63-65.
- [6] MULLANY B., *Evaluation And Comparison Of The Different Standards Used To Define The Positional Accuracy And Repeatability Of Numerically Controlled Machining Center Axes*. University of North Carolina, Charlotte, October 2007.
- [7] Polska Norma PN-ISO 230-4: *Badania okrągłości w obrabiarkach sterowanych numerycznie*. Marzec 1999.
- [8] Renishaw Ballbar 20 System User Guide, Renishaw 2009.
- [9] SZAFARCZYK M., CHRZANOWSKI J., *Nowa koncepcja sprawdzania dokładności maszyn NC*, materiały konferencyjne, AUTOMATION, Automatyzacja-Nowości i Perspektywy Warszawa, 2005, 405-413.
- [10] [www.en.dmgmori.com](http://www.en.dmgmori.com).
- [11] [www.renishaw.com](http://www.renishaw.com).

# **POINT SPECTROSCOPY – OCENA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA MIKROSKOPU AFM DICALIBER DO BADANIA WŁAŚCIWOŚCI POWIERZCHNI**

Radomir MAJCHROWSKI<sup>1</sup>, Mariusz KUCHTA<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

Metrologia warstwy wierzchniej, jako dyscyplina naukowa, w ostatnich kilkunastu latach rozwijała się bardzo dynamicznie. Tendencja ta związana jest z rozwojem nowych technologii (zwłaszcza w przemyśle samochodowym, lotniczym czy elektronicznym). Nowe wymagania, stawiane konstrukcjom i technologiom, są obecnie związane nie tylko z pytaniem, jak wykonać dany produkt, np. silnik spalinowy, ale również z jego niezawodnością i polepszeniem cech użytkowych (np. zmniejszenie zużycia paliwa, mniejsza emisja szkodliwych substancji do atmosfery). Dzisiejszy rozwój technologii pozwala już nie tylko wykonać powierzchnie w skali makro, ale i w skali subatomowej, gdzie nie mówi się już o topografii, lecz nanotopografii powierzchni. Powstają również mikronarzędzia stosowane do mikroobróbki jak: mikrotoczenie [1], mikrofrezowanie [2]. W pracy [3] Schulze i inni przedstawili przykład manipulowania atomami w celu kształtowania powierzchni. W dziedzinie mechaniki także możemy zaobserwować tendencje do zmniejszania wymiarów mechanizmów do skali nano [4]. W pracy M. E. Kassnera i innych „New directions in mechanics” [5] została przedstawiona między innymi koncepcja molekularnego samochodu.

SPM (ang. scanning probe microscopy) – mikroskopia z sondą skanującą jest obecnie jedną z najbardziej popularnych metod badawczych, pozwalającą z wysoką rozdzielczością analizować właściwości oraz strukturę powierzchni. Jednym z rodzajów mikroskopów SPM, jest mikroskop sił atomowych (ang. atomic force microscope – AFM). Od wynalezienia tego mikroskopu w 1986 roku przez

---

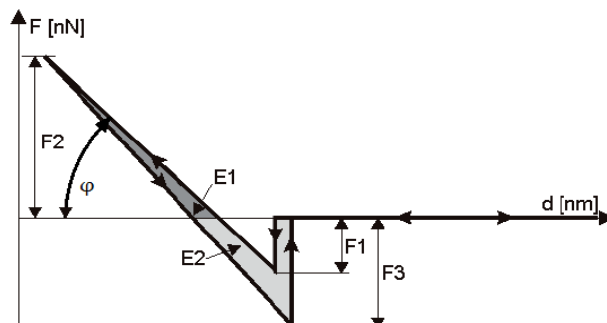
<sup>1</sup> Politechnika Poznańska, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych, pl. M. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań, tel. +48 61 665 3567

G. Binning'a i jego współpracowników z Uniwersytetu w Stanfordzie, technika AFM znacząco się rozwinęła i stała się bezcenną techniką do analizy powierzchni w skali nano.

## 2. POINT SPECTROSCOPY

Jedną z istotnych cech materiałów jest ich moduł Younga. Dzięki technice AFM można dokonać pomiaru topografii powierzchni oraz cech powierzchniowych materiału [6, 7, 8, 9, 10]. Do wyznaczenia modułu Younga powierzchni, siły adhezji oraz siły nacisku ostrza na powierzchnię można wykorzystać technikę pomiarową zwana spektroskopią sił (ang. force spectroscopy). Technika ta polega na zarejestrowaniu krzywej siły oddziaływania ostrza na próbkę w zależności od odległości ostrze-próbka (ang. force-distance curve). Przebieg tej krzywej powstaje podczas zbliżenia, kontaktu, a następnie oddalenia sondy od powierzchni próbki, co skutkuje zmienną co do kierunku i wartości siłą oddziaływania między ostrzem a próbką. Interpretując przebieg tej krzywej, za pomocą odpowiedniego oprogramowania można określić nie tylko moduł Younga, ale i siłę oddziaływań powierzchniowych, długość segmentów cząstek kopolimerów [11, 12]. Pomiar w trybie point spectroscopy jest pomiarem punktowym. Uzyskana zależność siły od odległości ostrze-próbka składa się z dwóch krzywych, przy czym jedna opisuje działanie związane z przyciąganiem ostrza przez próbkę, a druga z jej odpychaniem. Warto też wspomnieć, że taką zależność siła-odległość wyznacza się doświadczalnie i w zależności od materiału próbki będzie miała ona różny przebieg. Istotny jest również materiał, z którego zbudowana jest mikrobilka, gdyż znajomość jej stałej sprężystości pozwala wyznaczyć siły działające na ostrze. Dzięki analizie wykresu (rys. 1) zależności siły oddziaływania pomiędzy ostrzem sondy skanującej AFM, a powierzchnią próbki w funkcji odległości, można uzyskać bardzo dużo informacji o takich parametrach jak [11]:

- F1 – siła przyciągająca, pokonująca opór sprężysty belki,
- F2 – maksymalna wartość siły oddziaływani próbka-ostrze,
- F3 – maksymalna siła adhezji,
- E1 – energia rozproszona na deformację próbki,
- E2 – energia rozproszona na separację ostrza i próbki,
- $\varphi$  – kąt nachylenia krzywej daje informacje o module Younga próbki.



Rys. 1. Wykres zależności odległości ostrze-próbka oraz sił działających między nimi [11]

Aby dokładnie poznać moduł Younga warstwy wierzchniej materiału próbki należy posłużyć się teorią Hertza, opisującą deformację materiału sondą mikroskopu AFM. Przy założeniu że materiał badany jest jednorodny, zgodnie z tą teorią siłę nacisku na powierzchnię próbki można obliczyć za pomocą następującego wzoru [13]:

– dla ostrza parabolicznego:

$$F = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{4 \cdot \sqrt{R_c}}{3} \cdot \delta^{\frac{3}{2}} [\mu N] \quad (1)$$

– dla czworobocznej piramidy:

$$F = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{\tan \alpha}{\sqrt{2}} \cdot \delta^2 [\mu N] \quad (2)$$

gdzie:

- F – siła oddziaływania ostrza na powierzchnię próbki [ $\mu N$ ],
- E – moduł Younga powierzchni próbki [Pa],
- $\nu$  – liczba Poissona materiału próbki,
- $R_c$  – promień ostrza [nm],
- $\alpha$  – przedni kąt ostrza sondy pomiarowej,
- $\delta$  – głębokość wejścia ostrza w materiał [ $\mu m$ ].

Ouyang i inni w pracy [14] wykazali wpływ na uzyskaną wartość siły adhezji powierzchni jej składowych, którymi są siły van der Waalsa, kapilarne i elektrostatyczne. Na podstawie badań grafitu wywnioskowano, że składową dominującą są siły kapilarne, które są kilkakrotnie większe od porównywalnych do

siebie sił van der Waalsa i elektrostatycznych. Warto dodać, że badania były przeprowadzone w powietrzu o wilgotności ok. 50%, na podstawie czego udowodniono, że to warunki środowiskowe, a nie właściwości materiału mają największy wpływ na siły adhezji w pomiarach w nanoskali.

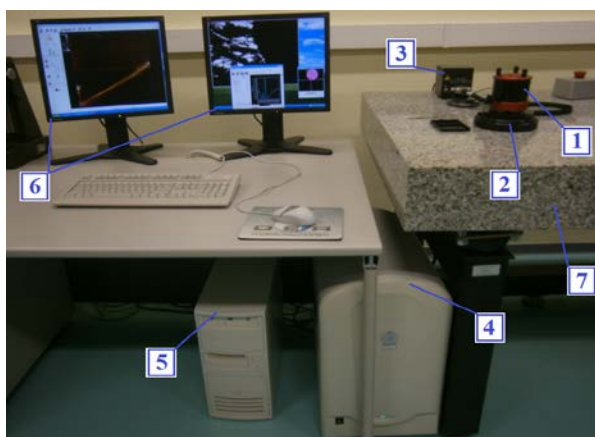
### 3. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA METODY POINT SPECTROSCOPY

Do badań wykorzystano mikroskop sił atomowych AFM diCaliber firmy Veeco (obecnie firma Bruker). Podstawowe informacje dotyczące mikroskopu bliskich oddziaływań AFM diCaliber:

- zakres skanowania w płaszczyźnie XY wynosi  $100 \times 100 \mu\text{m}$  oraz  $10 \mu\text{m}$  w osi Z,
- błąd liniowości XY  $< 1$ ,
- błąd sprzężenia ruchu  $< 1$ ,
- szumy: XY  $< 4\text{nm}$ ,  
Z  $< 1\text{nm}$ .

Wyposażenie podstawowe stanowiska pomiarowego (rys. 2):

- zintegrowany mikroskop optyczny z kamerą CCD z polem obserwacji sondy oraz próbki pod kątem  $45^\circ$  przy powiększeniu  $\sim 100\times$  [1],
- manualny stolik XY z przesuwem  $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$  [2],
- płyta elektroniczna I/O-Modulation Plus Board dla trybu Tapping Mode,
- wzmacniacz sygnałów (3),
- kontroler Nanodrive (4),
- komputer (5),
- dwa monitory (6),
- granitowy stół z systemem tłumiącym (7).



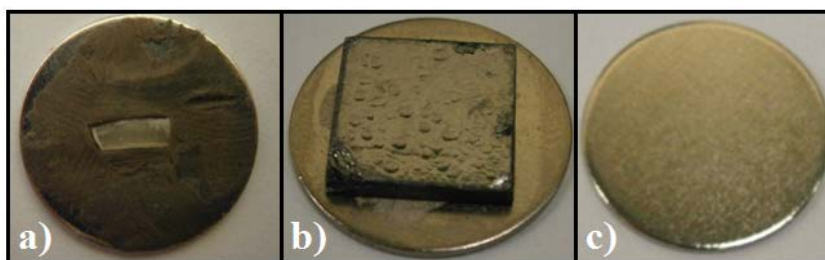
Rys. 2. Zdjęcie stanowiska badawczego



Jako materiał badawczy wybrano trzy następujące preparaty:

- materiał biologiczny (paznokieć),
- grafit,
- stalowy krążek (nierdzewna stal magnetyczna typu 15-5PH).

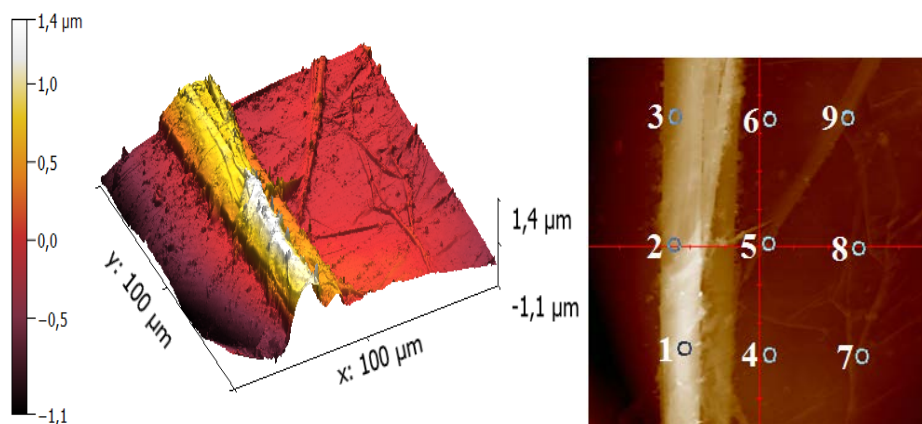
Zdjęcia próbek przedstawiono na rys. 3. Paznokieć został przymocowany do stalowego krążka za pomocą plasteliny.



Rys. 3. Zdjęcia próbek: a) paznokieć ludzki, b) grafit, c) stalowy krążek

Do obliczeń modułu Younga niezbędna jest znajomość liczby Poissona wytypowanych materiałów, która jest następująca [13,15]: ludzki paznokieć  $\nu=0,5$ , grafit  $\nu=0,2$ , stalowy krążek  $\nu=0,3$ . Pomiary topografii powierzchni próbek przeprowadzono w największej z możliwych rozdzielczości 1024x1024, co pozwoliło na rejestrację wychylenia mikrodźwigni w każdym z 1024 punktów rozłożonych równomiernie na każdej z 1024 linii skanowania, z częstotliwością 2 kHz. Następnie w trybie point spectroscopy, za pomocą opcji probe positioning zaznaczono na zeskanowanej powierzchni punkty, w których sonda mikroskopu dokonała pomiaru zależności siły w funkcji odległości ostrze-powierzchnia. Uzyskane krzywe zostały zapisane w pliku w formie pary punktów  $x, y$ . Na podstawie uzyskanych par punktów, otrzymane krzywe wykreślono w programie Excel w formie wykresu i określono maksymalną wartość siły adhezji, siłę przyciągającą pokonującą opór sprężysty belki oraz maksymalną wartość siły nacisku ostrza na powierzchnie w każdym z punktów pomiarowych. Na podstawie uzyskanych zależności siły od odległości ostrze w każdym punkcie wyznaczono moduł Younga powierzchni. Do badania zarówno w trybie kontaktowym jak i point spectroscopy została użyta sonda MLCT-EXMT-A1, wykonana z nieprzewodzącego azotku krzemu.

Jako przykład zostaną przedstawione wyniki uzyskane dla powierzchni grafitu. Powierzchnie zeskanowano w trzech obszarach: 100x100  $\mu\text{m}$  (rys. 4), 34x34  $\mu\text{m}$  i 8,4x8,4  $\mu\text{m}$ , przy czym każdy kolejny obszar skanowania zawiera się w poprzednim zeskanowanym obszarze powierzchni. Parametry chropowatości powyższej zeskanowanej powierzchni:  $R_a=0,306\mu\text{m}$ ,  $R_{ms}=0,428\mu\text{m}$ ,  $R_p=1,412\mu\text{m}$ ,  $R_v=1,114\mu\text{m}$ .



Rys. 4. Obraz uzyskanej topografii powierzchni oraz rozmieszczenie punktów dla metody point spectroscopy

Tabela 1. Przykładowe wartości sił wyznaczonych dla każdego pkt. pomiarowego

Nr punktu pomiarowego	Siła przyciągająca, pokonująca opór sprężysty belki	Maksymalna siła nacisku ostrza na powierzchni	Maksymalna siła adhezji
-	[ $\mu\text{N}$ ]	[ $\mu\text{N}$ ]	[ $\mu\text{N}$ ]
1	0,024	0,532	0,457
2	0,015	0,518	0,466
3	0,028	0,517	0,466
4	0,048	0,524	0,460
5	0,031	0,521	0,493
6	0,311	0,518	0,451
7	0,033	0,529	0,432
8	0,041	0,518	0,494
9	0,077	0,515	0,538

Dla każdego punktu pomiarowego, oszacowano wartości siły przyciągającej (pokonującej opór sprężysty belki), maksymalną siłę nacisku ostrza na powierzchni oraz maksymalną siłę adhezji (tab. 1). Uzyskane wartości tych sił dla każdego obszaru różniły się, a w przypadku pomiaru powierzchni paznokcia ludzkiego niemożliwe

było dokładne wyznaczenie maksymalnej siły adhezji, gdyż przebieg rzeczywistej wartości siły podczas oddalania sondy pomiarowej przekraczał zakres pomiarowy mikroskopu. Warto nadmienić, że w punktach pomiarowym skanowanego obszaru każdej próbki najmniejsze wartości osiągała siła przyciągająca, pokonująca opór sprężysty belki. Potwierdza to fakt, że siły odpychania są silniejsze niż siły przyciągania.

#### 4. WNIOSKI

Mikroskopia sił atomowych może dostarczyć cennych informacji nie tylko o topografii powierzchni, ale i o właściwościach fizycznych i mechanicznych powierzchni badanych próbek.

Podsumowując wyniki uzyskane z badań można wywnioskować, że największą wartością modułu Younga charakteryzowała się powierzchnia grafitu, następnie stalowej płytki, a najmniejszą próbka biologiczna jaką był paznokieć ludzki. Analizując wartości poszczególnych sił z wykresów siła-odległość dla każdej powierzchni próbki, można stwierdzić, iż maksymalne siły nacisku ostrza na powierzchnie próbek, w każdym z badanych materiałów są bardzo zbliżone. Na podstawie pomiaru powierzchni próbki stalowej stwierdzono, że rozmieszczenie punktów pomiarowych nie miało istotnego wpływu na otrzymane wyniki, nie zauważano też znaczących różnic w otrzymanych wynikach w zależności od wysokości nierówności powierzchni w danym punkcie pomiarowym.

Z przeprowadzonych badań wynika, że największą „sztywnością” charakteryzują się powierzchnia grafitu, następnie stalowego krążka, a na końcu powierzchnia ludzkiego paznokcia. Moduł Younga obliczany był na podstawie wzoru opartego na teorii Hertza, która zakłada, że badany materiał jest jednorodny i izotropowy, co może trochę odbiegać od realnej struktury powierzchni. Mikroskop AFM diCaliber, służy głównie do celów edukacyjnych, więc jego możliwości są mniejsze w porównaniu z innymi specjalistycznymi mikroskopami. W wielu mikroskopach ruch w osi Z wykonywany jest poprzez piezoelektryczny stolik, a nie jak jest w tym urządzeniu przez skaner, może to mieć wpływ na uzyskiwane wyniki.

#### LITERATURA

- [1] FRIEDRICH C. R., COANE P. J., VASILE M. J., 1997, *Micromilling development and applications for microfabrication*, W: *Microelectronic Engineering*, 35, 367-372.
- [2] ADAMS D. P., VASILEB M. J., KRISHNANB A. S. M., 2001, *Microgrooving and microthreading tools for fabricating curvilinear features*, W: *Precision Engineering*, 24, 347-356.
- [3] SCHULZE TH., BREZGER B., MERTENS R., PIVK 33. M., PFAU T., MLYNEK J., 2000, *Writing a superlattice with light forces*, W: *Appl. Phys.*, B/70, 671-674.
- [4] BHUSHAN B., 2005, *Nanotribology and nanomechanics.*, W: *Wear*, 259, 1507-1531.

- [5] KASSNER M. E., NEMAT-NASSER S., SUO Z., BAO G., BARBOUR J.C, BRINSON L. C., ESPINOSA H., GAO H., GRANICK S., GUMBSCH P., KYUNG-SUK K., KNAUSS W., KUBIN L., LANGER J., BEN C. LARSON B. C, MAHADEVAN L., MAJUMDAR A., TORQUATO S., FRANK VAN SWOL F., 2005, *New directions in mechanics*, W: *Mechanics of Materials*, 37, 231-259.
- [6] BINNIG G., ROHRER H., 1986, *Scanning tunneling microscopy – from birth to adolescence*, Nobel lecture.
- [7] STOPKA M., DREWS D., MAYR K., LACHER., EHRFELD W., KALKBRENNER T., GRAF M., SANDOGHDAR V., MLYNEK J., 2000, *Multifunctional AFM SNOM Cantilever Probes Fabrication and Measurements*, W: *Microelectronic Engineering*, 53, 183-186.
- [8] GOTSZALK T. P, 2004, *Systemy mikroskopii bliskich oddziaływań w badaniach mikro i nanostruktur*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- [9] BRAMOWICZ M., KŁYSZ S., 2007, *Zastosowanie mikroskopii sił atomowych (AFM) w diagnostyce warstwy wierzchniej*, *Prace Naukowe ITWL*, 22, 159-166.
- [10] KOPACZYŃSKA M., 2010, *Mikroskopia sił atomowych (AFM) – biomedyczne zastosowanie pomiarów w nanoskali*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- [11] SIKORA A., 2012, *Rozwój i zastosowanie zaawansowanych technik mikroskopii sił atomowych w diagnostyce materiałów elektrotechnicznych*, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, 257, 17-114.
- [12] KWACZ M., CHIZHIK S., RYMUZA Z. i inni, 2004, *Badanie właściwości mechanicznych warstwy wierzchniej polimerowych elementów miniaturowych łożyska ślizgowego przy użyciu mikroskopu sił atomowych*, W: *Polimery*, 7-8, 551-557.
- [13] <http://www.jpik.com/afm.230.en.html> (02.12.2013).
- [14] OUYANG Q., ISHIDA K., OKADA K., 2001, *Investigation of micro-adhesion by atomic force microscopy*, W: *Applied Surface Science*, 169-170, 644-648.
- [15] <http://www.azom.com/materials.aspx> (02.03.2014).

# **ZALETY STOSOWANIA MODUŁOWYCH SYSTEMÓW DO POMIARU I ANALIZY STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI W PRZEMYSŁOWEJ KONTROLI JAKOŚCI**

Tatiana MILLER<sup>1</sup>, Krzysztof GAJDA<sup>1</sup>, Aneta ŁĘTOCHA<sup>1</sup>

## **1. WSTĘP**

W artykule przedstawiono zalety stosowania modułowych systemów do pomiaru i analizy struktury geometrycznej powierzchni w przemysłowej kontroli jakości. W praktyce przemysłowej do pomiarów geometrii wyrobów stosowane są kształtografy, natomiast do pomiarów chropowatości najczęściej używane są profilometry warsztatowe. Nie zawsze jednak pomiary wykonywane przyrządami warsztatowymi, wyposażonymi najczęściej w głowice ze ślizgaczem, dają wiarygodne i wystarczająco dokładne wyniki. Obecnie nowoczesne rozwiązania przyrządów do pomiaru i analizy struktury geometrycznej powierzchni łączą funkcje pomiarów kształtu i mikrokształtów oraz chropowatości w jednym urządzeniu, wyposażonym w różne głowice pomiarowe, w tym głowice do pomiaru chropowatości bez ślizgacza i wspólnie dla analizy chropowatości i kształtu oprogramowanie. Większość firm obecnych na rynku europejskim w tej dziedzinie pomiarów dysponuje obecnie takimi systemami. Zakres zastosowania systemów zaprezentowano na przykładach pomiarów wykonanych z użyciem opracowanych w IZTW modułowych systemów do pomiaru makro i mikrostruktury geometrycznej powierzchni TOPO 01 oraz TOPO 02. Wyniki analiz i prezentacje graficzne wyników przedstawiono na przykładach z programu Topografia, opracowanego w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania dla systemów TOPO oraz programu Altimap 3D Premium 6.2, z rodziny programów do analizy topografii powierzchni firmy Digital Surf z serii MountainsMap®Products, stosowanych przez wiele firm produkujących modułowe systemy pomiarowe.

---

<sup>1</sup> Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, ul. Wrocławska 37a, 30-011 Kraków,  
[tatiana.miller@ios.krakow.pl](mailto:tatiana.miller@ios.krakow.pl); [krzysztof.gajda@ios.krakow.pl](mailto:krzysztof.gajda@ios.krakow.pl); [aneta.letocha@ios.krakow.pl](mailto:aneta.letocha@ios.krakow.pl)

## 2. ZALETY I ZAKRES ZASTOSOWANIA MODUŁOWYCH SYSTEMÓW

Zaletą takich systemów są rozwiązania polegające na możliwości podłączania do systemu pomiarowego różnych czujników pomiarowych, co pozwala na konfigurowanie sprzętu do bieżących potrzeb użytkowników i rozbudowywania go w miarę zmieniającego się zakresu zapotrzebowania na inny zakres pomiarów. Dodatkowym wyposażeniem systemów są stoliki skaningowe które pozwalają na wykonywanie pomiarów przestrzennych powierzchni, nie tylko pojedynczych przekrojów.

Sprzęt i oprogramowanie umożliwiają pomiary i analizę zmierzonych powierzchni i zarysów: chropowości, falistości, profilu pierwotnego, prostoliniowości i kształtu, zarówno dla pojedynczych przekrojów jak i dla pomiarów przestrzennych 3D. Pomiary 3D wykonywane są metodą skanowania kolejnych przekrojów, z zastosowaniem precyzyjnego stolika przemieszczającego mierzoną powierzchnię pod ostrzem pomiarowym, na zadanym w programie pomiarowym obszarze. Stosowanie do pomiarów chropowości i mikrozarysów głowic pomiarowych bez ślizgacza o promieniu zaokrąglenia ostrza 2  $\mu\text{m}$  gwarantuje odwzorowanie większości powierzchni i zarysów bez zniekształceń w stosunku do stanu rzeczywistego.

Zakres zastosowania jest tak szeroki że obejmuje prawie wszystkie rodzaje powierzchni, po różnych rodzajach obróbki, z różnych materiałów i w szerokim zakresie geometrii i mikrogeometrii. Ograniczenia pomiarowe jakie występują przy stosowaniu modułowych systemów, w których pomiar realizowany jest metodami stykowymi to bardzo miękkie materiały, które mogą ulec porysowaniu oraz materiały na których występują otwory lub zagłębienia o stromych ściankach. Wgłębienia takie nie zostaną odwzorowane, lub uniemożliwią prawidłowy pomiar, a dodatkowo mogą uszkodzić ostrze pomiarowe. Ograniczenie pomiarów wprowadza również wynikający z metody pomiaru zakres dostępu końcówki pomiarowej do mierzonej powierzchni z jednego kierunku, z pewnymi ograniczeniami kątów wejścia i zejścia ostrza pomiarowego po mierzonych nierównościach powierzchni, np. brak możliwości odwzorowania prostopadłej ścianki.

## 3. ZALETY I ZAGROŻENIA STOSOWANIA NOWOCZESNEGO I ROZBUDOWANEGO OPROGRAMOWANIA

Program analizy zawiera funkcje wymiarowania geometrii i mikrogeometrii zarysów złożonych kształtów dla wszystkich wykonywanych pomiarów. Można określać odległości, kąty, promienie wybranych małych wycinków okręgów wraz z odchyłkami od teoretycznego promienia, prostoliniowość, płaskość, geometrię skomplikowanych mikrokształtów. Zaletą jest też możliwość stosowana procedur „automatycznego wymiarowania”, nazywane również funkcjami Macro, które

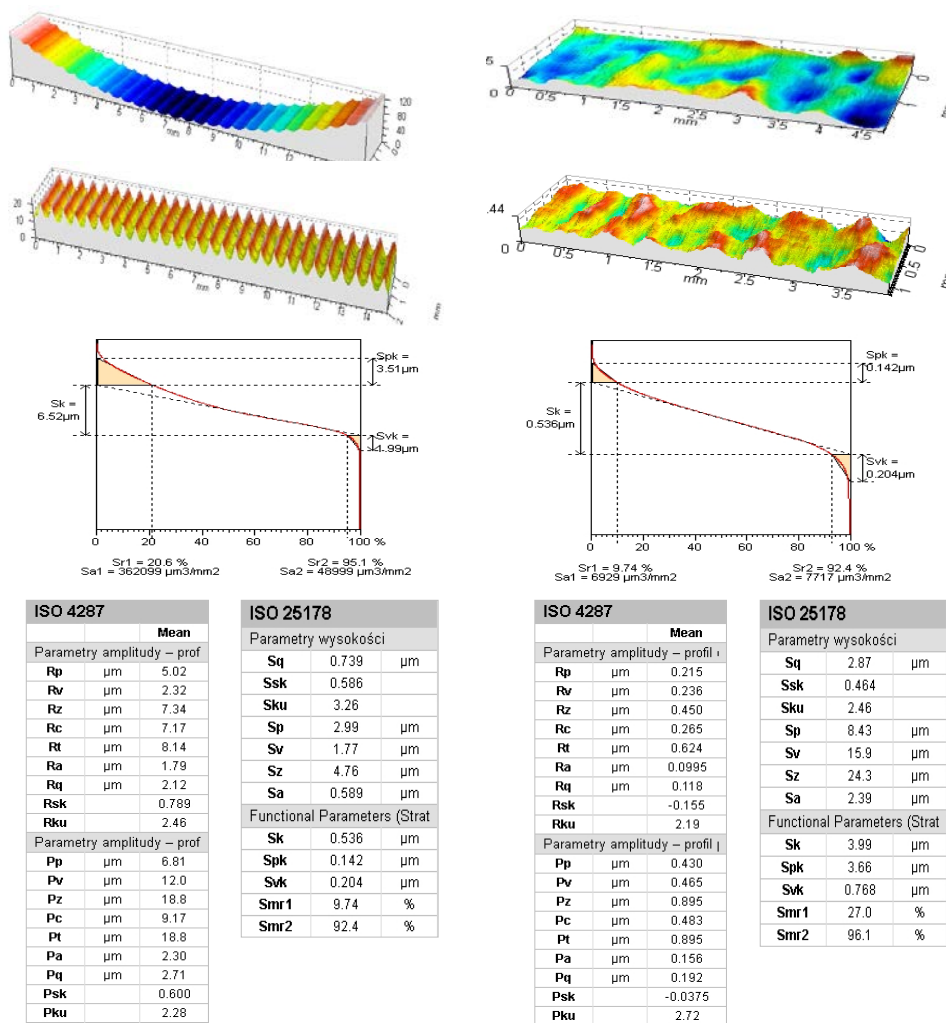
z powodzeniem sprawdzają się w kontroli produkcji seryjnej elementów wymagających powtarzalnego sprawdzania wielu wymiarów. Algorytmy programów pozwalają na wymiarowanie nie tylko zmierzonych punktów profilu, zawierają wiele algorytmów wyznaczania punktów teoretycznych, co pozwala na kontrolę wielu wymiarów konstrukcyjnych i porównanie wyników pomiarów z wymaganiami dokumentacji konstrukcyjnej.

Programy zawierają elementy wyznaczające parametry chropowatości określone między innymi w normach PN-EN ISO 4287 [4], PN-EN ISO 13565-2 [6] oraz w normie ISO 25178-2 [7], obejmującej parametry z zakresu analizy stereometrycznej. Programy zawierają również wiele algorytmów wstępnego przetwarzania danych pomiarowych, w tym nowe algorytmy filtracji, działające zgodnie z normami z grupy ISO 16610 [9,10] oraz wiele dodatkowych operacji możliwych do zastosowania na zmierzonych danych. Jeszcze więcej zagrożeń istnieje przy analizie pomiarów wykonywanych metodami bezstykowymi, gdzie stosowane są algorytmy „retuszu” i wypełniania punktów niezmiernych. Wszystkie te operacje umożliwiają zmianę parametrów przetwarzania danych wejściowych i filtracji, których dobór możemy optymalizować w zależności od charakterystyk i rodzajów obróbki mierzonych powierzchni, ale niesie to zagrożenie takiego przetworzenia danych pomiarowych, że informacja o jakości powierzchni może znacznie odbiegać od stanu rzeczywistego. Stosując niewłaściwie dobrane odcinki pomiarowe i filtry można znacznie zmienić rzeczywiste wartości parametrów chropowatości. Dodatkowo nie powinno się oceniać powierzchni jedynie na podstawie otrzymanych wartości parametrów, wskazane jest zwracanie uwagi na różnice profilu lub powierzchni na wykresach przed filtracją i po filtracji, bo na tej podstawie można zweryfikować czy nie popełniło się błędu podczas pomiaru lub przetwarzania danych i czy analiza wykonana jest poprawnie, w sposób odpowiedni dla danej powierzchni. Czy na pewno eliminuje się z powierzchni tylko te składowe które powinny być usunięte, czy dane nie zostały zmodyfikowane niezgodnie z intencją operatora i zasadami metrologii ?

#### 4. POMIARY CHROPOWATOŚCI

Pomiary chropowatości nie zawsze są łatwe do wykonania i można popełnić błąd zarówno w trakcie doboru warunków wykonania pomiaru jak i podczas obliczania parametrów. Aby zminimalizować możliwość popełnienia błędów w doborze parametrów związanych z pomiarem i analizą należy stosować się do zaleceń zawartych w normach PN-ISO 4288 [5] i ISO 25178-3 [8]. Obserwacja i porównanie wykresów profilu czy powierzchni przed filtracją i po filtracji pomoże zarówno w ocenie jakości powierzchni, jak i w sprawdzeniu czy pomiar, przetwarzanie danych oraz obliczenia zostały wykonane poprawnie. Sam wynik numeryczny nie daje takiej informacji. Dotyczy to zwłaszcza pomiarów wykonywanych na powierzchniach niepłaskich, o niejednorodnej strukturze, posiadających lokalnie różny charakter.

Poniżej przedstawiono przykład wyników pomiarów wykonanych w celu sprawdzenia jakości procesu obróbki na niepłaskiej powierzchni po frezowaniu, którą poddano operacji nagniatania tocznego, końcówką wykonaną z azotku krzemu ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) o średnicy równej 8 mm, po czym ponownie dokonano pomiaru (rys. 1). W celu porównania wyników parametrów chropowatości przed nagniataniem i po nagniataniu w programie analizy z powierzchni usunięto krzywiznę, wypoziomowano ją i policzono parametry. Porównaniu poddano zarówno powierzchnie nie poddane filtracji, aby zachować zniekształcenia wprowadzone przez wykonaną obróbkę, jak i po filtracji.



a) powierzchnia po frezowaniu

b) powierzchnia po frezowaniu i nagniataniu

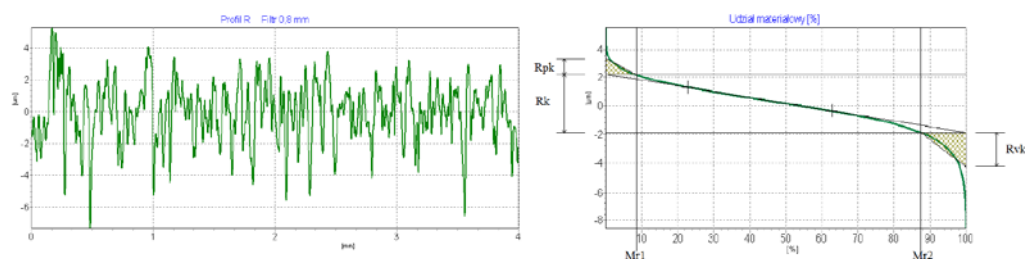
Rys. 1. Przykłady analizy chropowatości powierzchni z programu Altimap Premium 6.2



Przedstawiony powyżej przykład przedstawia możliwości pomiarów i analiz przydatnych do oceny jakości procesów oraz jakości powierzchni uzyskanych np. przy zastosowaniu kilku procesów.

Najważniejszym elementem procesu obróbki i procedury kontroli są walory użytkowe powierzchni, zależne od jej przeznaczenia i warunków eksploatacji. To w dostosowaniu do nich konstruktor decyduje o wyborze odpowiedniego procesu technologicznego oraz określa parametry opisujące jakość powierzchni [1], a pomiary powinny zachować wszystkie dane o powierzchni w niezniekształconej postaci. Rozwój nowoczesnych procesów i technik obróbkowych pozwalają nadawać powierzchniom niespotykane dotąd cechy użytkowe [1], a nowoczesne metody pomiarowe dają możliwości oceny parametrycznej i wizualizacji tych powierzchni.

Do oceny właściwości użytkowych wynikających z rzeczywistej struktury powierzchni bardzo przydatne są parametry rdzenia chropowatości, które związane są ściśle z krzywą udziału materiałowego (Rys. 2).



Rys. 2. Prezentacja graficzna parametrów rdzenia chropowatości z programu Topografia

Parametr  $Sk$  nazywa się wysokością rdzenia i jest to odległość pomiędzy najwyższym oraz najniższym poziomem rdzenia danej powierzchni. Inaczej mówiąc jest to część profilu nie zawierająca wyróżniających się wzniesień i wgłębień. Parametr  $Spk$ , nazywany zredukowaną wysokością wzniesień, jest to średnia wysokość wzniesień, które znajdują się powyżej linii określającej początek rdzenia chropowatości.

Parametr  $Svk$  to zredukowana głębokość wgłębień wyrażana średnią głębokością wgłębień znajdujących się poniżej linii określającej koniec rdzenia chropowatości [2].

Parametry z tej grupy przydatne mogą być do oceny niektórych właściwości użytkowych materiałów podczas eksploatacji.

Parametr  $Sk$  może stanowić miarę efektywnej głębokości chropowatości po wstępnym okresie docierania. Parametr  $Svk$  jest miarą zdolności utrzymywania płynu przez powierzchnie ślizgowe [3]. Małe wartości  $Spk$  świadczą o odporności powierzchni na ścieranie [2].

Zależność pomiędzy grupami parametrów chropowatości, a właściwościami użytkowymi i funkcją powierzchni przedstawiono w tabeli 1 [3].

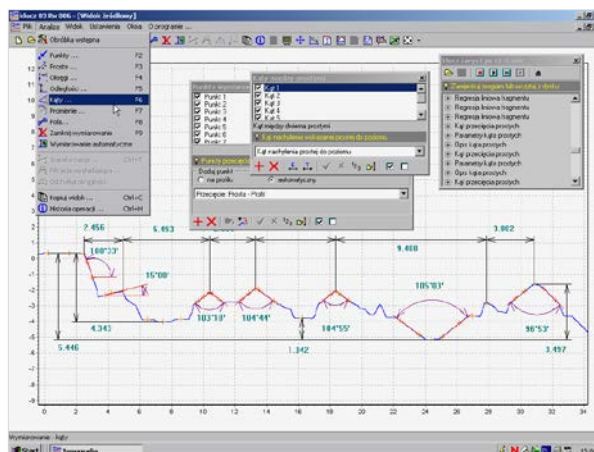
Tabela 1. Zależność pomiędzy parametrami chropowatości a właściwościami powierzchni [3]

Funkcja	Parametry				
	Wysokościowe	Rozkładu i kształtu, parametry udziału materiałowego	Pochylenia i krzywizny	Rozkładu wierzchołków, długość korelacyjna	Kierunkowość
Nośność	X	X			X
Tarcie	X	X	X	X	X
Zużycie	X	X	X	X	X
Refleksyjność	X		X		

## 5. POMIARY KSZTAŁTU

Pomiary i analiza geometrii wyrobów pozwalają na kontrolowanie geometrii wyrobów i narzędzi zarówno w procesach wytwarzania, jak i ocenę ich zużycia w trakcie eksploatacji. Pomiary takie mogą być wykonywane również dla potrzeb kontroli mikronarzędzi. Wówczas pomiary wykonywane są głowicami o małym promieniu ostrza pomiarowego, np. głowicami do pomiarów chropowatości, a wymiarowanie geometrii możliwe jest w zakresie takim jak w pomiarach kształtu, z wykorzystaniem oprogramowania o pełnym zakresie wymiarowania.

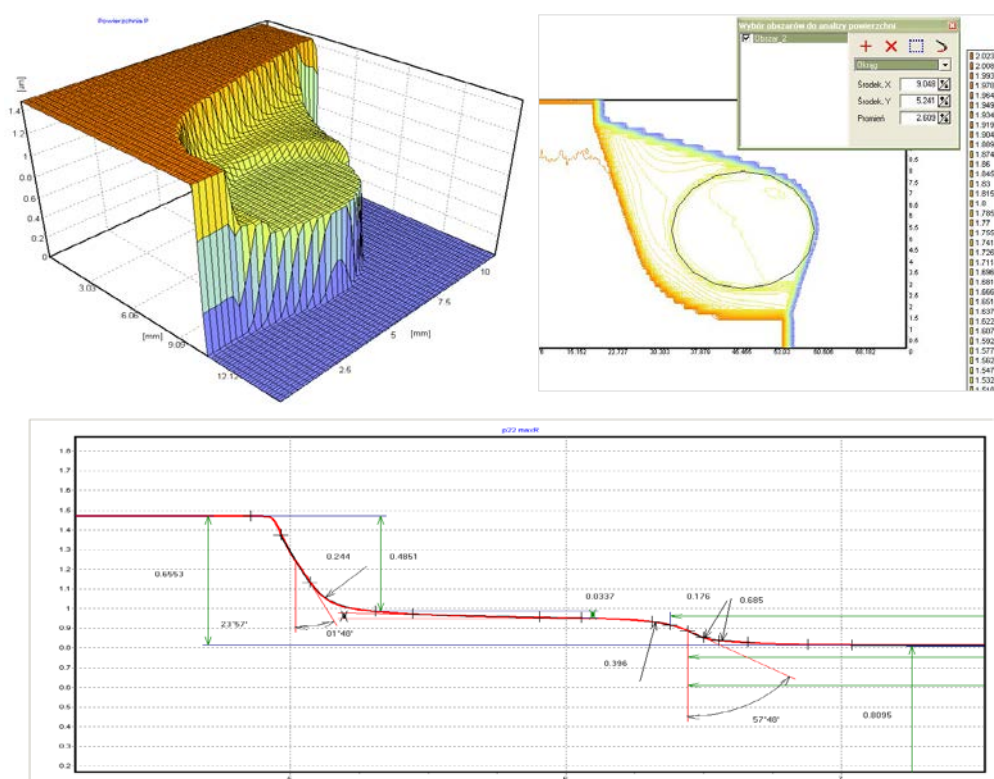
Wykonując pomiary chropowatości i geometrii wyrobów podczas ustalania parametrów technologicznych procesów dla wprowadzanych do produkcji nowych wyrobów, zapewnia się już od początku spełnienie wysokich standardów wykonania produkcji.



Rys. 3. Ekran programu Topografia z wymiarowaniem złożonego zarysu kształtu

## 6. POMIARY STEREOMETRYCZNE 3D

Pomiary stereometryczne mogą być przydatne nie tylko do prezentacji ciekawych wyników w referatach, publikacjach i na konferencjach. Mogą mieć znaczącą wartość użytkową. Pozwalają na kontrolę geometrii przestrzennej wykonywanych złożonych detali lub ich fragmentów, których ze względu na specyficzny kształt, lub mikrokształt nie można zmierzyć innymi metodami. Konieczny jest skanowanie powierzchni dający wystarczająco dużo punktów pomiarowych aby taką powierzchnię ocenić lub odtworzyć.



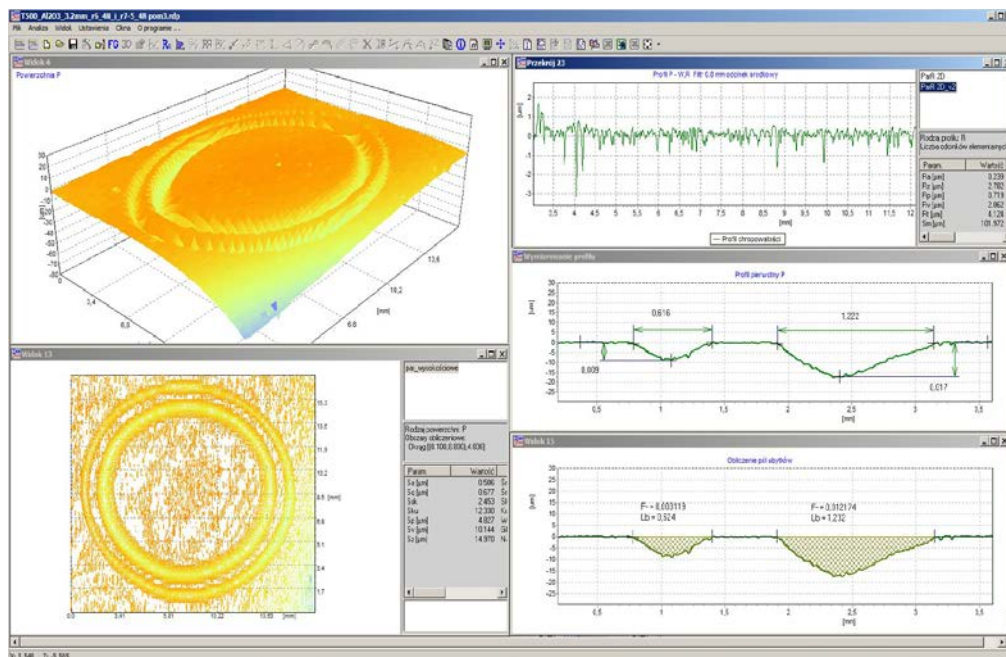
Rys. 4. Pomiar elementu przestrzennego w celu odtworzenia szczegółów kształtu

Pomiar przestrzenny chropowatości daje znacznie więcej informacji o jakości powierzchni niż statystyka pomiarów 2D, ponieważ nie eliminuje błędów kształtu i falistości, daje obraz przestrzenny i możliwość zweryfikowania wymiarów na wybranych przekrojach, charakterystycznych i istotnych dla mierzonej powierzchni.

## 7. POMIARY DLA POTRZEB TRYBOLOGII

Wyniki analiz wykonanych na podstawie pomiarów wykonanych z użyciem modułowych systemów bardzo przydatne są w zakresie badań prowadzonych w dziedzinie tribologii. Na podstawie analizy parametrów, wyznaczanych funkcji i rozkładów możliwa jest np. analiza wpływu parametrów technologicznych procesów stosowanych w czasie obróbki na własności tribologiczne powierzchni podczas jej eksploatacji. Na podstawie niektórych parametrów i charakterystyk możliwa jest np. ocena nacisków powierzchni w kontakcie, jakości smarowania, oszacowanie rzeczywistej powierzchni kontaktu współpracujących elementów, analiza tarcia, zużycia i odkształceń elementów w procesie eksploatacji.

Dlatego kontrola większej liczby parametrów chropowatości (nie tylko Ra), analiza rozkładów i parametrów rdzenia chropowatości i innych parametrów, z grupy parametrów objętościowych 3D pozwoli zweryfikowanie parametrów procesów, a w końcowym rezultacie na otrzymanie jakości powierzchni o wymaganiach spełniających różne wymagania związane z eksploatacją.



Rys. 5. Przykład analizy wyników badań trybologicznych wykonanych w celu oceny właściwości użytkowych nowych materiałów z programu Topografia

## 8. PODSUMOWANIE

Modułowe systemy do pomiaru topografii powierzchni posiadają więcej zalet niż wad, ale zawsze należy pamiętać o właściwym doborze metod, środków pomiarowych, warunków i parametrów wykonywania pomiarów oraz analiz.

### **Podstawowe zalety modułowych systemów do pomiaru i analizy struktury geometrycznej powierzchni:**

- modułowe rozwiązania dają możliwość dostosowania konfiguracji sprzętu w dowolnym czasie, poprzez rozbudowę systemu, co pozwala zoptymalizować relację kosztów zakupu do potrzeb, zapewniając wysoki poziom jakości,
- szeroki zakres możliwości pomiarowych, od części mikrometrów do 50 mm amplitudy, poprzez zastosowanie różnych głowic pomiarowych w jednym systemie pomiarowym,
- łączenie zadań w zakresie pomiarów mikro i makro topografii powierzchni: chropowatość, falistość, prostoliniowość, płaskość oraz pomiar geometrii zarysów kształtu, pomiary 3D wybranych obszarów powierzchni, co dostarcza wiele informacji o jakości powierzchni,
- możliwość automatyzacji cyklu pomiarowego oraz programów analizy mierzonych wielkości poprzez tworzenie procedur dla serii powtarzalnych pomiarów,
- szeroki zakres analizy wyników pomiarów umożliwia przeprowadzanie zarówno prostych pomiarów jak i zaawansowanych badań jakości różnych wyrobów, w tym badań właściwości trybologicznych powierzchni podczas jej eksploatacji,
- analiza ilościowa parametrów chropowatości oraz prezentacja graficzna w postaci wykresów zarysów, powierzchni 3D, map warstwicowych, funkcji i rozkładów pozwalają na powiązanie otrzymanych parametrów z właściwościami użytkowymi materiałów i wyrobów. Istnieją pewne zagrożenia, jednak wiedza o nich pozwoli uniknąć błędów w doborze warunków pomiarów oraz w ocenie.

### **Zagrożenia:**

- bardzo rozbudowane oprogramowanie, niesie zagrożenie w możliwości nieświadomej modyfikacji zmierzonego zarysu lub powierzchni poprzez programowe filtracje i cyfrowe przetwarzanie zmierzonych danych, które mogą zmienić otrzymane wyniki na nie mające wiele wspólnego ze stanem rzeczywistym mierzonych powierzchni,
- niedostosowanie warunków pomiarowych – długości tras pomiarowych, kierunków pomiarów (szczególnie w pomiarach 2D), stosowanie standardowych nastaw, często bez świadomości, że są niewłaściwie dobrane, niesie zagrożenie zaniżenia wyników.

## LITERATURA

- [1] OCZOŚ K. E., LIUBIMOW V., Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem powierzchni kształtowanych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- [2] WIECZOROWSKI M., Wykorzystanie analizy topograficznej w pomiarach nierówności powierzchni. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009.
- [3] ZAWADA-TOMKIEWICZ A., Teoretyczne i doświadczalne podstawy monitorowania procesu toczenia z wykorzystaniem informacji o cechach stereometrycznych obrabianej powierzchni. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012.
- [4] PN-ISO 4287: Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [5] PN-ISO 4288: Wymagania geometryczne wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni. Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni metodą profilową.
- [6] PN-EN ISO 13565-2: Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni. Metoda profilowa. Powierzchnie o warstwowych właściwościach funkcjonalnych. Opis wysokości za pomocą linearyzacji krzywej udziału materiałowego.
- [7] ISO 25178-2: Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
- [8] ISO 25178-3: Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal. Part 3: Specification operators.
- [9] PN-EN ISO 16610-21: Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters.
- [10] PN-EN ISO 16610-61 Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 61: Linear areal filters: Gaussian filters.

# **WYZNACZANIE ODCHYLEK GEOMETRYCZNYCH ZESPOŁU POWIERZCHNI WALCOWYCH W OPARCIU O PROGRAM OBLICZENIOWY DEFORMLOC-NKLN**

Krzysztof NOZDRZYKOWSKI<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

W budowie maszyn jedną z podstawowych grup przedmiotów stanowią przedmioty o zarysie walcowym. Zarys taki może występować jako jednolity dla całego elementu (wałki, otwory) lub jako jeden z możliwych zarysów występujących w przedmiocie (korpusy, wały o złożonej geometrii, płyty, tuleje, itp.). Powszechność stosowania tego zarysu w budowie maszyn wynika z prostoty jego wykonania, uniwersalności zastosowania w zakresie wzajemnej współpracy takich elementów czy też nieograniczoności wymiarowej.

Spośród tej grupy części maszyn wyróżnić można specyficzną grupę elementów, którymi są części maszyn zawierające w sobie między innymi zespoły powtarzalnych powierzchni walcowych. Powierzchnie takie rozmieszczone są w tym przypadku na znacznej odległości, a całościowo można je potraktować jako jedną powierzchnię walcową z odcinkami nieciągłości. Do tej grupy przedmiotów należy zakwalifikować takie elementy maszyn, jak korpusy silników zawierające zespoły otworów gniazd łożyskowych oraz osadzone w nich wały korbowe lub wały rozrządu zawierające zespoły czopów głównych i korbowych. Takimi elementami są też wały proste i stopniowe, które z uwagi na swoje konstrukcje, gabaryty oraz masy wymagają, podobnie jak wały korbowe, wielomiejscowego podparcia.

Elementy takie powinny spełniać określone wymogi odnośnie dokładności geometrycznego wykonania narzucone przez konstruktora. Wymogi te wynikają często z wieloletniej praktyki i podyktowane są trwałością oraz warunkami pracy maszyny roboczej. Narzuca to z kolei konieczność stosowania do pomiarów tego typu

---

<sup>1</sup> Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Mechaniczny Instytut Podstawowych Nauk Technicznych, Zakład Podstaw Budowy i Eksploatacji Maszyn, Szczecin ul. Podgórna 51-53

części maszyn, metod i technik pomiarowych poprawnych pod względem metrologicznym, których dokładność dostosowana będzie do wymaganych dokładności wykonania geometrycznego podanym w specyfikacji wyrobu.

## 2. PROCEDURY I INTERPRETACJI WYNIKÓW POMIARÓW ODCHYLEK GEOMETRYCZNYCH ZESPOŁU POWIERZCHNI WALCOWYCH

Praktyczna realizacja bazy przyjętej do oceny odchyłek geometrycznych zespołu czopów głównych wału korbowego może się odbywać poprzez ustalenie obiektu mierzonego w kłach lub w pryzmach. W obu wariantach możliwych ustaleń wału środek zarysu przekroju mierzonego może przemieszczać się względem osi obrotu realizowanej przez układ pomiarowy. Wyniki pomiarów zawierają w sobie opis zarysu kształtu przekroju mierzonego oraz mimośrodowość reprezentującą usytuowanie środka zarysu względem osi obrotu realizowane przez układ pomiarowy. Przyjęcie do wyznaczenia poszukiwanych wartości odchyłek geometrycznych elementu odniesienia zgodnego z zaleceniami norm [8, 9], który można byłoby uznać za jednoznaczny i uniwersalny z punktu widzenia kompleksowej oceny mierzonego zespołu powierzchni walcowych jest w tym przypadku problematyczne.

Uwzględniając powyższe trudności, zgodnie z koncepcją autora, zaproponowano wyznaczenie odchyłek kształtu i położenia osi względem tzw. elementu średniokwadratowego. Przyjęcie elementu średniokwadratowego jako elementu odniesienia do oceny odchyłek geometrycznych podyktowane było szeregiem zalet tego typu elementu, co wykazano w literaturze tematu: [1, 3, 5, 7]. Założono też, że procedura pomiarowa oparta będzie na pomiarach zarysów okrągłości przekrojów poprzecznych, mierzonego zespołu powierzchni walcowych, realizowanych w biegunowym układzie współrzędnych.

Taki sposób pomiarów wymaga opracowania wyników pomiarów w dwóch etapach, z których pierwszy umożliwi wyznaczenie odchyłek kształtu, drugi – odchyłek położenia osi. Zgodnie z przyjętą koncepcją w obu etapach elementem odniesienia jest element średniokwadratowy. W przypadku oceny zarysu kształtu jest to okrąg średniokwadratowy uzyskany z mierzonego zarysu kształtu, natomiast w przypadku oceny współosiowości jest to oś średniokwadratowa  $O'$ , uzyskana z wyznaczonych wcześniej środków poszczególnych zarysów kształtu mierzonych w określonych przekrojach poprzecznych na długości wału. Interpretację graficzną wyznaczania odchyłek kształtu i położenia osi przedstawiono na rysunkach 1a, b i c.

Powszechnie stosowana przy opisie zarysu kształtu analiza harmoniczna umożliwia przedstawienie zmierzonego zarysu w postaci sumy wyrazów trygonometrycznego szeregu Fouriera, co w przypadku, gdy zarys ten jest określany względem okręgu średniego, odpowiada zapisowi matematycznemu postaci:



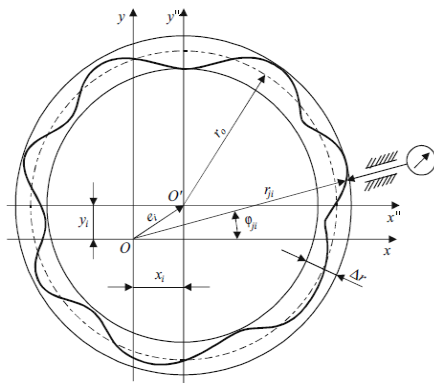
$$\Delta F(\varphi) = \sum_{n=1}^k C_{Fn} \cos n(\varphi - \varphi_{Fn}) \quad (1)$$

gdzie:

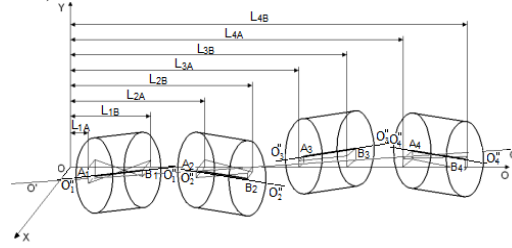
$C_{Fn}$  – amplituda kolejnej  $n$ -harmonicznej zarysu mierzonego,

$\varphi_{Fn}$  – przesunięcie fazowe kolejnej  $n$ -harmonicznej zarysu mierzonego.

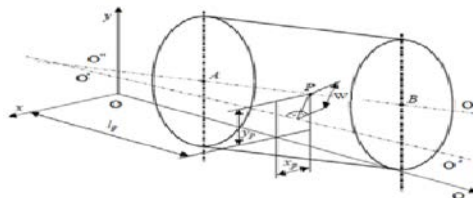
a)



b)



c)



Rys. 1. Schemat pomiaru złożonej odchyłki kształtu i położenia osi oraz graficzna interpretacja pierwszego i drugiego etapu opracowania danych: a) wyznaczenie odchyłki kształtu, b) wyznaczenie osi odniesienia, c) wyznaczenie odchyłki współosiowości

lub z uwzględnieniem składowych amplitud harmonicznych:

$$\Delta F(\varphi) = \sum_{n=1}^k A_{Fn} \cos n\varphi + \sum_{n=1}^k B_{Fn} \sin n\varphi \quad (2)$$

gdzie:  $A_{Fn}, B_{Fn}$  – składowe amplitudy kolejnej  $n$ -harmonicznej zarysu zmierzonego.

Składowe amplitud poszczególnych harmonicznych opisane są następującymi zależnościami używanymi powszechnie w obliczeniach numerycznych [1, 2, 6]:

$$A_{Fn} = \frac{2}{n_j} \sum_{j=1}^{n_j} r_j \cos n \frac{2\pi j}{n_j} \quad (3)$$

$$B_{Fn} = \frac{2}{n_j} \sum_{j=1}^{n_j} r_j \sin n \frac{2\pi j}{n_j} \quad (4)$$

gdzie:

$r_j$  – zdyskretyzowane wartości funkcji  $\Delta F(\varphi)$ ,

$n_j$  – liczba przedziałów przyjętych do dyskretyzacji,

$n$  – numer kolejnej harmonicznej.

Przyjęta procedura pomiarowa realizowana jest w układzie biegunowym. Mierzonymi wielkościami w poszczególnych przekrojach poprzecznych  $l_i$  są kolejne wartości promienia  $r_{ji}$  przy określonym kącie obrotu wału  $\varphi_{ji}$ . Uwzględniając w dalszej kolejności, że obrót wału będzie dokonywany o stałą wartość kątową  $\varphi_{ji}$ , współrzędne  $x_i, y_i$  środka dowolnego zarysu okrągłości  $i$  (usytuowanego w odległości  $l_i$ ), odniesione względem osi obrotu realizowanej przez układ pomiarowy (oś  $O$  na rys.1), można wyznaczyć z zależności (3), (4), przyjmując  $n = 1$ .

Średniokwadratowy element odniesienia (oś odniesienia wyznaczana na podstawie współrzędnych punktów  $x_i, y_i$ ) przyjęty do oceny odchyłki współosiowości określają ogólnie znane i stosowane zależności matematyczne służące wyznaczeniu elementu średniokwadratowemu, podobnie jak zależności umożliwiające wyznaczenie odległości punktu  $P$  od prostej lub osi w przestrzeni, która zgodnie z proponowaną procedurą opracowania danych odpowiada poszukiwanej wartości odchyłki położenia osi  $W$ .

Przyjęta procedura pomiarowa i interpretacja wyników umożliwia przedstawienie dowolnego zarysu okrągłości  $F(\varphi)$  na wykresach w układzie współrzędnych biegunowych jako zależność chwilowej wartości promienia  $r_{jp}$  od kąta  $\varphi_{jp}$ , określającego położenie tego promienia, a w układzie współrzędnych kartezjańskich jako zależność zmian chwilowej odległości  $y_{pm}$  zmierzonego zarysu od linii średniej  $m$ .

### 3. WYZNACZANIE SKŁADOWYCH HARMONICZNYCH TRANSFORMOWANEGO ZARYSU OKRĄGŁOŚCI DLA POMIARÓW REALIZOWANYCH W UKŁADACH DWUPRYZMOWYCH

Jak już podkreślano wcześniej, zgodnie z powszechnie przyjętym sposobem zapisu zarysu okrągłości walcowych części maszyn, dowolny zarys można przedstawić w postaci rozwinięcia jego funkcji w trygonometryczny szereg Fouriera [1, 3]. Zatem dla każdego zarysu okrągłości można wyznaczyć określoną liczbę  $n$  składowych harmonicznnych, opisujących ten zarys za pomocą amplitud  $C_n$  harmonicznnych i ich wzajemnych przesunięć fazowych  $\varphi_n$  lub za pomocą składowych tych amplitud  $A_n, B_n$  (zależności (1–4)).

Odniesieniowe pomiary zarysów okrągłości, do których należą pomiary w pryzmach, charakteryzują się tym, że zmierzony zarys okrągłości  $\Delta F(\varphi)$  różni się w większym lub mniejszym stopniu od jego zarysu rzeczywistego  $\Delta R(\varphi)$ . Stopień tej różnicy określa tzw. współczynnik zniekształcenia pomiarów w pryzmie zależny między innymi od parametrów metody. Wykazano [4, 5], że dla przypadku ustalenia przedmiotu w dwóch pryzmach, w oparciu o opracowane funkcje przejścia, wyznaczyć można składowe amplitud poszczególnych harmonicznnych zarysu przekształconego rzeczywistego  $\Delta R_{p3}(\varphi)$  przy znanych wartościach składowych amplitud harmonicznnych zarysu zmierzonego  $\Delta F_3(\varphi)$  oraz składowych amplitud

harmonicznym zarysów przekształconych rzeczywistych  $\Delta R_{p1}(\varphi)$ ,  $\Delta R_{p2}(\varphi)$  (wynikających ze znanych wcześniej zmierzonych zarysów okrągłości stykających się z tworzącymi przyzmy ustalających  $\Delta F_1(\varphi)$ ,  $\Delta F_2(\varphi)$ ). Składowe te wyrażone w postaci zależności funkcyjnych zapisać można następująco:

$$A_{Rn3} = Q(A_{Fn1}, B_{Fn1}, A_{Fn2}, B_{Fn2}, A_{Fn3}, M_n, N_n, l_i, l) \quad (5)$$

$$B_{Rn3} = R(A_{Fn1}, B_{Fn1}, A_{Fn2}, B_{Fn2}, B_{Fn3}, M_n, N_n, l_i, l) \quad (6)$$

przy czym składowe  $M_n$  i  $N_n$  dla określonego  $n$  są funkcją tzw. parametrów metody.

Zarys rzeczywisty przekształcony można przedstawić wtedy za pomocą trygonometrycznego szeregu Fouriera w postaci [1]:

$$\Delta R_p(\varphi) = \sum_{n=2}^k C_{Rnp} \cos \left( n\varphi - \arctg \frac{B_{Rn}}{A_{Rn}} \right) \quad (7)$$

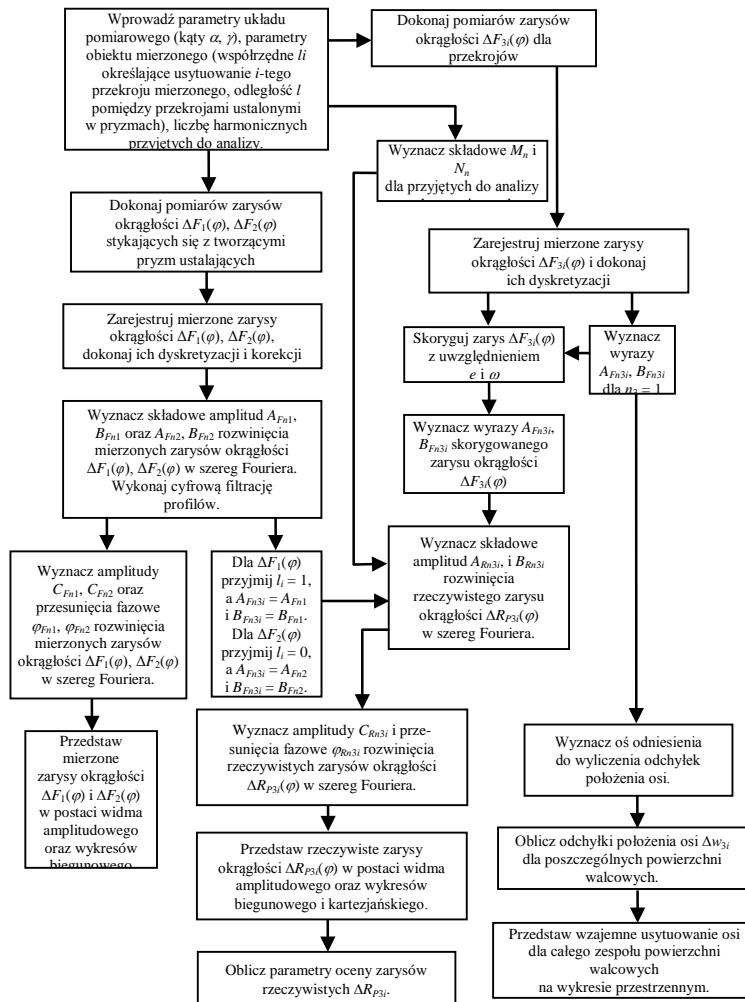
Opracowane funkcje przejścia umożliwiają po uprzednim dokonaniu pomiarów zarysów okrągłości (w tym oczywiście zarysów stykających się z tworzącymi przyzmy ustalających) wyznaczenie amplitud i przesunięć fazowych poszczególnych harmonicznym ich zarysów rzeczywistych oraz poszukiwanych wartości odchyłek kształtu. Umożliwiają również wyznaczenie współrzędnych środków mierzonych zarysów okrągłości służących wyznaczeniu osi odniesienia przyjętej do oceny odchyłek położenia i poszukiwanych wartości odchyłek położenia osi.

#### 4. PROGRAM DEVFORMLOC-NKŁN DO WYZNACZANIA ODCHYLEK KSZTAŁTU I POŁOŻENIA OSI ZESPOŁU POWIERZCHNI WALCOWYCH

W oparciu o wymienione wcześniej podstawy opracowany został autorski program obliczeniowy o nazwie DEVFORMLOC-NKŁN, który przy uwzględnieniu założeń wynikających z procedury pomiarowej i metodyki przetwarzania danych umożliwia:

- analizę harmoniczną zmierzonego zarysu okrągłości  $F_3(\varphi)$  (wyznaczenie składowych  $A_{Fn3}$ ,  $B_{Fn3}$  amplitud zarysu zmierzonego oraz ich przesunięć fazowych  $n\varphi_3$ );
- wyznaczenie składowych  $A_{Rpn3}$ ,  $B_{Rpn3}$  amplitud zarysu przekształconego rzeczywistego  $R_{p3}(\varphi)$ ;
- przedstawienie zarówno zmierzonego zarysu okrągłości  $F_3(\varphi)$ , jak i rzeczywistego  $R_{p3}(\varphi)$  na wykresach w układzie współrzędnych biegunowych i kartezjańskich oraz w postaci dyskretnego widma amplitudowego;
- obliczenie poszukiwanych parametrów oceny mierzonego zespołu powierzchni walcowych (odchyłek okrągłości  $\Delta R_{3i}$ , odchyłek współosiowości  $\Delta w_{3i}$ );
- przedstawienie wzajemnego położenia zespołu mierzonych powierzchni walcowych w postaci graficznej na wykresach przestrzennych.

Kolejność poszczególnych procedur realizowanych według programu DEVFORMLOC-NKŁN przedstawia schemat blokowy na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat blokowy programu DEVFORMLOC-NKŁN

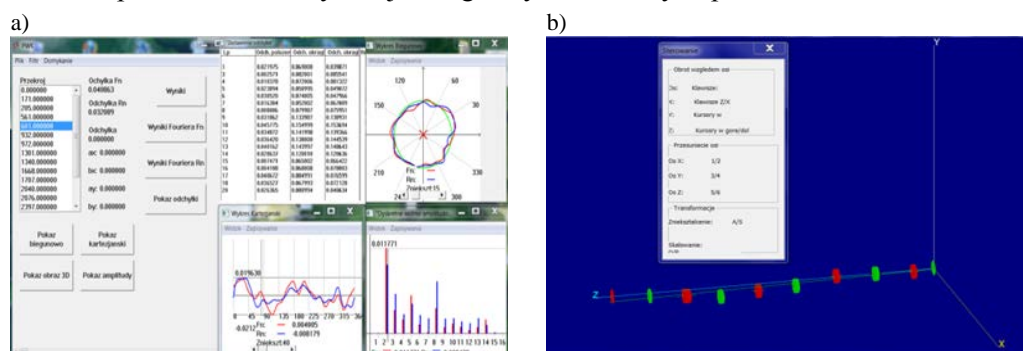
Po ustaleniu i wprowadzeniu danych wejściowych ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $l_i$  i  $l$ ) dokonywany jest pomiar zarysów okrągłości stykających się z tworzącymi pryzm ustalających  $F_1(\varphi)$ ,  $F_2(\varphi)$  oraz pozostałych zarysów  $F_{3i}(\varphi)$  mierzonego zespołu powierzchni walcowych. Otrzymany w wyniku pomiaru sygnał analogowy przetwarzany jest następnie w postać cyfrową, pozwalającą na dokonanie analizy harmonicznego tych zarysów. Wyznaczane są w ten sposób amplitudy poszczególnych harmonicznych  $C_{Fn1}$ ,  $C_{Fn2}$ ,

$C_{Fn3i}$ , ich przesunięcia fazowe  $\varphi_{Fn1}$ ,  $\varphi_{Fn2}$ ,  $\varphi_{Fn3i}$  oraz wartości składowych amplitud poszczególnych harmonicznich  $A_{Fn1}$ ,  $B_{Fn1}$ ,  $A_{Fn2}$ ,  $B_{Fn2}$  i  $A_{Fn3i}$ ,  $B_{Fn3i}$ .

Wyliczone wartości składowych  $A_{Fn3i}$ ,  $B_{Fn3i}$  dla  $n=1$  umożliwiają w dalszej kolejności wyznaczenie osi odniesienia przyjętej do wyliczenia odchyłek położenia osi oraz wartości odchyłek położenia osi  $\Delta w_{3i}$ .

Obliczone wartości składowych  $A_{Fn1}$ ,  $B_{Fn1}$ ,  $A_{Fn2}$ ,  $B_{Fn2}$  i  $A_{Fn3i}$ ,  $B_{Fn3i}$  dla  $n > 1$  (skorygowany zarys okrągłości) oraz ustalone wartości składowych  $M_n$  i  $N_n$  funkcji przejścia  $Q$  i  $R$  umożliwiają z kolei wyznaczenie składowych  $A_{Rn3i}$ ,  $B_{Rn3i}$  amplitud poszczególnych harmonicznich rzeczywistego przekształconego zarysu okrągłości  $R_{p3i}(\varphi)$ . W oparciu o składowe  $A_{Rn3i}$ ,  $B_{Rn3i}$  wyliczane są wartości amplitud  $C_{Rn3i}$  oraz ich przesunięcia fazowe  $\varphi_{Rn1i}$ , co warunkuje możliwość przedstawienia zarysu rzeczywistego w postaci trygonometrycznego szeregu Fouriera.

Każdy z etapów realizowanych obliczeń umożliwia przedstawienie końcowe wyników w postaci tabelarycznej oraz graficznej. Dla mierzonych zarysów okrągłości jest to zestawienie tabelaryczne amplitud poszczególnych harmonicznich, ich przesunięć fazowych oraz wartości wyliczonych parametrów oceny zarysów. Dla całego zespołu powierzchni walcowych jest to tabelaryczne zestawienie wyliczonych wartości parametrów oceny wzajemnego usytuowania tych powierzchni.



Rys.3. Widok ekranu programu DEVFORMLOC-NKŁN po wykonaniu pomiarów i obliczeń odchyłek geometrycznych oraz analizy harmonicznnej zarysów okrągłości mierzonego zespołu powierzchni walcowych

Graficzna interpretacja obejmuje możliwość przedstawienia analizowanych zarysów na wykresach w układzie współrzędnych biegunowych i kartezjańskich oraz w postaci dyskretnego widma amplitudowego (rys. 3a). Wzajemne usytuowanie zespołu mierzonych powierzchni walcowych względem przyjętej osi odniesienia oraz osi realizowanej przez układ pomiarowy przedstawione jest na wykresach przestrzennych (rys. 3b).

Biorąc pod uwagę, że przyjęte przy opracowaniu modeli matematycznych założenia upraszczające mogą być źródłem błędów metody, omawiany program

przeprowadza niezbędne obliczenia z uwzględnieniem wielkości wpływających na dokładność pomiaru. Procedura ta dotyczy zarówno wyznaczanych odchyłek i zarysów kształtu, jak również odchyłek położenia osi. Opracowane funkcje przejścia  $Q$  i  $R$  umożliwiają uwzględnienie wielkości wpływających na dokładność pomiaru, czyli błędów o charakterze systematycznym i przypadkowym. Uwzględnienie wielkości wpływających w zależności od ich charakteru generowane jest automatycznie podczas opracowania wyników pomiarów lub po aktywowaniu zakładki „korekcja”. W przypadku użycia zakładki „korekcja” istnieje możliwość uwzględnienia wybranych wielkości wpływających, zwłaszcza tych, które w sposób istotny wpływają na wyniki opracowania.

## 5. PODSUMOWANIE

Zaprezentowany program obliczeniowy charakteryzuje się dużą uniwersalnością. Może być wykorzystywany do realizacji zadań pomiarowych metodą odniesieniową dowolnych części maszyn, zawierających zespoły powierzchni walcowych z wykorzystaniem różnych układów pomiarowych.

Opisany program przystosowany został do opracowania danych otrzymanych bezpośrednio z pomiarów zarysów okrągłości na obiektach rzeczywistych. Sygnał analogowy z czujnika pomiarowego zostaje przetworzony w tym przypadku na postać cyfrową dyskretną, natomiast procedura opracowania danych przebiega zgodnie z omawianym wcześniej programem obliczeniowym. Taka postać opracowanego programu czyni go uniwersalnym dla rozwiązania szerokiej klasy zagadnień.

## LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., *Odniesieniowe metody pomiaru zarysów okrągłości części maszyn*. Monografie, Studia, Rozprawy, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1998.
- [2] ADAMCZAK S., *Pomiary geometryczne powierzchni – zarysy kształtu falistości i chropowatości*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
- [3] FITA S., *Analiza błędów metod pomiaru kształtu przedmiotu o przekroju kołowym*. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, 1977.
- [4] NOZDRZYKOWSKI K., *Wyznaczanie składowych amplitud harmonicznych transformowanego zarysu okrągłości*. W: *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 55 Nr 12/2009, 1027–1029.
- [5] NOZDRZYKOWSKI K., *Metodyka pomiarów geometrycznych odchyłek powierzchni walcowych wielkogabarytowych elementów maszyn na przykładzie wałów korbowych silników okrętowych*. Monografia, Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2013.
- [6] SZABATIN J., *Podstawy teorii sygnałów*. WKŁ, Warszawa 1990.
- [7] ŻEBROWSKA-LUCYK S., *Wpływ rodzaju okręgu odniesienia na wyniki oceny odchyłki kołowości*. W: *Mechanik* 1979, 1, 207–210.
- [8] PN-EN ISO 1101:2006 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) –Tolerancje geometryczne-Tolerancje kształtu, kierunku, położenia i bicia.
- [9] PN-EN ISO 14660-1:2001 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Elementy geometryczne - Część 1: Podstawowe terminy i definicje.

# EVALUATION OF 3D PRINTED AEROFOIL MODELS FOR WIND TUNNEL TESTING

Krzysztof OLASEK<sup>1</sup>, Piotr WIKLAK<sup>1</sup>

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. AIM OF THE STUDY AND MOTIVATION

3D printing, as an additive process, offers much more than traditional machining techniques in terms of achievable complexity of a model shape. That fact was a motivation to adapt discussed technology as a method for creating objects purposed for aerodynamic testing. The following paper provides an overview of various 3D printing techniques. Four models of a standard NACA0018 aerofoil were manufactured in different 3D printing methods: Multi-Jet Modelling (MJM), Selective Laser Sintering (SLS) and Fused Deposition Modeling (FDM). Various parameters of the models have been included in the analysis: surface roughness, dimension tolerance, strength, details quality, surface imperfections and irregularities as well as thermal properties.

### 1.2. 3D PRINTING AND AERODYNAMIC STUDY

Preparation of an appropriate model to conduct experiments is a crucial aspect of every science investigation. Usually, apart from the requirement to achieve a desired level of a model quality, it is also very important to keep in mind the costs and time of its manufacturing. Recently, development of technologies made the production of even very complicated objects simpler, cheaper and less time consuming. One of such techniques that can simplify life of every researcher seems to be a 3D printing (an example of additive manufacturing). This method of fabrication is a process of making

---

<sup>1</sup> Łódź University of Technology, Institute of Turbomachinery, Wólczańska 219/223, 90-924 Łódź, Poland

a three-dimensional solid objects from a digital model. 3D printing is an additive process, where successive layers of material are laid down in controlled way in order to achieve desired shape. 3D printing is often put in opposition to traditional machining techniques, which mostly rely on the removal of material by methods such as drilling, turning, milling or cutting. The 3D printing has begun to exhibit great applications potential and advantages in the aerospace, construction, architecture, automotive, power engineering, dental and medical industries, biotech (human tissue replacement), education and many other fields providing a cost-effective and time-efficient way to produce low-volume, customized products with complicated geometries and advanced material properties.

In aerodynamic experiment a crucial factor is proper preparation of tested elements surface. Various 3D printing techniques provides different quality and surface finish which is not always acceptable for certain application [1]. The following paper attempts to review chosen properties of rough 3D printouts and analyse them.

## 2. MODELS MANUFACTURING

### 2.1. TECHNOLOGIES AND MATERIALS

Aim of the research carried out was to evaluate the utility of most common 3D printing techniques for aerodynamic study. Similar field has been already explored by various research centres (e.g. [2], [3]). In order to perform a reliable comparison of most common 3D printing methods, four models of standard NACA0018 aerofoil have been created in various materials and technologies: Multi-Jet Modelling (MJM), Selective Laser Sintering (SLS) and Fused Deposition Modeling (FDM). Each of them is described briefly in table 1. The most crucial factor defining the 3D printing technology and influencing the properties of final product manufactured is the type of bulk material used. Depending on the fact whether a solid filament is extruded (FDM), fine powder is laser-sintered (SLS) or liquid is solidified by means of UV light curing (MJM), models of various quality and properties are obtained.

Tab. 1. The overview of the most popular printing techniques and materials

Type	Technology	Materials
Extrusion	Fused deposition modeling (FDM)	Thermoplastics: PLA, ABS, nylon
Granular	Selective laser sintering (SLS)	Thermoplastics, metal powders, ceramic powders
Liquid	Multi Jet Modeling (MJM)	Acrylic Plastic

Materials used for printing models discussed in this paper were as follows: ABS – in FDM technology, nylon and alumide (blend of nylon and aluminium) – in SLS technology and UV curable acrylic plastic – in MJM technology.



Table 2 presents the most significant parameters of discussed materials and 3D printing techniques [4], [5], [6].

Tab. 2. 3D printing materials data

	<b>Alumide</b>	<b>PA 2200 (nylon)</b>	<b>UV curable acrylic plastic</b>	<b>ABS</b>
<b>3D printing technology</b>	SLS	SLS	MJM	FDM
<b>accuracy</b>	$\pm 0.15mm$	$\pm 0.15mm$	$\pm 0.025-0.05mm$	- <sup>a</sup>
<b>min. wall thickness</b>	0.8mm	0.7mm	0.3mm	- <sup>a</sup>
<b>density</b>	1.36g/cm <sup>3</sup> <sup>b</sup> 0.67g/cm <sup>3</sup> <sup>c</sup>	0.93g/cm <sup>3</sup> <sup>b</sup> 0.45g/cm <sup>3</sup> <sup>c</sup>	1.02g/cm <sup>3</sup>	1.05g/cm <sup>3</sup>
<b>tensile modulus</b>	3800MPa	1700MPa	1108MPa	1627MPa
<b>tensile Strength</b>	48MPa	48MPa	26.2MPa	22MPa
<b>flexural modulus</b>	3600MPa	1500MPa	n/d	1834MPa
<b>flexural strength</b>	72MPa	58MPa	26.6MPa	41MPa
<b>elongation at break</b>	4%	24%	9%	6%
<b>shore D - hardness</b>	76	75	n/d	n/d
<b>thermal properties</b>	172-180°C (melting point) 177°C (heat deflection temp. at 0.45MPa)	172-180°C (melting point)	46°C (heat distortion temp. at 0.45MPa) 80°C (heat softening temp)	190-240°C (melting point) 90°C (heat deflection temp. at 0.45MPa)
<b>recycling</b>	non recyclable	recyclable	most recyclable	recyclable

<sup>a</sup> FDM accuracy depends on filament thickness and layer structure [8], [9], <sup>b</sup> laser-sintered part density, <sup>c</sup> bulk density

## 2.2 AEROFOIL DESIGN

Aerofoil with complex structure adapted for aerodynamic study has been designed and printed in 4 different materials described in previous section. Model dimensions are 100mm chord and 170mm span. Additionally two side segments have been manufactured with MJM technique. Segments assembled with the aerofoil extend its span to 300mm. As only central part of the assembly is used for measurements, side segments were printed in one technology (MJM with high definition in opposition to ultra-high definition option used for printing central element) and can be applied with all 4 testing models. Aerofoil wall thickness along its circumference is constant and equals 4mm. In the Figure 1 printed aerofoils are shown.

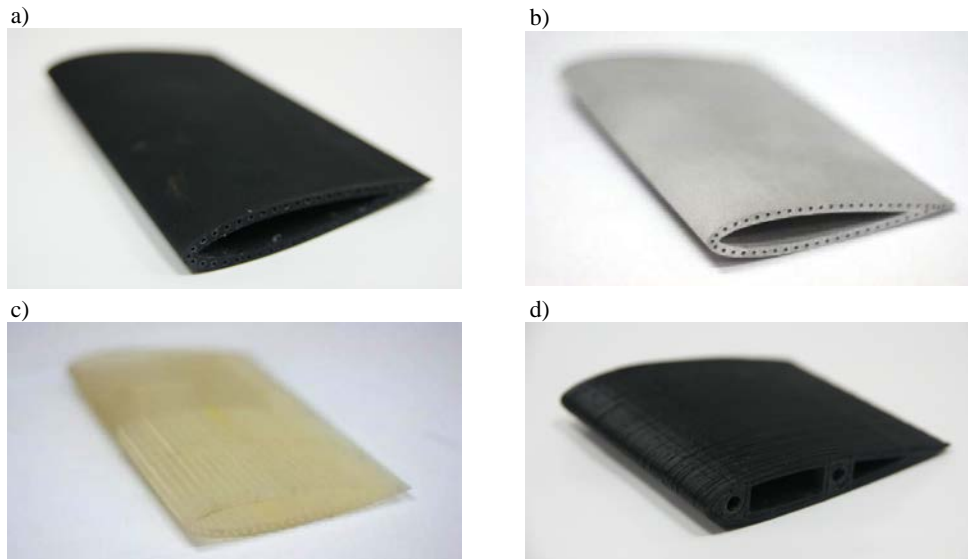


Fig. 1. Examples of 3D printed NACA0018 aerofoil models in (a) SLS (black PA2200), (b) SLS (alumide), (c) MJM, (d) FDM technology

### 3. MODELS EVALUATION

#### 3.1. GENERAL OVERVIEW

Printed models differs visually from each other as it is shown in Figure 2. Preliminary evaluation of models quality has been performed. Most findings and observations are listed in Table 3.

Tab. 3. NACA0018 aerofoil models 3D printouts evaluation.

	<b>MJM</b>	<b>SLS</b>	<b>SLS (alumide)</b>	<b>FDM</b>
<b>color/opacity</b>	translucent	black	silver (shiny)	black
<b>surface roughness</b>	low	moderate	moderate	high
<b>surface irregularities direction</b>	chordwise	uniform	uniform	spanwise
<b>φ 1.5mm holes quality</b>	most open	blocked	most open	excluded from design
<b>φ 0.4mm holes quality</b>	most open	blocked	blocked	excluded from design

#### 3.2. DIMENSIONS' ACCURACY

In order to check quality of printed models and quantify level of fidelity with respect to design, measurements of models dimensions have been taken. 3 dimensions have been checked: chord length, aerofoil thickness and model shell thickness (in CAD design respectively equal to 100mm, 18mm and 4mm). Serial measurement with

a standard calliper of accuracy  $0,01\text{mm}$  has been taken. Average results of measurements with uncertainty and relative difference (with respect to design) are presented in Table 4. As it can be seen most of dimensions are well represented with deviation from original design no larger than 1%. An exceptionally worse result has been noted for Alumide printout regarding the shell thickness. It can be noticed as well that for FDM printout (even visually mostly inaccurate) the highest measurement uncertainty has been obtained. This is mostly caused by large irregularities of the surface influencing significantly serial measurement. The lowest deviation of results with respect to CAD design was achieved by means of SLS technique (black nylon printout).

Tab. 4. 3D printouts dimensions' accuracy.

	chord c			thickness t			shell thickness s		
	$c_i$ [mm]	$U_c(c_i)$ [mm]	$\Delta c_i$ [%]	$t_i$ [mm]	$U_c(t_i)$ [mm]	$\Delta t_i$ [%]	$s_i$ [mm]	$U_c(s_i)$ [mm]	$\Delta s_i$ [%]
<b>MJM</b>	99,59	0,03	-0,41%	18,12	0,04	0,67%	4,04	0,01	0,99%
<b>SLS</b>	99,52	0,03	-0,48%	18,01	0,02	0,06%	4,01	0,02	0,25%
<b>SLS (Alumide)</b>	99,78	0,02	-0,22%	17,86	0,02	-0,78%	3,86	0,02	-3,47%
<b>FDM</b>	100,0	0,1	0,00%	17,46	0,05	-3,00%	4,03	0,06	0,74%

### 3.1. SURFACE ROUGHNESS

During the evaluation procedure surface roughness of models has been also measured. Measurements were taken by means of Hommel T500 portable roughness tester. Each measurement was realised by taking approx. 300 samples at distance  $l_i=4,8\text{mm}$  and averaged in order to calculate Ra roughness value. Results are presented in Table 5. Due to manufacturing process (adding material layer by layer) various roughness value have been obtained depending on measurement direction. Two cases – chordwise and spanwise – have been investigated. Measurement was not possible in case of FDM printout for chordwise direction due to too excessive irregularities of the surface.

As it can be seen the smallest roughness was obtained for models printed in MJM technology. Ultra high definition MJM technique gives results comparable to roughness of aluminium aerofoil manufactured by means of electrical discharge machining. In case of MJM UHD technology direction-dependent nature of roughness is visible (spanwise roughness over 3 times smaller than chordwise one). SLS printouts Ra roughness vary within a range of  $8,5\text{--}11\mu\text{m}$  which corresponds to surface quality achievable by rough subtractive machining. FDM printout is characterised by very high roughness value which is obvious due to manufacturing process nature

(printing with a melted plastic wire of diameter in the range of 0,1–0,5mm).

Tab. 5. 3D printouts surface roughness

	Ra	
	chordwise	spanwise
MJM UHD	2,1	0,60
MJM HD	2,4	3,3
SLS	8,5	11
SLS (Alumide)	9,6	8,5
FDM	n/d	23
Aluminium*	0,84	1,5

#### 4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Summarising presented study following observation and conclusions can be drawn:

- Roughness and dimension accuracy have been measured showing the level of quality of particular 3D printing technologies.
- As it was shown roughness of printed models depends on the direction due to nature of additive manufacturing (layer by layer model formation).
- A satisfactory level of dimension tolerance was achieved in case of all 3D printing technologies.
- A wide range of materials and technologies with various features and parameters are available.
- Thin-walled and tough models have been successfully manufactured.
- Certain 3D printed models are suitable for only limited temperature range. Otherwise they can soften, deflect, deform, etc.

#### LITERATURE

- [1] DANESHMAND S., AGHANAJAFI C., AHMADI N. A., *The effect of chromium coating in RP technology for aerofoil manufacturing*. Sadhan a Vol. 35 Part 5 (Indian Academy of Sciences), 2010, 569–84.
- [2] AGHANAJAFI C., DANESHMAND S., *Integration of three-dimensional printing technology for wind-tunnel model fabrication*. Journal of Aircraft Vol. 47 No. 6, 2010, 30-35.
- [3] XIANGHUA L et al., *Rapid prototyping of aerodynamics research models*, Advanced Materials and Process Technology, 2012, 2016-25.
- [4] *Alumide® material data sheet* (EOS GmbH – Electro Optical Systems [https://www.shapeways.com/rrstatic/material\\_docs/mds-alumide.pdf](https://www.shapeways.com/rrstatic/material_docs/mds-alumide.pdf)), 2008.
- [5] *PA2200 material data sheet* (EOS GmbH – Electro Optical Systems [https://www.shapeways.com/rrstatic/material\\_docs/mds-strongflex.pdf](https://www.shapeways.com/rrstatic/material_docs/mds-strongflex.pdf)), 2008.
- [6] *FDM material data sheet* (Materialise [http://manufacturing.materialise.com/sites/default/files/public/AMS/Updated%20datasheets/ams\\_datasheets\\_fdm.pdf](http://manufacturing.materialise.com/sites/default/files/public/AMS/Updated%20datasheets/ams_datasheets_fdm.pdf)).

# METODA POMIARU DOKŁADNOŚCI KINEMATYCZNEJ PRZEKŁADNI ŚLIMAKOWYCH

Dariusz OSTROWSKI<sup>1</sup>, Tadeusz MARCINIAK<sup>1</sup>

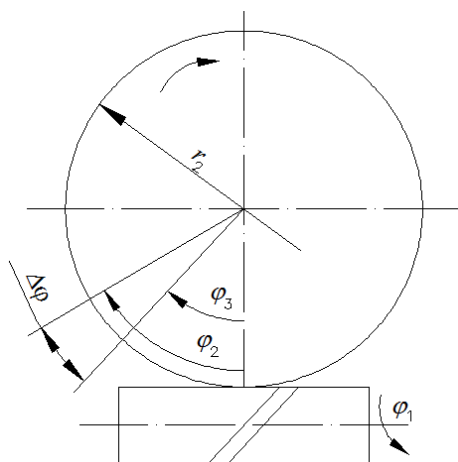
## 1. WSTĘP

Dokładność przeniesienia ruchu obrotowego w precyzyjnych przekładaniach ślimakowych zwanych kinematycznymi rozumiana jest jako różnica pomiędzy kątem obrotu wału biernego ślimacznicy, a kątem obrotu wału napędzającego ślimaka. W przekładniach tych szczególną uwagę zwraca się na uzyskanie zgodności ruchu rzeczywistego z ruchem założonym [1, 2, 3]. Pod pojęciem dokładności kinematycznej przekładni ślimakowej a w szczególności pod pojęciem odchyłki kinematycznej należy rozumieć poprawność wzajemnego powiązania ruchu wału czynnego ślimaka i wału biernego ślimacznicy. Wszelkie błędy tego ruchu wynikają z błędów wykonania i montażu elementów uzębionych i pozostałych elementów przekładni. Polska Norma [PN-80/M-88522.04] definiuje szereg odchyłek wykonania elementów wchodzących w skład przekładni ślimakowej. W normie tej dokładność kinematyczną określa się na podstawie odchylenia kinematycznego przekładni ślimakowej.

Odchylenie kinematyczne jest to różnica zaobserwowanego i nominalnego kąta obrotu ślimacznicy przy jednostronnym zazębieniu ze ślimakiem w zmontowanej przekładni, wyrażona długością łuku okręgu podziałowego i jest określone na pełnym obrocie koła ślimakowego. Największa różnica algebraiczna odchyłek kinematycznych przekładni  $F_{ior}^*$  występująca przy pełnym cyklu zmiany względnego położenia ślimacznicy i ślimaka nosi nazwę odchyłki kinematycznej i jest przedstawiona na rysunku 1.

---

<sup>1</sup> Politechnika Łódzka Instytut Obrabiarek i TBM, ul. Stefanowskiego 1/15 Łódź 90-924



$\varphi_1$  – zadany kąt obrotu ślimaka,

$\varphi_2$  – zaobserwowany kąt obrotu ślimacznicy,

$\varphi_3$  – nominalny kąt obrotu ślimacznicy,

$$\varphi_3 = \varphi_1 \cdot \frac{z_1}{z_2} \quad (1)$$

$z_1$  – liczba zwojów ślimaka,

$z_2$  – liczba zębów ślimacznicy,

$\Delta\varphi$  – odchylenie kinematyczne przekładni ślimakowej [°],

$$\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_3) \quad (2)$$

Rys. 1. Odchylenie kinematyczne przekładni ślimakowej

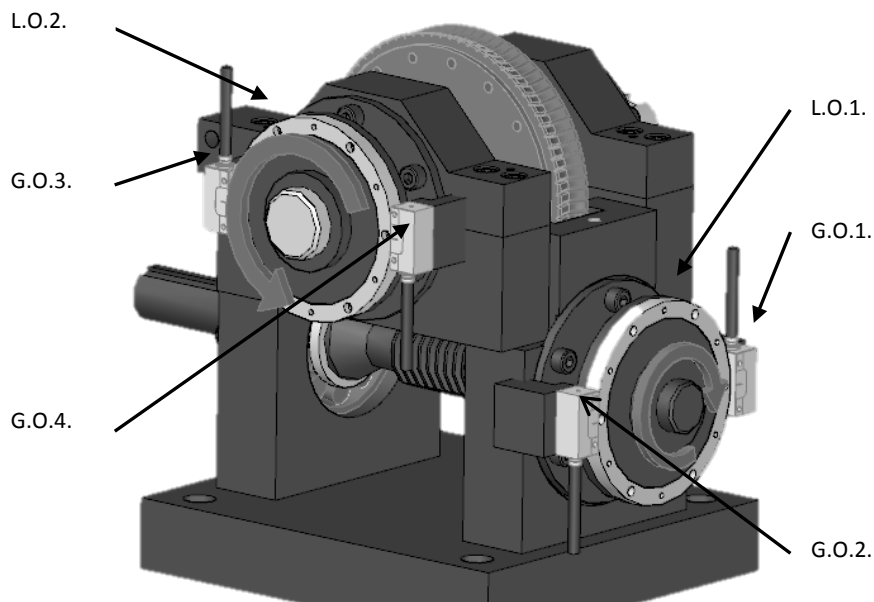
Na dokładność kinematyczną przekładni ma wpływ wiele zjawisk, które generowane są w procesie wytwarzania. Proces ten w zasadzie nie uległ zmianie od wielu lat, zmieniły się jedynie możliwości wytwórcze wynikające z powszechnego stosowania obrabiarek sterowanych numerycznie oraz zmieniły się możliwości kontroli poszczególnych podzespołów przekładni ślimakowej [4].

Jedną z możliwości uwzględniającą wszystkie błędy wykonania, jest metoda porównania kąta obrotu ślimaka i ślimacznicy w pełnym zakresie zmian względnego położenia elementów uzębionych przekładni. Sposób ten polega na pomiarze zadanego kąta obrotu wału ślimaka i zaobserwowanego kąta obrotu ślimacznicy. Pomiaru dokonuje się na zmontowanej przekładni. Na wale czynnym i biernym umieszcza się elektroniczne przetworniki położenia kąowego. Wartość rzeczywistego położenia wałów przekazywana jest do układu pomiarowego - licznika i dalej do komputera. Zadając wartość kroku pomiarowego wyznaczamy odchyłki okresowe, jak i odchyłki na zadanym kącie obrotu ślimaka jak również odchyłkę kinematyczną występującą przy pełnym cyklu zmiany względnego położenia ślimaka i ślimacznicy.

## 2. SYSTEM POMIAROWY

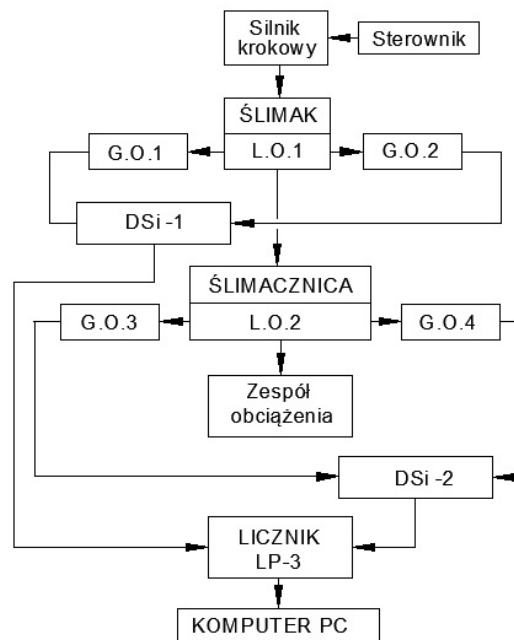
Pomiar odchyłki kinematycznej  $F'_{ior}$  przekładni ślimakowej odbywa się na przygotowanym stanowisku pomiarowym wyposażonym w obrotowe przetworniki położenia. Przetworniki przemieszczenia kąowego składają się z liniału optycznego L.O.1. oraz dwóch głowic odczytowych G.O.1 i G.O.2 dla wału ślimaka, analogicznie na wale ślimacznicy umieszczono liniał optyczny L.O.2, oraz dwie głowice odczytowe G.O.3 i G.O.4. Sygnał z głowic odczytowych położenia kąowego wału ślimaka przekazywany jest do interfejsu DSi-1, sygnał z głowic odczytowych

położenia kąтового wału ślimacznicy przekazywany jest do interfejsu DSi-2. Sygnały z interfejsów DSi-1 i DSi-2 przekazywane są do czytnika trzyosiowego LP-3, czytnik wyposażony jest w interfejs transmisji szeregową RS-232C za pomocą, którego wartość rzeczywista położenia kąowego ślimaka i ślimacznicy przekazywana jest do komputera PC. Na komputerze zainstalowany jest program rejestrujący wartość rzeczywistego kąta obrotu ślimaka  $\varphi_1$  i zaobserwowanego kąta ślimacznicy  $\varphi_2$ . Zastosowany w układzie pomiarowym interfejs TONiC™ firmy Renishaw dokonuje podziału działki elementarnej liniału na 200 części stąd mamy interpolację sygnału z mnożnikiem x200 co daje 11,11 impulsów na 1" kątową. Głowica odczytowa TONiC™ ma układ dynamicznego przetwarzania sygnału, dzięki czemu następuje poprawa jakości i stabilności sygnału, co zapewnia ultra niski błąd cykliczny  $< \pm 30$  nm. Stanowisko badawcze przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Stanowisko do pomiaru odchyłki kinematycznej przekładni ślimakowej

Schemat blokowy zastosowanych układów pomiarowych, sterujących i napędowych przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat blokowy układu do pomiaru odchyłki kinematycznej

W tabeli 1 przedstawiono cechy systemu pomiarowego.

Tabela 1. Cechy systemu pomiarowego

Element systemu	Pierścień przetwornika położenia kąтового [L.O.1], [L.O.2]	Głowica odczytowa [G.O.1], [G.O.2]	Interfejs	Interfejs [DSi-1], [DSi-2]	Licznik [LP3]
Typ	RESM20USA115 Średnica $\varnothing$ 115mm	TONIC READHEAD 5M RESM T2011-50A	TONIC INTERFACE x200 (4MHz) TI0200A04A	DSI Signum interface DSI-QTL4	f-my LABSTE R
Cechy	Średnica pierścienia $\varnothing$ 115mm. Działka elementarna 20 $\mu$ m. Na obwodzie pierścienia znajduje się 18000 działek elementarnych	Dzieli działkę elementarną pierścienia na 200 części. 20 $\mu$ m: 200=0,1 $\mu$ m  Cykliczny błąd $\leq \pm$ 30 nm,		Sumuje sygnały z głowic odczytowych G.O.1 i G.O.2 ; G.O.3. i G.O.4	Wyświetlacz 3 osiowy
Rozdzielczość systemu	18000x200x4= <b>14400000</b> impulsów na jeden pełen obrót ślimacznicy 14400000:(360° 60'·60")=11,11 impulsów na 1" kątową				
Wg f-my Renishaw system zapewniał pomiar z dokładnością +/- 1,74"					



### 3. METODYKA POMIARÓW

Przekładnia ślimakowa wykorzystywana w precyzyjnych mechanizmach podziału charakteryzuje się stałym przełożeniem w zakresie pełnego cyklu zmiany względnego położenia wału ślimaka i ślimacznicy [1]. Stałość przełożenia ma zapewnić brak przyspieszeń członów przekładni, a przyspieszenia elementów przekładni związane są z odchyłkami wykonania elementów uzębionych przekładni.

Zakładamy:  $\varphi_1$  – zadany kąt obrotu ślimaka,  $\varphi_2$  – zaobserwowany kąt obrotu ślimacznicy,  $i$  – przełożenie przekładni,  $\Delta\varphi$  – odchylenie kinematyczne przekładni ślimakowej. Dla mechanizmu reprezentującego przekładnię ślimakową prawdziwe będzie równanie [4].

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_1}{i} - \varphi_2 \quad (3)$$

Dla mechanizmu idealnego równanie przybierze postać:

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_1}{i} \quad (4)$$

Dokładność kinematyczną przekładni ślimakowej można określić na podstawie porównania wartości rzeczywistego kąta obrotu  $\varphi_2$  elementu napędzanego, to jest ślimacznicy, z wartością rzeczywistego kąta obrotu  $\varphi_1$  elementu napędzającego ślimaka przy spełnieniu warunku, że zachowana jest nominalna wzajemna odległość osi i występuje jednostronny styk w zazębieniu.

### 4. POMIARY EKSPERYMENTALNE

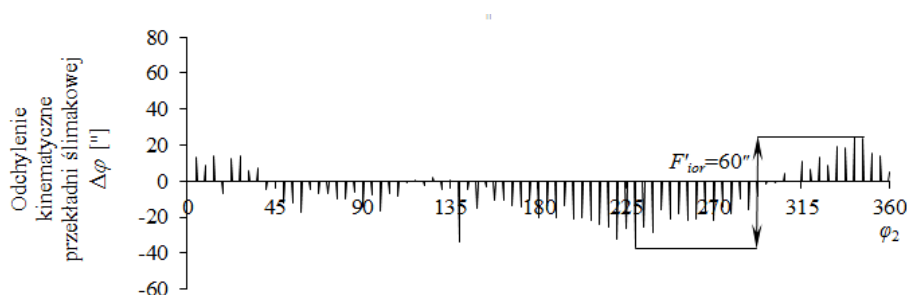
Podczas badań eksperymentalnych zadawano obroty na wał ślimaka. Za pomocą systemu pomiarowego rejestrowano wartość rzeczywistą kąta obrotu wału ślimaka  $\varphi_1$  i ślimacznicy  $\varphi_2$ . Podczas testowania układu przyjęto trzy kroki pomiarowe dla wału ślimaka. Jeden o wartości  $L_1=360^0$ , drugi  $L_1=30^0$ , trzeci  $L_1=1^0$ . Krok pomiarowy to odległość kątowa pomiędzy kolejnymi pomiarami. Na jej podstawie układ pomiarowy rejestruje wartość położenia kąтового ślimaka i opowiadające mu położenie kątowe ślimacznicy.

W tabeli 2 przedstawiono ilości pomiarów przypadających na pełen cykl zmiany wzajemnego położenia ślimaka i ślimacznicy dla kroku pomiarowego  $L_1=360^0$ ,  $L_1=30^0$ ,  $L_1=1^0$ , dla przekładni A80 o przełożeniu  $i=80$ .

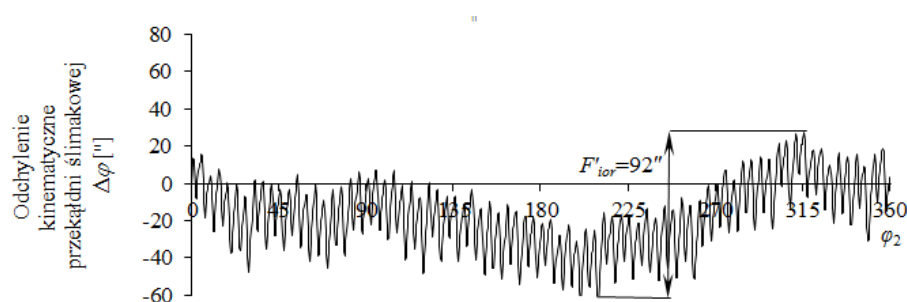
Tabela 2. Liczba pomiarów przypadających na pełen cykl zmiany wzajemnego położenia ślimaka i ślimacznicy dla kroku pomiarowego  $L_1=360^0$ ,  $L_1=30^0$ ,  $L_1=1^0$

Krok pomiarowy na wale ślimaka [ $L_1$ ]	Liczba pomiarów rzeczywistego kąta obrotu ślimaka przypadająca na jeden pełny obrót ślimaka $\varphi_1=360^0$ [ $K$ ]	Liczba pomiarów rzeczywistego kąta obrotu ślimacznicy przypadająca na jeden pełny obrót ślimacznicy [ $L_2$ ]
	$K = \varphi_1 / L_1$	$L_2 = K \cdot i$
$360^0$	1	80
$30^0$	12	960
$1^0$	360	28800

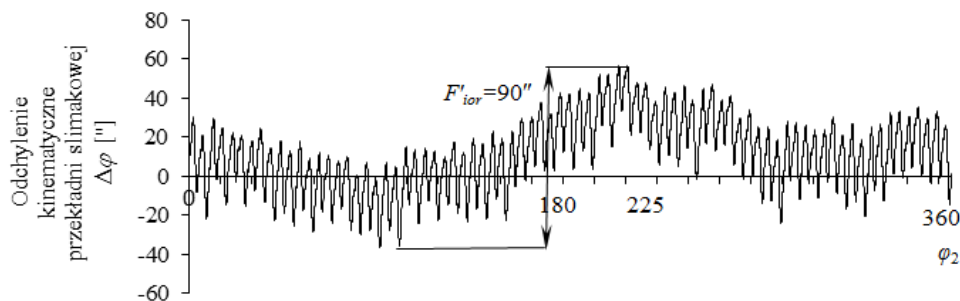
Jak wynika z tabeli 2 dla kroku pomiarowego  $L_1=30^0$  system pomiarowy rejestruje kąt obrotu  $\varphi_1$  ślimaka co  $30^0$ . W zakresie pełnego obrotu ślimaka  $0^0-360^0$ , układ dokona 12 pomiarów. Dla przekładni A80 ślimak wykona 80 obrotów, co odpowiada jednemu pełnemu obrotowi ślimacznicy. Z tego wynika  $12 \times 80 = 960$  punktów pomiarowych dla pełnego cyklu zmiany względnego położenia wału ślimaka i ślimacznicy. Na rysunkach 4–6 przedstawiono przykładowy wynik pomiaru odchylenia kinematycznego w funkcji kąta obrotu ślimacznicy  $\varphi_2$ , dla kroku pomiarowego  $L_1=360^0$ ,  $L_1=30^0$ ,  $L_1=1^0$  dla przekładni A80.



Rys. 4. Wyniki pomiarów odchylenia kinematycznego  $\Delta\varphi$  dla kroku pomiarowego  $L_1=360^0$



Rys. 5. Wyniki pomiarów odchylenia kinematycznego  $\Delta\varphi$  dla kroku pomiarowego  $L_1=30^0$



Rys. 6. Wyniki pomiarów odchylenia kinematycznego  $\Delta\varphi$  dla kroku pomiarowego  $L_1=1^0$

Po wielokrotnych próbach okazało się, że zmiana wartości kroku pomiarowego  $L_1$  ma wpływ na uzyskane wyniki odchyłki kinematycznej. Graniczną wartością w tym przypadku okazał się krok  $L_1=30^0$ . Pomiary dokonywane przy wartościach mniejszych niż  $L_1=30^0$  nie zmieniały znacząco wartości odchyłki kinematycznej. Wyniki te przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wartość odchyłki kinematycznej przekładni A80 dla różnych kroków  $L_1$

Krok $[L_1]$	Zakres pomiarowy	Ilość punktów pomiarowych $[L_2]$	Wartość odchyłki kinematycznej przekładni $F'_{ior}$
$360^0$	$0^0-360^0$	80	$60''$
$30^0$	$0^0-360^0$	960	$92''$
$1^0$	$0^0-360^0$	28800	$90''$

Następnie powtórzono pomiar odchyłki kinematycznej przekładni A80 w zakresie jednego pełnego cyklu zmiany względnego położenia ślimaka i ślimacznicy, oraz dwóch pełnych cykli zmiany względnego położenia dla kroku pomiarowego  $L_1=30^0$ . Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Pomiar odchyłki kinematycznej przekładni A80 dla kroku pomiarowego  $L_1=30^0$

Pomiar nr	Zakres pomiarowy	Ilość punktów pomiarowych $[L_2]$	Wartość odchyłki kinematycznej przekładni $F'_{ior}$
1	$0^0-360^0$	960	$92''$
2	$0^0-720^0$	1920	$91''$
3	$360^0-720^0$	960	$90''$

W oparciu o wyniki z tabeli 4 zdecydowano, że dla przekładni A80 należy prowadzić pomiary odchylenia kinematycznego z krokiem pomiarowym  $L_1=30^0$ .

## 5. PODSUMOWANIE

W referacie omówiono pomiar dokładności kinematycznej przekładni ślimakowych, z uwzględnieniem budowy i zasady działania stanowiska do pomiarów odchyłki kinematycznej przekładni. Przedstawiono metodę pomiaru dokładności kinematycznej przekładni, polegającą na bezpośrednim porównaniu kąta obrotu ślimaka i ślimacznicy w pełnym zakresie zmian względnego położenia elementów uzębionych. Zdefiniowano pojęcia: odchylenia kinematycznego i odchyłki kinematycznej przekładni ślimakowej. W pracy przedstawiono także przykładowe wyniki błędów kinematycznych przekładni A80 w zależności od przyjętego kroku pomiarowego. Efektem badań było określenie minimalnego kroku pomiarowego przypadającego na pełen obrót ślimaka  $L_1=30^0$ , większa rozdzielczość nie powodowała znaczących zmian wyniku pomiaru.

## LITERATURA

- [1] MARCINIAK T., *Technologia przekładni ślimakowych*. Naukowy Instytut Technologii Eksploatacji Radom, 2013.
- [2] MARCINIAK T., *Przekładnie ślimakowe walcowe*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 2001.
- [3] MARCINIAK T., OSTROWSKI D., *Zwiększenie dokładności kinematycznej ślimacznic metodą wiórkowania*. W: Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, vol. 28, nr 2, 2008, 19-28.
- [4] MARCINIAK T., OSTROWSKI D., *Badania dokładności kinematycznej ślimacznic w procesie wiórkowania*. W: Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, vol. 30, nr 2, 2010, 43-49.

# PROCEDURA POMIARU CHWILOWEJ PRĘDKOŚCI PŁYNU TERMOANEMOMETREM CTA W WARUNKACH SILNEJ ZMIENNOŚCI TEMPERATURY CZYNNIKA

Aleksander OLCZYK<sup>1</sup>, Tomasz PAŁCZYŃSKI<sup>1</sup>

## 1. WSTĘP

W obszarze pomiarów prędkości w przepływach nieustalonych płynu, dominują dwie grupy metod:

- metody optyczne: Dopplerowska anemometria laserowa (LDA) oraz metody wizualizacyjne takie jak PIV (Particle Image Velocimetry) czy PTV (Particle Tracking Velocimetry),
- metody termooanemometryczne, wykorzystujące wymianę ciepła pomiędzy grzanym włóknem a omywającym go płynem.

W ostatnich latach nastąpił niezwykle dynamiczny rozwój metod optycznych, które pozwalają na wizualizację przepływów, łącznie ze skomplikowanymi strukturami 2D i 3D. Metody optyczne pozostają jednak bardzo drogimi metodami badawczymi, wymagającymi od ich użytkowników bardzo solidnego przygotowania merytorycznego i doświadczenia w interpretacji wyników. Poza tym, ich zastosowanie wymaga spełnienia kilku warunków (takich jak przezroczystość ścianek kanału w obszarze pomiarowym, możliwość wprowadzenia posiewu o odpowiednich parametrach itd.).

Te ograniczenia sprawiają, że termooanemometria ma nadal wiele do zaoferowania, szczególnie w obszarze metrologii przepływów. Jej zasadnicze zalety to miniaturyzacja czujników pomiarowych, pozwalająca traktować pomiar jako punktowy oraz doskonałe właściwości dynamiczne, pozwalające na zastosowanie tej metody w obszarze szybkozmiennych przepływów [4]. Metoda może być także stosowana do badań przepływów 3-D przy zastosowaniu specjalnych sond

---

<sup>1</sup> Instytut Maszyn Przepływowych, 90-924 Łódź, Wólczańska 219/223,  
[aleksander.olczyk@p.lodz.pl](mailto:aleksander.olczyk@p.lodz.pl), [tomasz.palczynski@p.lodz.pl](mailto:tomasz.palczynski@p.lodz.pl)

trójwłóknowych.

Zasada działania sondy termooanemometrycznej opiera się na pomiarze ilości ciepła odbieranego od grzanego elementu pomiarowego (najczęściej to włókno o średnicy kilku  $\mu\text{m}$ ) przez płynący czynnik. Wzrost prędkości przepływu intensyfikuje wymianę ciepła na powierzchni włókna, co zwiększa ilość odbieranego ciepła.

Równanie bilansu ciepła generowanego przez przepływ prądu przez włókno oraz odbieranego przez przepływ czynnika można zapisać w postaci [3]:

$$\frac{U^2}{R(T_w)} = \alpha S_w (T_w - T_g) \quad (1)$$

gdzie:

$U$  - napięcie na zaciskach włókna;

$R(T_w)$  - rezystancja włókna w temperaturze  $T_w$ ;

$\alpha$  - przejmowalność ciepła pomiędzy włóknom sondy a płynem;

$S_w$  - pole powierzchni wymiany ciepła (pole powierzchni włókna);

$T_w$  - temperatura włókna sondy;

$T_g$  - temperatura gazu.

Równanie to można przekształcić do postaci [5]:

$$U^2 = (A + B \varphi_m^N) (T_w - T_g) \quad (2)$$

gdzie:

$\varphi_m = \rho u = \frac{\dot{m}}{S}$  - tzw. prędkość masowa lub gęstość strumienia masy

Stałe  $A$  i  $B$  zależą od parametrów geometrycznych włókna oraz parametrów przepływu i mają postać:

$$A = a R(T_w) \frac{\lambda_g S_w}{l} \quad \text{oraz} \quad B = b R(T_w) \frac{\lambda_g S_w}{l} \left( \frac{d}{\mu} \right)^N ;$$

gdzie:

$\lambda_g$  - przewodność cieplna gazu

$l$  - wymiar charakterystyczny (długość włókna);

$d$  - wymiar charakterystyczny (średnica włókna)

$\mu$  - lepkość dynamiczna gazu

Wyrażenia na stałe  $A$  i  $B$  zawierają dodatkowo współczynniki  $a, b, N$ , które wynikają z przyjętego modelu wymiany ciepła, wiążącego ze sobą liczby kryterialne Nusselta  $Nu$  i Reynoldsa  $Re_d$ . Dla włókien termooanemometrycznych stosuje się zwykle równanie Kramersa:

$$Nu = a + b Re_d^N \quad (3)$$

z wartościami współczynników:  $a = 0,039$ ,  $b = 0,51$ ,  $N = 0,5$

Równanie Kramersa opisuje wyidealizowany przypadek walca o małej średnicy, z wymianą ciepła wyłącznie w postaci konwekcji wymuszonej. W przypadku rzeczywistego włókna mamy dodatkowo do czynienia z konwekcją naturalną oraz odprowadzaniem ciepła do wsporników włókna na drodze przewodzenia.

Dlatego współczynniki  $a, b, N$  (a w konsekwencji  $A, B, N$ ) wyznacza się doświadczalnie w trakcie wzorcowania statycznego sondy termooanemometrycznej.

W równaniu (2) występują w formie jawnej dwie temperatury: włókna  $T_w$  oraz gazu  $T_g$ . Dodatkowo stałe  $A$  i  $B$  są także wrażliwe na zmianę temperatury włókna, wpływającą na wartość jego rezystancji. Aby uniezależnić się od zmian temperatury włókna, zwykle stosuje się układy typu CTA (Constant Temperature Anemometr), w których dokonuje się stabilizacji temperatury włókna na drodze elektronicznej, co rozwiązuje problem jego wpływu na wartość sygnału wyjściowego z sondy. Problemem pozostaje natomiast zmienność temperatury ośrodka  $T_g$ . Jest ona niejako integralnie związana z obszarem zastosowań sondy termooanemometrycznej, która jest przyrządem dedykowanym do pomiarów przepływów nieustalonych, w których zmienności podlegają wszystkie parametry termodynamiczno-przepływowe (ciśnienie, temperatura, prędkość). Istnieją metody ograniczania wpływu zmian temperatury czynnika na sygnał wyjściowy termooanometru poprzez zastosowanie elektronicznych układów kompensacji lub korekcji temperaturowej [2]. W niniejszym artykule zaproponowano procedurę polegającą na bezpośrednim wykorzystaniu danych z dwuwymiarowego wzorcowania, która może być stosowana w warunkach silnej zmienności temperatur w badanym przepływie.

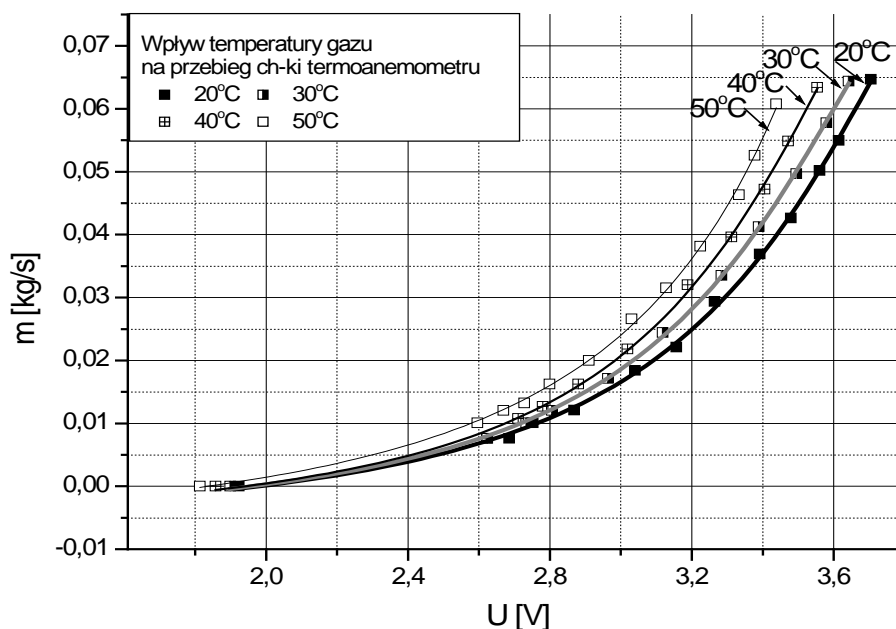
## 2. WZORCOWANIE SONDY TERMOANEMOMETRYCZNEJ

Na rys. 1 przedstawiono charakterystykę statyczną sondy termooanemometrycznej wykonaną dla różnych wartości temperatur czynnika [5].

Zgodnie z równaniem (2), wzrost temperatury czynnika  $T_g$  przy stałym strumieniu masy, skutkuje zmniejszeniem sygnału wyjściowego sondy. Wpływ temperatury rośnie ze wzrostem strumienia masy (krzywe dla poszczególnych temperatur robią się coraz bardziej rozbieżne). Zjawisko to jest bardzo niekorzystne szczególnie w przypadku przepływów pulsacyjnych o dużych amplitudach. Zmiany wartości temperatury i strumienia masy zachodzą wówczas w szerokich granicach, co powoduje trudności w korzystaniu z charakterystyki statycznej.

Z uwagi na pracochłonność procedury wzorcowania, wykonuje się ją zazwyczaj dla jednej temperatury czynnika, odpowiadającej w przybliżeniu składowej stałej przebiegu rejestrowanego podczas pomiarów. W przypadku przebiegów o małych amplitudach takie podejście jest akceptowalne. Świadomie godzimy się wówczas na pogorszenie dokładności pomiarów w zamian za uproszczenie procedury

wzorcowania. Jednak w przypadku przepływów charakteryzujących się silnymi zmianami temperatury, jej wpływ należy uwzględnić.



Rys. 1. Wpływ temperatury czynnika na charakterystykę statyczną sondy termooanemometrycznej [3].

Wzorcowanie polega na przyporządkowaniu sygnałowi wyjściowemu z sondy  $U$ , znanej (zmierzonej przyrządem wzorcowym) wartości prędkości lub strumienia masy. Jedną z możliwych konfiguracji stanowiska do wzorcowania sond termooanemometrycznych przedstawiono w [4].

Wzorcowanie jest prowadzone w warunkach ustalonych: zadawane wartości prędkości (strumienia masy) oraz temperatury są stałe dla danego punktu charakterystyki. W efekcie jeden punkt charakterystyki opisany jest trzema współrzędnymi:  $\dot{m}, U, T_g$  lub (przy wykorzystaniu prędkości masowej)  $\varphi_m, U, T_g$ .

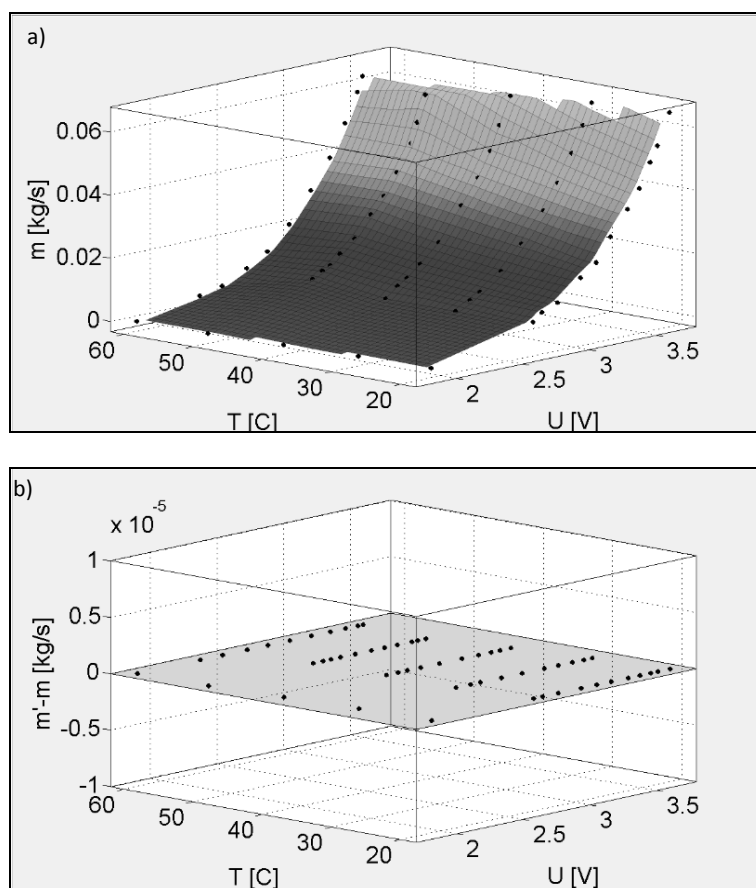
Poprawne odwzorowanie charakterystyki statycznej powinno więc mieć formę powierzchni określonej w układzie trójwymiarowym.

### 3. TRÓJWYMIAROWA CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA SONDY TERMOANEMOMETRYCZNEJ

W wyniku wzorcowania, otrzymano trójwymiarowy zbiór punktów przedstawiający strumień masy  $\dot{m}$  jako funkcję temperatury gazu  $T_g$  i napięcia  $U$  – sygnału wyjściowego z sondy. Wyniki te przedstawiono na rysunku 2a, gdzie



dotatkowo naniesiono powierzchnię uzyskaną w procesie interpolacji liniowej w środowisku Matlab.



Rys. 2. Interpolacja liniowa wyników procesu wzorcowania sondy termooanemometrycznej (a), residua powierzchni aproksymującej (b).

Warto pamiętać, że uzyskana w procesie interpolacji powierzchnia nie może być przedstawiona w postaci jawnej, tj. równania powierzchni aproksymującej. Rysunek 2b przedstawia tzw. residua, dla powierzchni wynikającej z interpolacji liniowej, zdefiniowane jako  $r = \hat{m}' - \hat{m}$ . Residua reprezentują różnicę pomiędzy wartością wielkości aproksymowanej i jej aproksymacją i dla przypadku przedstawionego na rysunku nr 2a residua przyjmują zerową wartość.

W tabeli 1 zawarto porównanie trzech postaci równania powierzchni aproksymującej analizowany zbiór wyników procesu wzorcowania sondy termooanemometrycznej przedstawiony na rysunku 1. Aproksymację powierzchnią

o dwóch stopniach swobody dla zmiennej  $U$  i jednym stopniu swobody dla zmiennej  $T$  otrzymano jako polioptymalizację o równaniu (4):

$$\hat{m}(U, T) = p_{00} + p_{10} \cdot U + p_{01} \cdot T + p_{20} \cdot U^2 + p_{11} \cdot U \cdot T, \quad (4)$$

zwaną dalej PO\_21. Stopnień swobody należy w tym przypadku rozumieć jako dopuszczalny najwyższy wykładnik potęgi danej zmiennej w równaniu aproksymującym. W analogiczny sposób zdefiniowano równania powierzchni przy polioptymalizacji dla trzech stopni swobody dla zmiennej  $U$  i jednego dla zmiennej  $T$  zdefiniowaną jako PO\_31 a także dla pięciu stopni swobody dla zmiennej  $U$  i czterech dla zmiennej  $T$  zdefiniowaną jako PO\_54.

W porównaniu wyników z tabeli 1 przedstawiono następujące wskaźniki obrazujące jakość aproksymacji [1]:

– SSE – Sum of Squares Due to Error – suma kwadratów różnic tzw. suma kwadratów residuów lub też resztkowa suma kwadratów odchyłeń definiowana jako  $SSE = \sum_{i=1}^n (\hat{m}' - \hat{m})^2$ , gdzie wartości bliższe zeru wskazują na lepszą aproksymację;

– SSR- Sum of Squares of Regression- regresyjna suma kwadratów odchyłeń, definiowana jako  $SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{m} - \hat{m}')^2$ , czyli różnica pomiędzy wartością

aproksymowaną  $\hat{m}'$  i wartością średnią  $\hat{m}$ , definiowaną jako wartość odniesienia stanowiącą wartość średnią ze wszystkich wyników pomiarów dla danej wielkości (wielkość statystyczna nie posiadająca interpretacji fizycznej dla analizowanego przypadku);

– SST – Total Sum of Squares – całkowita suma kwadratów odchyłeń definiowana jako  $SST = \sum_{i=1}^n (\hat{m} - \hat{m})^2$  lub  $SST = SSR + SSE$ .

–  $R^2$ =R-square - współczynnik determinacji definiowany jako  $R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$ .

– adjusted R-square – skorygowany współczynnik determinacji, definiowany jako  $adjusted\_R - square = adj\_R^2 = 1 - \frac{SSE(n-1)}{SST(v)}$  uwzględniający zależność:

$v = n - \hat{m}$ , gdzie:  $v$  - liczba stopni swobody residuów rozumiana jako liczba niezależnych wyników obserwacji lub liczba niezależnych zmiennych losowych,  $n$  - liczba parametrów estymowanych czyli liczba związków które łączą wyniki ze sobą. Estymatory, które stanowią granice przedziałów występowania zmiennych losowych uznaje się jako tzw. fixed – ustalone, które zwiększają liczbę stopni

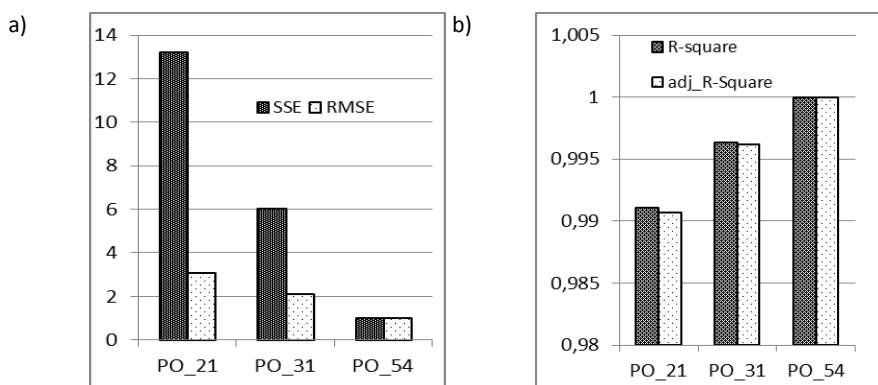
swobody analizowanego układu.

- RMSE – Root Mean Squared Error – błąd średniokwadratowy definiowany jako

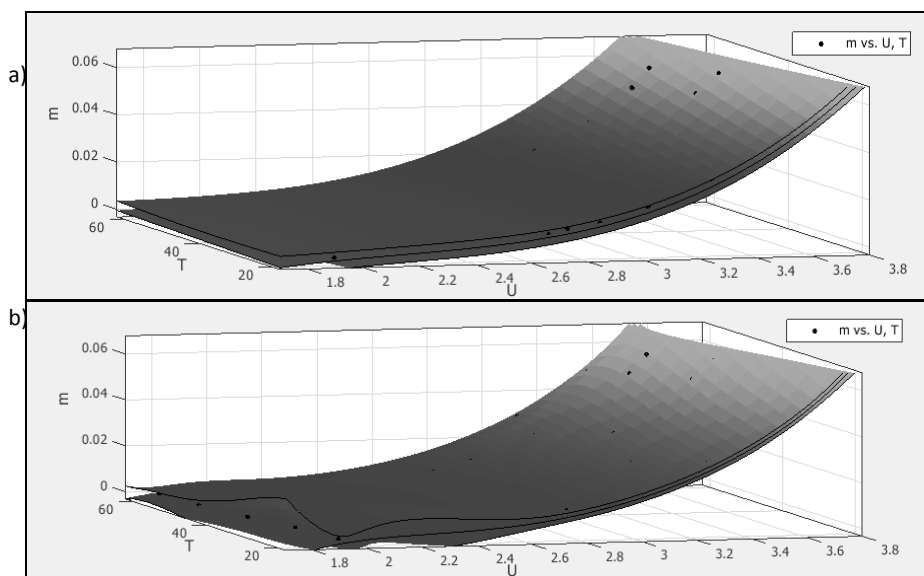
$$RMSE = s = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{SSE}{v}}.$$

Porównując ze sobą przebiegi powierzchni aproksymujących przedstawione w tabeli 1, wyraźnie widać iż wariant PO\_21 jest niedoskonały ze względu na tzw. siodło, co stanowi o tzw. niejednoznaczności charakterystyki statycznej, funkcja przyjmuje taką samą wartość dla dwóch różnych argumentów, wartości wielkości wejściowej przetwornika  $U$ .

Na rysunku 3a przedstawiono porównanie znormalizowanych, względem wartości minimalnej, parametrów SSE i RMSE dla trzech rozważanych wariantów aproksymacji. Wskaźnik SSE jest trzynastokrotnie (dla PO\_21) i sześciokrotnie (dla PO\_31) większy od przyjętego jako punkt odniesienia wariantu PO\_54. Wartości RMSE wynoszą odpowiednio: 3 – dla PO\_21, 2- dla PO\_31 i 1 dla wartości odniesienia czyli PO\_54. Suma kwadratów różnic – SSE dla wariantu PO\_31 może być uznana jako kompromis pomiędzy jakością dopasowania powierzchni aproksymującej w stosunku do stopnia skomplikowania równania tejże powierzchni. Otrzymana funkcja aproksymująca pozwala na określenie jej wartości w całej dziedzinie, przede wszystkim wartości pośrednich pomiędzy punktami pochodzącymi z wzorcowania. Zastosowanie w/w procedury umożliwia określenie wartości pośrednich w oparciu o interpolację będącą wynikiem polioptymalizacji z przyjętym poziomem SSE i odpowiadającym temu przedziałem niepewności dla przyjętego przedziału ufności. W przypadku braku takiej procedury stosuje się najczęściej interpolację liniową powodującą znaczne pogorszenie jakości estymacji analizowanej wielkości.



Rys. 3. Porównanie statystycznych parametrów powierzchni aproksymujących dla trzech wariantów polioptymalizacji trójwymiarowej charakterystyki statycznej sondy termooanemometru.



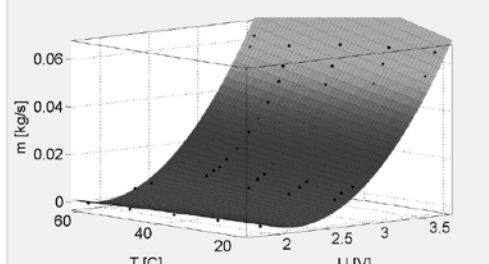
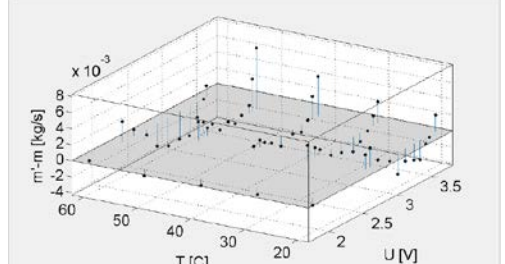
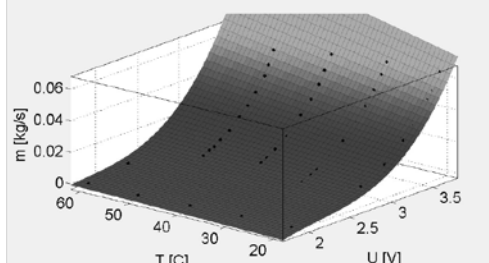
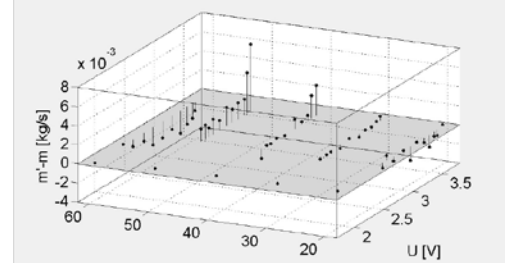
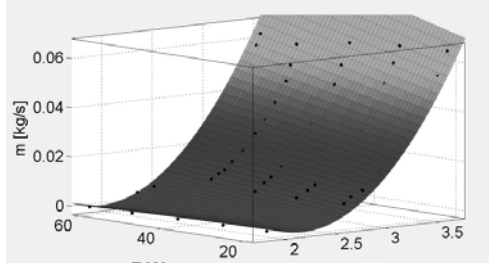
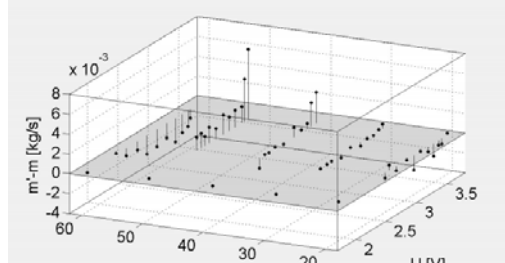
Rys. 4. Porównanie przedziałów niepewności estymowanej powierzchni powierzchni dla polioptymalizacji trójwymiarowej charakterystyki statycznej sondy termooanemometru linią PO\_31 (a) i PO\_54 (b) dla przyjętego przedziału ufności na poziomie 95%.

### 3. WNIOSKI

Z przeprowadzonej analizy procedury pomiaru chwilowej prędkości płynu termooanemometrem CTA w warunkach silnej zmienności temperatury czynnika wynika, że:

- a) Konieczne jest wzorcowanie przetworników termooanemometrycznych w dziedzinie temperatury, celem uwzględnienia jej wpływu na wyniki pomiarów, rysunek 1.
- b) Celowe jest zastąpienie, zbioru charakterystyk statycznych termooanemometru CIA powierzchnią aproksymującą umożliwiającą określenie wartości strumienia masy w funkcji wartości mierzonej  $U$  i temperatury gazu  $T_g$ , co znacznie upraszcza proces pomiarowy a tym samym proces wytwarzania z jego zastosowaniem.
- c) Celowe jest posługiwanie się wskaźnikiem SSE przy wyborze optymalnej postaci równania krzywej aproksymującej – linia PO\_31, towarzyszy temu znaczne zmniejszenie przedziałów niepewności estymowanej wartości (Wariant PO\_31 w porównaniu z wariantem PO\_54) wynikające z przyjętego przedziału ufności – w tym przypadku 95%, rysunek 3.

Tabela 1. Warianty polioptymalizacji trójwymiarowej charakterystyki statycznej sondy termooanemometrycznej

Trójwymiarowa charakterystyka statyczna sondy termooanemometrycznej	Residua powierzchni aproksymującej
<p>Polioptymalizacja 21 – zwana dalej <b>PO_21</b></p> $\dot{m}(U, T) = p_{00} + p_{10} \cdot U + p_{01} \cdot T + p_{20} \cdot U^2 + p_{11} \cdot U \cdot T$ <p>Goodness of fit: SSE: 0.0002209; R-square: 0.9904; Adjusted R-square: 0.9896; RMSE: 0.002061</p>	
	
<p>Polioptymalizacja 31 – zwana dalej <b>PO_31</b></p> $\dot{m}(U, T) = p_{00} + p_{10} \cdot U + p_{01} \cdot T + p_{20} \cdot U^2 + p_{11} \cdot U \cdot T + p_{30} \cdot U^3 + p_{21} \cdot U^2 \cdot T$ <p>Goodness of fit: SSE: 0.0001007; R-square: 0.9956; Adjusted R-square: 0.9951; RMSE: 0.001419</p>	
	
<p>Polioptymalizacja 54 zwana dalej <b>PO_54</b></p> $\begin{aligned} \dot{m}(U, T) = & p_{00} + p_{10} \cdot U + p_{01} \cdot T + p_{20} \cdot U^2 + p_{11} \cdot U \cdot T + p_{30} \cdot U^3 + p_{21} \cdot U^2 \cdot T + \\ & p_{12} \cdot U \cdot T^2 + p_{03} \cdot T^3 + p_{40} \cdot U^4 + p_{31} \cdot U^3 \cdot T + p_{22} \cdot U^2 \cdot T^2 + p_{13} \cdot U \cdot T^3 + p_{04} \cdot T^4 + \\ & p_{50} \cdot U^5 + p_{41} \cdot U^4 \cdot T + p_{32} \cdot U^3 \cdot T^2 + p_{23} \cdot U^2 \cdot T^3 + p_{14} \cdot U \cdot T^4 \end{aligned}$ <p>Goodness of fit: SSE: 1.672e-05; R-square: 0.9993; Adjusted R-square: 0.9989; RMSE: 0.0006722</p>	
	

#### LITERATURA

- [1] KORNACKI J., MILENICZUK J., Statystyka dla studentów kierunków technicznych I przyrodniczych, W: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2004-491.
- [2] LIĞĘZA P., Układy termooanemometryczne – struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe. AGH – Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne. Seria Rozprawy i Monografie, nr 98, Kraków, 2001.
- [3] OLCZYK A., HAMMOUD A., Problemy pomiaru chwilowego strumienia masy w przepływie niestacjonarnym za pomocą sondy termooanemometrycznej. Ciepłne Maszyny Przepływowe nr 686, Łódź, 1993, 187-209;
- [4] OLCZYK A. Investigation of the specific mass flow rate distribution in pipes supplied with a pulsating flow. W: Int. J. Heat Fluid Flow, 2009, vol.30, nr 4, 637-346.
- [5] OLCZYK A. Analiza niestacjonarnych zjawisk przepływowych w przewodach zasilanych pulsacyjnie. Politechnika Łódzka. Zeszyty Naukowe Nr 1003. Seria Rozprawy naukowe, Z. 360, Łódź, 2009.
- [6] PAŁCZYŃSKI T., A boundary conditions at modeling 1-D pulsating flows in pipes according to the method of characteristics. W: J. KONES, 2012, vol.19, nr 2, 395-402.

# **AUTOMATYCZNA KONTROLA POZYCJONOWANIA ROBOTA W ELASTYCZNYM GNIEZDZIE WYTWARZANIA Z ZASTOSOWANIEM TECHNIK WIZYJNYCH**

Marcin KIERSZTYN<sup>1</sup>, Piotr WOLSZCZAK<sup>2</sup>, Stanisław PŁASKA<sup>2</sup>

## **1. WSTĘP**

Roboty stosowane w elastycznych systemach produkcji jako środki transportu, a także jako maszyny prowadzące narzędzia lub przedmiot obrabiany podczas pracy, narażone są na błędy powtarzalności pozycjonowania. Błędy te mogą być powstawać w trakcie przełączania między programami pracy, a także w trakcie normalnej długotrwałej pracy (przegrzewanie i przeciążane napędów). Przyczynami powstawania błędów są również czynności przezbrajania chwytaka lub zmiany wyposażenia stanowiska, na przykład zastosowanie nowych typów pojemników do transportu półproduktów. W przypadku wykorzystywania pojemników z tworzyw lub skrzynek na opakowania szklane, pochodzących od różnych producentów, wymiary tych pojemników mogą różnić się istotnie. Błędy wykonania pojemników, niedokładność pozycjonowania, a zwłaszcza błędy powtarzalności pozycjonowania robota mogą prowadzić do kolizji. Proponowanym rozwiązaniem jest zastosowanie technik wizyjnych, które pozwalają na wykonaniu precyzyjnych pomiarów dokładności i powtarzalności pozycjonowania chwytaka robota przy niewielki nakładzie środków na wyposażenie stanowiska [1-5].

## **2. PRZEDMIOT BADAŃ**

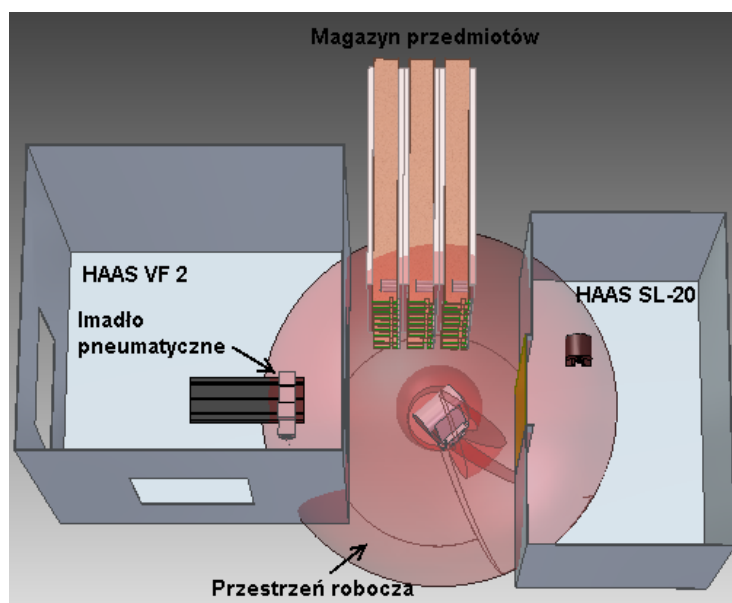
Przedmiotem badań był robot FS06L firmy Kawasaki umieszczony w zintegrowanym gnieździe elastycznego wytwarzania, wyposażonym w pionowe

---

<sup>1</sup> Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Zamościu, ul. Pereca 2, 22-400 Zamość

<sup>2</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatykacji, ul. Nadbystrzycka 36a, 20-618 Lublin, Poland

centrum obróbkowe VF-2 i centrum tokarskie SL 20 firmy Haas Automation oraz specjalizowany magazyn przedmiotów walcowych. Magazyn wyposażony jest w prowadnice zapewniające grawitacyjne transportowanie przedmiotów do miejsca odbioru przez ramię robota. Dodatkowo w obszarze roboczym pionowego centrum obróbkowego zamocowane jest imadło maszynowe pneumatyczne VMC-5P 130 firmy VERTEX. Celem badania była ocena powtarzalności pozycjonowania robota.



Rys. 1. Rzut perspektywiczny gniazdowej formy rozmieszczenia maszyn w przestrzeni roboczej robota Kawasaki FS06L

Na rys. 1 przedstawiono rozmieszczenie maszyn i magazynu przedmiotów w przestrzeni roboczej robota Kawasaki FS06L. Zastosowane gniazdowe rozmieszczenie maszyn spełnia wymagania dotyczące zasięgu pracy robota. Umieszczanie przedmiotu w pionowym centrum obróbkowym odbywać się będzie przez boczny otwór w osłonie obszaru roboczego obrabiarki. Dzięki temu rozwiązaniu uzyska się swobodny dostęp do obu obrabiarek.

Funkcjonowanie robota w zintegrowanym gnieździe elastycznego wytwarzania polega na przemieszczeniu ramienia pomiędzy zaprogramowanymi pozycjami. Najważniejszym parametrem zapewniającym prawidłowe funkcjonowanie gniazda jest dokładność dojazdu do zaprogramowanych pozycji. W tym celu wykonano badanie powtarzalności pozycjonowania robota [6].



### 3. METODYKA

Badanie powtarzalności pozycjonowania robota polegało na umieszczeniu igieł w ruchomym uchwycie chwytaka oraz w wybranym nieruchomym miejscu stanowiska. W sąsiedztwie igły nieruchomej przygotowano stanowisko do rejestracji obrazu. Następnie chwytak robota przemieszczano w różne, odległe pozycje w obszarze roboczym, po czym wracał on do punktu pomiarowego, gdzie wykonywane były zdjęcia obu igieł [7]. Na podstawie zdjęć wykonywane były pomiary położenia igieł ruchomej i nieruchomej.

Przebieg pomiaru obejmował następujące czynności:

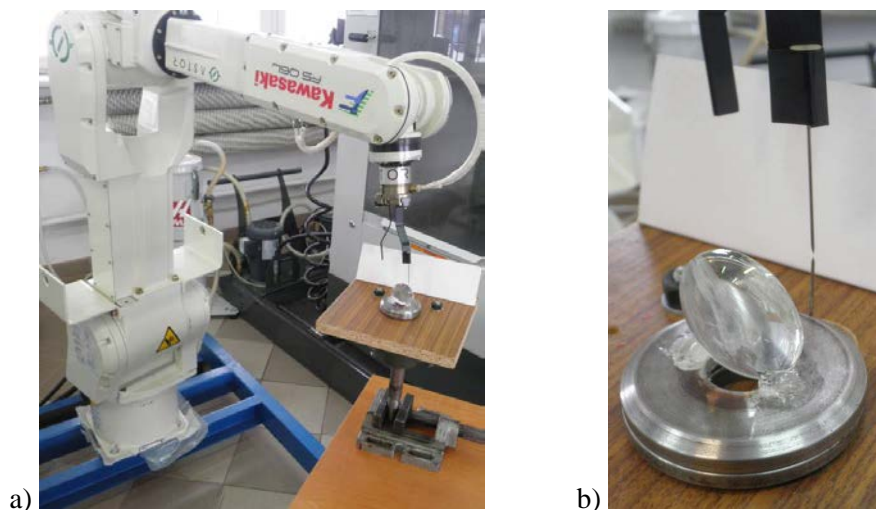
- umieszczenie igły w chwytaku,
- uruchomienie kontrolera D40F oraz robota Kawasaki,
- umieszczenie soczewki powiększającej na obrotowym stole przyrządu pomiarowego,
- umieszczenie przyrządu pomiarowego w przestrzeni roboczej robota,
- ustalenie punktu pomiaru w taki sposób, aby igła pomiarowa umieszczona w chwytaku robota znajdowała się nad igłą przyrządu pomiarowego w odległości ok. 0,5 - 1 mm,
- programowanie blokowe robota zgodnie z instrukcją użytkownika kontrolera D,
- wykonanie zaprogramowanych ruchów,
- wykonanie dwóch zdjęć w kierunkach prostopadłych do siebie, za pomocą aparatu cyfrowego używając funkcji samowyzwalacza,
- cykliczne odtwarzanie programu i wykonywanie zdjęć,
- pomiar zmiany pozycji igły na podstawie zdjęć, za pomocą algorytmu wizyjnego systemu pomiarowego przygotowanego w programie Adaptive Vision Studio 3.1 Lite,
- opracowanie wyników pomiaru.

Na rys. 2 przedstawiono przyrząd pomiarowy zbudowany z łożyskowanego stołu obrotowego, igły, ekranu oraz soczewki skupiającej. Igła umieszczona jest na stałe w osi obrotu stołu. Soczewka skupiająca umożliwia wykonanie ostrych zdjęć z bliskiej odległości za pomocą aparatu cyfrowego. Soczewka umieszczona była na stole obrotowym w stalowym pierścieniu. Biały ekran wyostrza krawędzie fotografowanych igieł. Na stole umieszczony był aparat cyfrowy. Błat stołu przymocowany był do oprawy łożyskowej. W blacie stołu wykonany był otwór na igłę pomiarową. Wysokość stołu była regulowana przez przemieszczanie oprawy łożyskowej na wałku, który zamocowano w imadle maszynowym. Obracanie stołem zapewnia wykonanie fotografii igieł pomiarowych w dwóch prostopadłych płaszczyznach bez zmiany odległości obiektywu oraz na jednakowej wysokości.

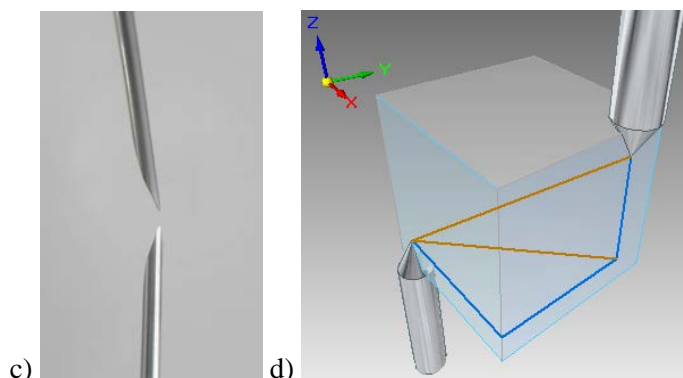


Rys. 2. Przyrząd pomiarowy

Jeden cykl pracy robota składał się z ruchów między trzema pozycjami robota. W jednej pozycji wykonywane były pomiary powtarzalności pozycjonowania (rys. 3a). Pozostałe pozycje znajdowały się w odległych punktach przestrzeni roboczej i wymagały wykonania ruchu we wszystkich osiach ruchomych robota. Wykonano 13 cykli pomiarowych. Podczas każdego cyklu wykonano dwa zdjęcia w dwóch płaszczyznach, prostopadłych względem siebie (rys. 3b).



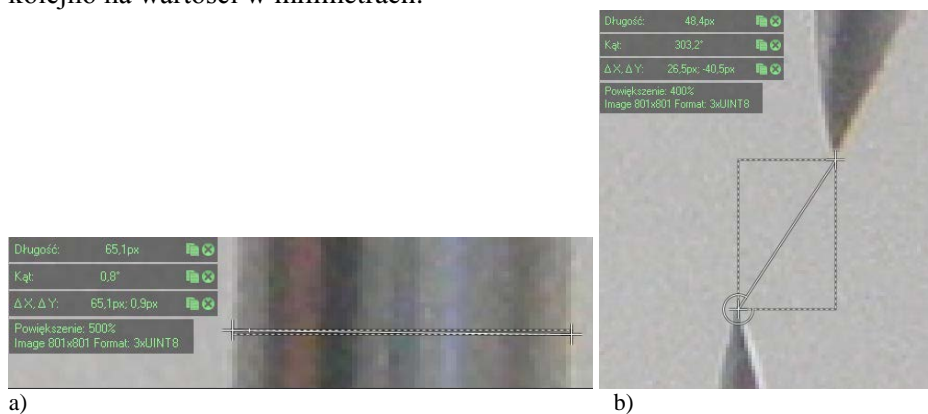
Rys. 3. Stanowisko pomiarowe: a) ogólny widok robota podczas badania powtarzalności pozycjonowania, b) widok soczewki podczas pomiaru w jednym rzucie odległości między igłami ruchomą (umieszczoną w chwytaku) i nieruchomą,



Rys. 4. Zasada pomiaru położenia kiści chwytaka: a) igły w pozycji pomiarowej w płaszczyźnie YZ, b) rzut perspektywiczny obrazujący zasadę pomiaru (model lokalizacji igieł podczas pomiaru i mierzonych odległości).

Na rys. 4a przedstawiono igły w pozycji przygotowanej do pomiarów odległości. Natomiast na rys. 4b przedstawiono rzut perspektywiczny przedstawiający mierzone odległości. Układ współrzędnych obrazuje oznaczenia odcinków przedstawionych w tab. 1 oraz płaszczyzny niezbędne do wykonania fotografii.

Na podstawie obrazu przedstawionego na płaszczyznach XZ oraz YZ wykonano pomiary geometryczne wykorzystując środowisko do tworzenia programów inspekcji wizyjnej Adaptive Vision Studio. Na rys. 1a przedstawiono przykładowy obraz igły podczas pomiaru szerokości, a na rys. 5b przykładowy przebieg pomiaru w płaszczyźnie XZ (6 cykl pomiarowy). Pomiar średnicy igły, która w rzeczywistości miała średnicę  $1\text{ mm}$ , wykorzystano do obliczenia wartości współczynnika skali i uzyskanego powiększenia. Uzyskane wyniki pomiarów w pikselach przeliczono kolejno na wartości w milimetrach.



Rys. 5. Przykład pomiarów geometrycznych a) pomiar średnicy igły (wzorzec długości), b) pomiarów odległości między ostrzami igieł w kierunkach X i Z (wyniki własne)

#### 4. WYNIKI POMIARÓW I ANALIZA

W tab. 1 przedstawiono wyniki pomiarów wraz z obliczonymi odległościami między końcami igieł pomiarowych. Odległość między końcami igieł wyznaczono z zależności (1). Odległości w pikselach zostały przeliczona na milimetry z zależności (2). Średnia wartość odległości igieł wynosi  $0,733 \text{ mm}$ .

$$L_{px} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (1)$$

gdzie:  $X, Y, Z$  - odległości poszczególnych odcinków w pikselach.

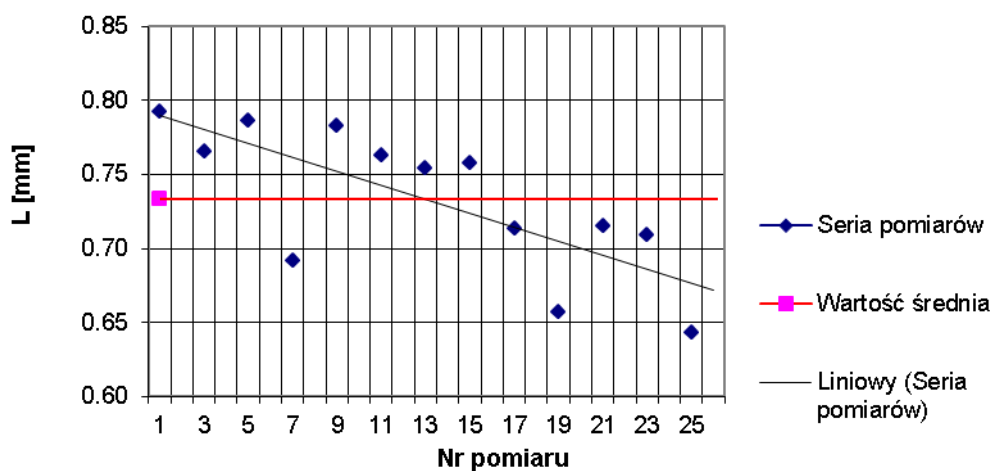
$$L = \frac{1\text{mm}}{D} \times L_{px} \quad (2)$$

gdzie:  $D$  – średnia arytmetyczna średnicy igły pomiarowej w pikselach,  
 $L_{px}$  – odległość między końcami igieł w pikselach.

Tabela 1. Wyniki pomiarów odległości między igłami (wyniki własne)

nr cyklu	Wyniki pomiarów					Odległość między ostrzami igieł	
	$X [px]$	$Y [px]$	$Z [px]$	$D_x [px]$	$D_y [px]$	$L_{px} [px]$	$L [mm]$
1	30,5	2,9	40,8	65,16	63,75	51,063	0,792
2	28,7	1,9	40,5	65,07	64,51	49,623	0,766
3	31,7	4,3	41,1	66,61	65,80	52,074	0,787
4	16,7	1,3	40,9	62,88	64,82	44,158	0,692
5	30,4	2,1	39,8	63,42	64,47	50,074	0,783
6	26,5	9,5	40,4	64,86	64,32	49,290	0,763
7	30,6	1,2	37,9	64,57	64,49	48,700	0,755
8	29,2	2,1	39,1	64,32	64,69	48,893	0,758
9	16,8	0,4	42,7	63,91	64,79	45,918	0,714
10	10,2	0,1	41,2	65,21	63,87	42,417	0,657
11	19,7	0,5	41,5	63,77	64,69	45,919	0,715
12	20,6	0,6	40,6	63,48	64,82	45,504	0,709
13	11,7	1,7	39,8	64,69	64,34	41,501	0,643
						Średnia	0,733
$D_x, D_y$ - średnice igły $D [px]$ w kierunkach X i Y						Odchylenie standardowe	0.05

Rys. 6 przedstawia wyniki pomiarów odległości między ostrzami igieł oraz wyznaczoną wartość średnią. Odległość między igłami w kolejnych pomiarach ulegała zmniejszeniu, co przedstawiono za pomocą zależności liniowej.

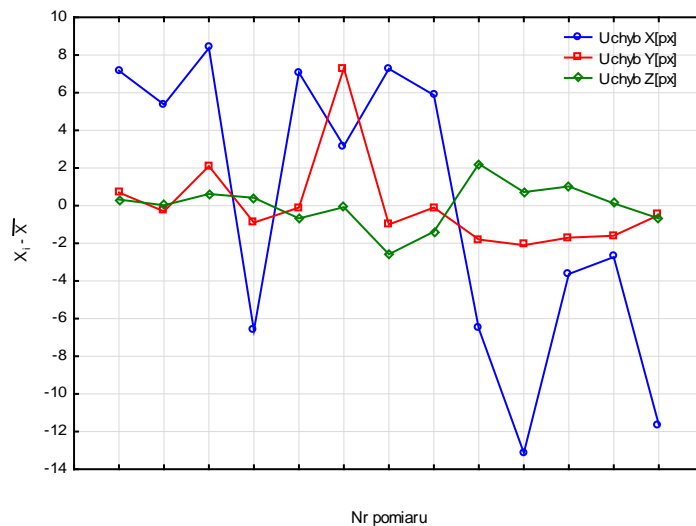


Rys. 6. Wyniki pomiarów odległości (—■—) między igłami podczas oceny powtarzalności pozycjonowania robota Kawasaki FS06L, wartość średnia (—◆—) oraz liniowe dopasowanie do wyników (linia trendu)

Z pokazanych na rys. 7 wyników pomiarów w postaci rzutów XZ i YZ wynika ich duża zmienność w kierunku X (tab. 1). Zmienność wyników pomiarów składowej X ma istotny wpływ na obliczoną wartość odległości L.

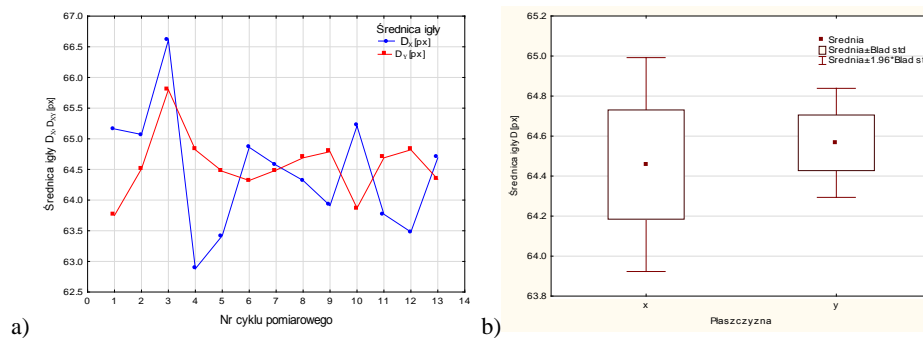
Tabela 2: Statystyki pomiarów odległości igieł w rzutach XZ i YZ, liczba wyników n=13 (wyniki własne)

	Średnia	Minimum	Maksimum	Odchylenie standardowe
$X [px]$	23.33	10.20	31.70	7.71
$Y [px]$	2.20	0.10	9.50	2.47
$Z [px]$	40.48	37.90	42.70	1.18
$D_x [px]$	64.46	62.88	66.61	0.98
$D_y [px]$	64.57	63.75	65.80	0.50
$L [px]$	47.32	41.50	52.07	3.33
$L [mm]$	0.73	0.64	0.79	0.05



Rys. 7. Różnice wyników pomiarów odległości ostrzy igieł i wartości średnich w rzutach XZ i YZ: uchyby X (—○—), Y (—□—) i Z (—◇—) w pikselach (wyniki własne)

Dla sprawdzenia dokładności pomiarów, uzyskanych za pomocą przygotowanego stanowiska i systemu wizyjnego, analizowano wyniki pomiarów średnic igieł w kierunkach X oraz Y. Wyniki te przedstawiono na rys. 8 i stwierdzono, że pomiary średnic igieł wykonane w kierunku X obarczone są większym błędem niż wyniki pomiarów w osi Y.



Rys. 8. Wyniki pomiarów średnic igieł w kierunkach X i Y podczas kolejnych cykli pomiarowych; a) wyniki surowe, b) porównanie średnich i zmienności pomiarów (wyniki własne)

Na podstawie analizy wyników określono powtarzalność pozycjonowania robota. Obliczono, że dokładność pozycjonowania w trakcie testu mieściła się w zakresie  $+0,059$  mm oraz  $-0,090$  mm. Deklarowana przez producenta dokładność

pozycjonowania wynosi  $\pm 0,100$  mm. Wyniki pomiarów potwierdzają zakresie tolerancji dokładności powtarzalności pozycjonowania robota określone przez producenta. Taka dokładność jest odpowiednia do prawidłowego funkcjonowania robota w elastycznym gnieździe wytwarzania i realizacji funkcji transportowych, w tym mocowania przedmiotów. Mocowanie przedmiotów do pierwszej operacji nie wymaga wyższej precyzji pozycjonowania. Przedmioty umieszcza się w uchwycie tokarskim, gdzie najczęściej początkową czynnością obróbczą jest planowanie powierzchni czołowej lub inne zabiegi obróbkowe mające na celu uzyskanie odpowiedniej tolerancji wymiarowo kształtowej przedmiotu.

Precyzyjne pozycjonowanie i powtarzalność pozycjonowania ma natomiast znaczenie podczas mocowania przedmiotu w szczękach imadła do wykonania drugiej operacji. Wymagane jest wówczas zastosowanie przyrządów pomocniczych takich jak zderzaki i szczęki z wcięciami pryzmatycznymi, które zapewnią precyzyjne zamocowanie przedmiotu z dokładnością wyższą niż dokładność pozycjonowania robota.

Zidentyfikowano przyczynę niedokładności pozycjonowania robota, którą było niewłaściwe posadowienie robota. W trakcie testowania był on posadowiony na prostokątnym stelażu, niezwiązany z podłożem. Podczas dynamicznych ruchów ramienia, w którym brała udział cała masa robota stelaż ulegał niewielkim przemieszczeniom, w szczególności w kierunku krótszego boku prostokątnego stelaży, czyli osi X.

## 5. WNIOSKI

Pomiar dokładności pozycjonowania przeprowadzono w celu sprawdzenia powtarzalności pozycjonowania ramienia robota. Wyniki badania są zgodne z danymi producenta.

Zastosowana metodyka wykorzystująca wizyjny system pomiarowy umożliwia:

- ocenę dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota,
- automatyzację okresowej kalibracji robota,
- archiwizację pomiarów geometrycznych,
- opracowanie raportu z oceny dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota.

Zastosowanie zautomatyzowanej metody oceny dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota jest przydatnym rozwiązaniem zarówno w przypadku procesu produkcyjnego o charakterze powtarzalnym jak również w przypadku produkcji krótkich serii w elastycznym systemie produkcji.

#### LITRATURA

- [1] ALBADA, G D.V., LAGERBERG, A., VISSER, J.M., *A low-cost pose-measuring system for robot calibration*. Tech. Rep. University of Amsterdam, Faculty of Mathematics and Computer Science, 1996.
- [2] MADDAHI Y., SEPEHRI, N., GHORABI H. AND MADDAHI A., *Testing robotic manipulators: improvement and experience*. W: Int. J. of Systems Applications, Engineering & Development. vol. 4, 2010, 35-45.
- [3] GÖTZ C., TUTTAS S., HOEGNER L., EDER K., STILLA U., *Accuracy evaluation for a precise indoor multi-camera pose estimation system*. Stilla U. et al (Eds) PIA11. W: Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38, Munich, Germany, 2011, 97-102.
- [4] NEUMAYR R., ZSOMBOR-MURRAY P., O'LEARY P., *Precise pose measurement with single camera calibration for planar parallel manipulators*. W: Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, vol. 35, nrs 2, 2011, 201-213.
- [5] RENAUD P., ANDREFF N., DHOME M., MARTINET P., *Experimental evaluation of a vision-based measuring device for parallel machine-tool calibration*. Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 02, Lausanne, Switzerland, 2002, 1868-1873.
- [6] EVS-EN ISO 9283:2001. *Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods*.
- [7] GAN Y., DAI X., *Base frame calibration for coordinated industrial robots*. W: Robotics and Autonomous Systems. vol.59, nr 7-8, 2011, 563-570.



# **MODYFIKACJA FILTRU CYFROWEGO W ODNIESIENIU DO POWIERZCHNI ZAWIERAJĄCYCH SZEROKIE WGLĘBIENIA**

Paweł PAWLUS<sup>1</sup>, Paweł DOBRZAŃSKI<sup>2</sup>, Przemysław PODULKA<sup>1</sup>

## **1. WSTĘP**

Na podstawie wyników pomiarów stereometrycznych można szczegółowe informacje o właściwościach powierzchni wzajemnie ze sobą współpracujących. Zazwyczaj analizuje się właściwości powierzchni po usunięciu jej zarysu kształtu [1, 2] i falistości. Jednym z problemów występujących podczas filtracji cyfrowej jest występowanie szerokich oraz głębokich dolin, które wpływają negatywnie na określenie parametrów chropowatości powierzchni. W odniesieniu do tego typu powierzchni należy stosować filtry odporne [3, 4]. Jednakże gdy powierzchnia zawiera szerokie doliny, nawet stosowanie filtra odpornego powoduje zniekształcenia wyników pomiarów chropowatości powierzchni [5]. W artykule zaproponowano próbę przezwycięzenia tego problemu.

## **2. PROCEDURA FILTRACJI**

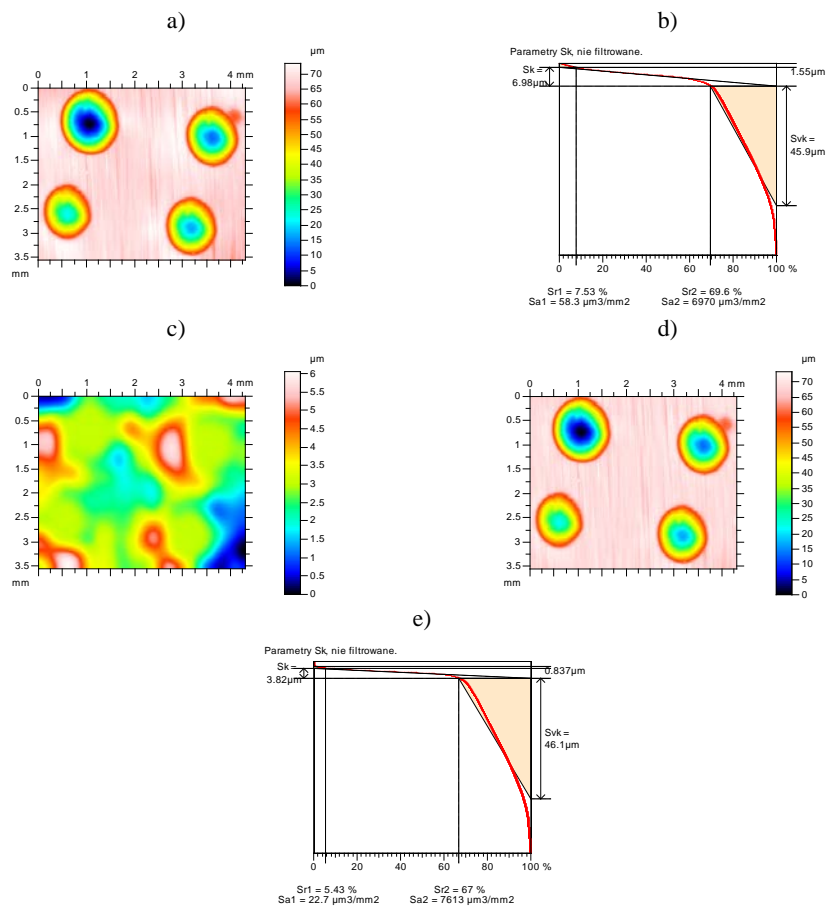
Przedmiotem analizy były powierzchnie zawierające wygniatane kieszenie smarowe oraz powierzchnie cylindra po gładzeniu płasko-wierzchołkowym. Powierzchnie były mierzone z wykorzystaniem profilometru stykowego Talyscan 150. Analizowano parametry z normy ISO 25178 obliczane z wykorzystaniem programu TalyMap Gold. Zastosowano oryginalną procedurę filtracji cyfrowej wyników pomiarów stereometrii powierzchni, podobną w swej zasadzie do metody filtracji profili zawartej w normie ISO 13565-1. Celem propozycji jest filtracja tylko części nośnej powierzchni, nie naruszając kształtu wgłębień. Metodę tę zastosowano do wielu powierzchni, między innymi do powierzchni zawierającej kieszenie smarowe S1 (rys. 1). Rysunek 1a przedstawia mapę

---

<sup>1</sup> Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, [ppawlus@prz.edu.pl](mailto:ppawlus@prz.edu.pl), [przpod@prz.edu.pl](mailto:przpod@prz.edu.pl)

<sup>2</sup> Politechnika Rzeszowska, Wydział Zarządzania, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

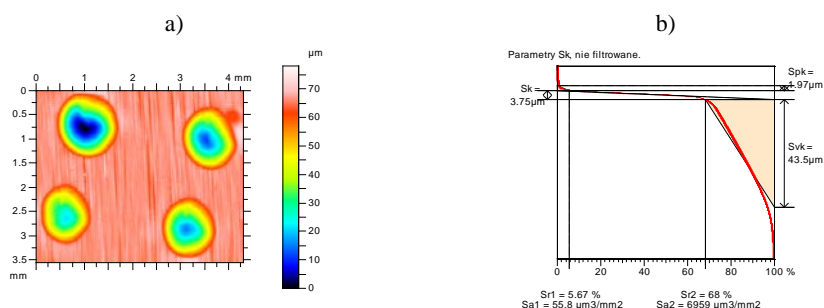
konturową powierzchni. Filtrację należy przeprowadzić w odniesieniu do części nośnej powierzchni o rzędnych większych od rzędnej punktu odciętej Sr2. Jest to punkt oddzielający część nośną od części wgłębień powierzchni (rys. 1b). Nie zawsze jednak parametry z grupy Sk zapewniają poprawne oszacowanie punktu przejścia, należy wtedy stosować inne procedury [6]. Rysunek 1c przedstawia falistość części wgłębień po zastosowaniu filtra Gaussa (cut-off = 0.8 mm). Następnie należy odjąć od rzędnych powierzchni niefiltrowanej rzędne falistości. Mapę konturową filtrowanej powierzchni przedstawia rys. 1d, zaś wykres jej udziału materiałowego rys. 1e.



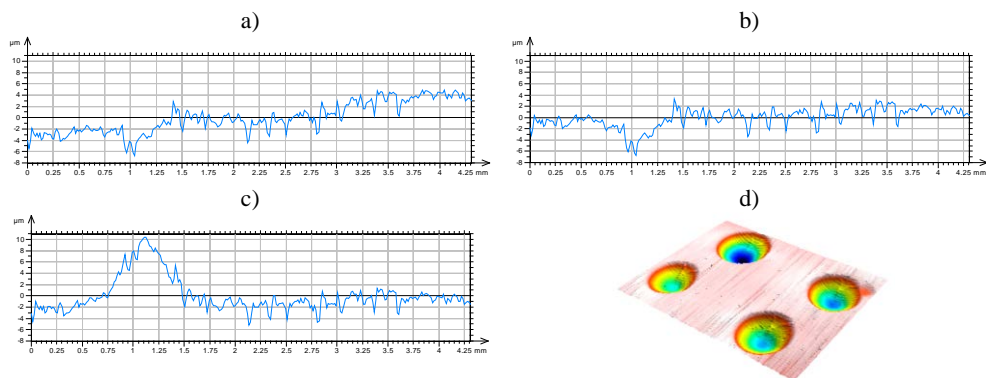
Rys. 1. Mapa konturowa powierzchni niefiltrowanej S1 (a), wykres jej udziału materiałowego (b), mapa konturowa falistości części nośnej (c), mapa konturowa powierzchni filtrowanej (chropowatości) z użyciem proponowanego filtra (d), wykres jej udziału materiałowego (e)

### 3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na rysunku 2 przedstawiono mapę konturową powierzchni filtrowanej (chropowatości) po zastosowaniu filtra odpornego oraz wykres udziału materiałowego tej powierzchni. Filtracja cyfrowa powinna spowodować zmniejszenie parametrów pionowych części nośnej profilu  $S_{pk}$  (zredukowanej wysokości wierzchołków) i  $S_k$  (głębokości chropowatości rdzenia), co zostało potwierdzone w przypadku użycia proponowanego filtra (rys 1b i 1e). Natomiast stosowanie filtra odpornego spowodowało zniekształcenie kształtów kieszeni smarowej (rys. 2a). W związku z tym zwiększyła się wartość  $S_{pk}$  chropowatości powierzchni (rys. 2b). Zmienił się również kształt pierwszego (górnego) profilu poziomego, przechodzącego przez początek lewej górnej kieszeni smarowej (rys. 3).



Rys. 2. Mapa konturowa powierzchni filtrowanej S1 z zastosowaniem filtra odpornego (a) wykres jej udziału materiałowego (b)



Rys. 3. Pierwszy (górnny) profil poziomy powierzchni niefiltrowanej S1 (a) oraz powierzchni filtrowanej po zastosowaniu proponowanego filtra (b) oraz filtra odpornego (c), widok powierzchni niefiltrowanej (d)

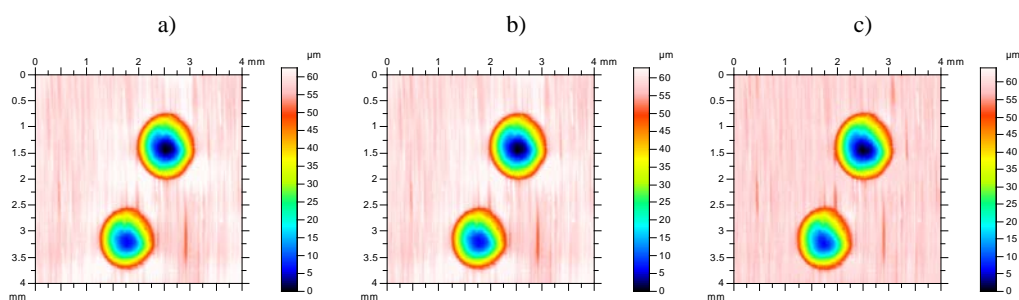
O ile stosowanie proponowanego filtra spowodowało wyrównanie profilu w części oddalonej od wgłębienia (rys. 3b) w porównaniu profilem niefiltrowanym (rys 3a), to wykorzystanie filtra odpornego spowodowało powstanie wypłytki w początkowej części profilu (rys. 3c).

Większość parametrów profili pionowych chropowatości powierzchni po zastosowaniu proponowanego filtra, w porównaniu z filtrem odpornym bliższa jest parametrom powierzchni niefiltrowanej. Po zastosowaniu nieprawidłowego filtra zazwyczaj zniekształceniu ulega parametr  $Sp/Sz$  [5]. Zwiększył się on o 44% po zastosowaniu filtra odpornego w porównaniu do powierzchni niefiltrowanej.

Tablica 1. Parametry powierzchni niefiltrowanej i filtrowanej S1 (chropowatości) po zastosowaniu różnych filtrów

Parametry	Powierzchnia niefiltrowana	Powierzchnia filtrowana proponowany filtr	Powierzchnia filtrowana filtr odporny	Jednostki
Sq	15.400	15.300	14.400	
Ssk	-1.760	-1.800	-1.840	$\mu\text{m}$
Sku	5.120	5.210	5.380	
Sp	12.500	12.500	19.100	
Sv	60.900	60.900	59.000	$\mu\text{m}$
Sz	73.500	73.400	78.100	$\mu\text{m}$
Sa	11.800	11.800	11.000	$\mu\text{m}$
Sp/Sz	0.170	0.170	0.245	
Sal	0.305	0.310	0.302	mm
Str	0.858	0.869	0.869	
Sdq	0.085	0.085	0.083	
Sdr	0.360	0.358	0.347	%

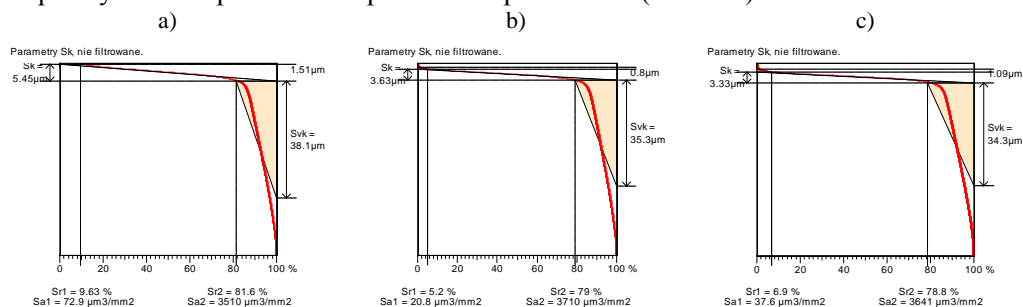
Stosowanie filtra odpornego spowodowało niezauważalne zmiany wyglądu powierzchni S2 (rys. 4).



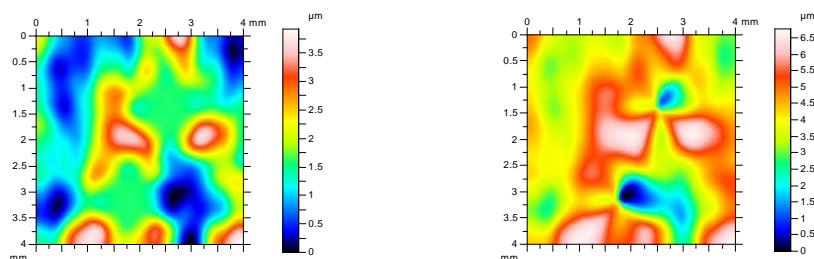
Rys. 4. Mapa konturowa powierzchni niefiltrowanej S2 (a), mapa konturowa powierzchni filtrowanej (chropowatości) z użyciem proponowanego filtra (b) oraz filtra odpornego (c)

Rysunek 5 przedstawia wykresy udziału materiałowego powierzchni niefiltrowanej oraz chropowatości. Falistość powierzchni po zastosowaniu filtra odpornego (zawiera

wgłębienia w miejscach występowania kieszeni smarowych (rys. 6), co powoduje powstanie wypiętrzenia materiału (rzędne chropowatości są rzędnymi powierzchni niefiltrowanej pomniejszonymi o rzędne falistości), a w konsekwencji wzrost współczynnika niepełności chropowatości  $Sp/Sz$  o 25% (tablica 2).



Rys. 5. Wykres udziału materiałowego powierzchni S2 (a), wykres udziału materiału konturowa powierzchni filtrowanej (chropowatości) z użyciem proponowanego filtra (b) oraz filtra odpornego (c)

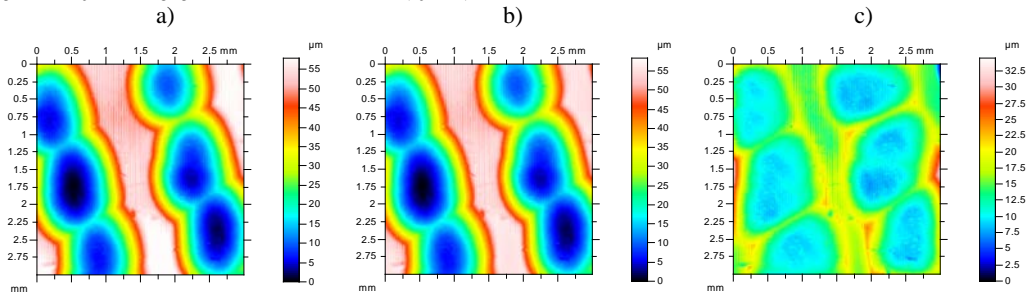


Rys. 6. Mapa konturowa falistości powierzchni S2 po zastosowaniu proponowanego filtra (a) oraz filtra odpornego (b)

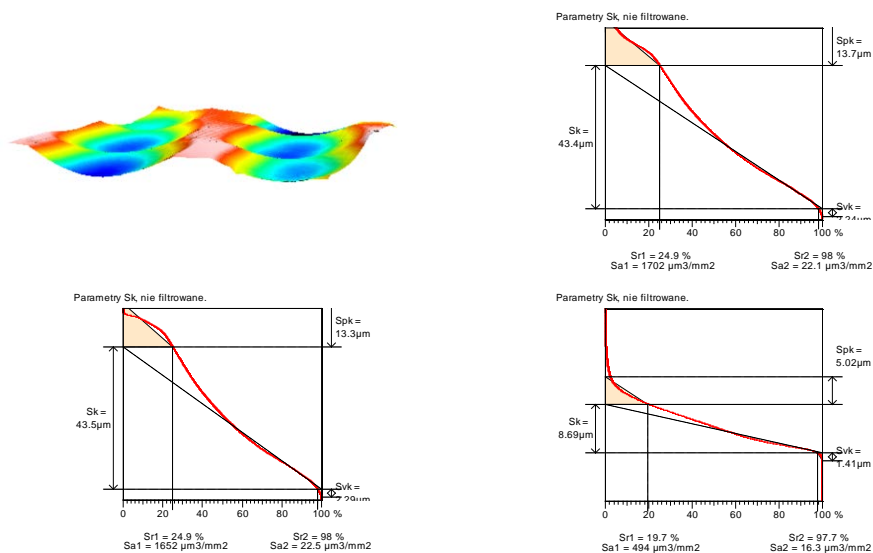
Tablica 2. Parametry powierzchni niefiltrowanej i filtrowanej S2 (chropowatości) po zastosowaniu różnych filtrów

Parametry	Powierzchnia niefiltrowana	Powierzchnia filtrowana proponowany filtr	Powierzchnia filtrowana filtr odporny	Jednostki
Sq	11.300	11.200	11.000	
Ssk	-2.920	-2.960	-2.980	μm
Sku	10.900	11.100	11.200	
Sp	6.660	7.690	8.480	
Sv	55.900	55.900	55.600	μm
Sz	62.600	63.600	64.100	μm
Sa	6.710	6.710	6.560	μm
Sp/Sz	0.106	0.121	0.132	
Sal	0.561	0.573	0.563	mm
Str	0.890	0.889	0.863	
Sdq	0.080	0.080	0.080	
Sdr	0.321	0.318	0.315	%

W odróżnieniu od powierzchni S2, filtracja z zastosowaniem filtru odpornego powierzchni S3 zapewniła znaczne zmiany wyglądu chropowatości powierzchni (rys. 7), jak i wykresu jej udziału materiału (rys.8).



Rys. 7. Mapa konturowa powierzchni niefiltrowanej S3 (a), mapa konturowa powierzchni filtrowanej (chropowatości) z użyciem proponowanego filtru (b) oraz filtru odpornego (c)



Rys. 8. Widok powierzchni niefiltrowanej S3 (a), wykres jej udziału materiałowego (b), wykres udziału materiału konturowa powierzchni filtrowanej (chropowatości) z użyciem proponowanego filtru (c) oraz filtru odpornego (d)

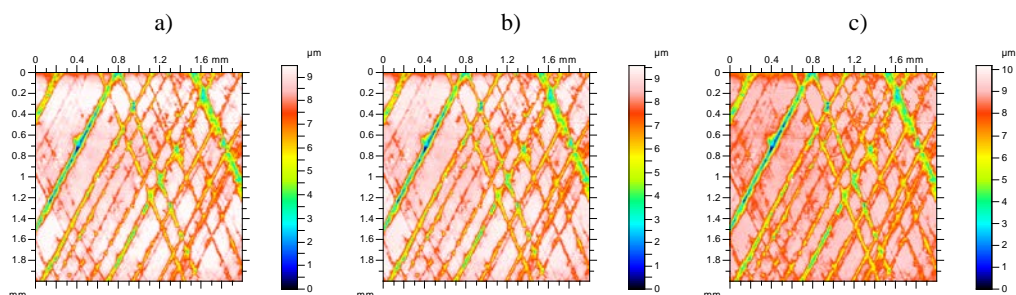
Natomiast po zastosowaniu proponowanego filtru zarówno wygląd powierzchni, jak i wartości parametrów Spk, Sk i Svk (zredukowana głębokość dolin) oraz parametry pokazane w tabelicy 3 zmieniły się nieznacznie. Jest to spowodowane tym, że wysokość części nośnej jest bardzo mała w porównaniu z częścią wgłębień i jej zmiany w wyniku filtracji wpływają nieznacznie na parametry chropowatości. Natomiast filtracja z zastosowaniem filtru odpornego wpłynęła istotnie na zmianę wszystkich analizowanych parametrów, również hybrydowych Sdq i Sdr oraz przestrzennych Sa1 i Str stałych

w przypadku powierzchni S1 i S2. Przykładowo, odchylenie standardowe wysokości nierówności zmniejszyło się o 78% w porównaniu z powierzchnią niefiltrowaną.

Tablica 3. Parametry powierzchni niefiltrowanej i filtrowanej S3 (chropowatości) po zastosowaniu różnych filtrów

Parametry	Powierzchnia niefiltrowana	Powierzchnia filtrowana proponowany filtr	Powierzchnia filtrowana filtr odporny	Jednostki
Sq	17.500	17.500	3.930	
Ssk	0.256	0.238	0.808	$\mu\text{m}$
Sku	1.680	1.650	3.600	
Sp	28.900	29.400	20.700	
Sv	29.000	29.000	13.800	$\mu\text{m}$
Sz	57.900	58.400	34.500	$\mu\text{m}$
Sa	15.500	15.500	3.250	$\mu\text{m}$
Sp/Sz	0.499	0.503	0.600	
Sal	0.352	0.354	0.290	mm
Str	0.288	0.285	0.214	
Sdq	0.116	0.116	0.099	
Sdr	0.669	0.670	0.488	%

Dotychczas analizowano powierzchnie zawierające kieszenie smarowe. Jednakże stosowanie filtra odpornego może spowodować zniekształcenie wyników pomiarów chropowatości powierzchni cylindra po gładzeniu płasko-wierzchołkowym (rys.9). Filtracja z użyciem filtra odpornego powoduje zawyżenie wartości parametru Sp/Sz o 45% w porównaniu do filtra proponowanego (zmiany były mniejsze od 10% - tablica 4).



Rys. 9. Mapa konturowa powierzchni niefiltrowanej S4 (a), mapa konturowa powierzchni filtrowanej (chropowatości) z użyciem proponowanego filtra (b) oraz filtra odpornego (c)

Tablica 4. Parametry powierzchni niefiltrowanej i filtrowanej S4 (chropowatości) po zastosowaniu różnych filtrów

Parametry	Powierzchnia niefiltrowana	Powierzchnia filtrowana proponowany filtr	Powierzchnia filtrowana filtr odporny	Jednostki
Sq	1.380	1.360	1.350	
Ssk	-1.720	-1.770	-1.840	μm
Sku	6.040	6.240	6.520	
Sp	1.300	1.440	2.020	
Sv	8.190	8.160	8.180	μm
Sz	9.490	9.600	10.200	μm
Sa	1.040	1.020	1.000	μm
Sp/Sz	0.137	0.150	0.198	
Sal	0.039	0.037	0.036	mm
Str	0.049	0.045	0.035	
Sdq	0.093	0.093	0.093	
Sdr	0.426	0.426	0.426	%

## 1. WNIOSKI

Proponowana procedura polega na filtracji jedynie części nośnej powierzchni. Rzędne chropowatości powierzchni są rzędnymi powierzchni filtrowanej pomniejszonymi o rzędne falistości części nośnej. Metoda ta może być stosowana po wyeliminowaniu zarysu kształtu powierzchni. Powinna być używana w odniesieniu do powierzchni zawierających szerokie wgłębienia, na przykład wygniatane kieszenie smarowe. Stwierdzono, że stosowanie tej metody zapewnia poprawniejsze wyniki niż wykorzystanie filtru odpornego.

## LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., *Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość*. Warszawa. WNT. 2009.
- [2] LEACH R., (red.) *Characterisation of areal surface texture*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013
- [3] BRINKMAN S., BODCHWINNA H. LEMKE H.-W., *Development of a robust Gaussian regression filter for three-dimensional surface analysis*. X International Colloquium on Surfaces 2000, Chemnitz, Germany, 122-131.
- [4] BRINKMAN S., BODSCHWINA H., *Advanced Gaussian filters*. In L.Blunt, X. Jiang (eds): *Advanced Techniques for Assessment Surface Topography*. Kogan Page Science, London and Sterling 2003, 62-89.
- [5] DOBRZAŃSKI P., PAWLUS P., *Modification of robust filtering of stratified surface topography*. W: *Metrology and Measurement Systems*, Vol. XX (2013), No. 1, 107–118, 2013.
- [6] GRABOŃ W., PAWLUS P., KOSZELA W., REIZER R., *Proposals of methods of oil capacity calculation*. W: *Tribology International* 75, 2014, 117-122.



# POPRAWA DOKŁADNOŚCI FREZOWANIA POWIERZCHNI SWOBODNYCH

Małgorzata PONIATOWSKA<sup>1</sup>, Andrzej WERNER<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Osiągnięcie wymaganej dokładności powierzchni wymaga często przeprowadzenia kompensacji błędów obróbkowych. Szczególnym przypadkiem stawiającym szereg wyzwań z tym związanych jest wytwarzanie na frezarskich centrach obróbkowych obiektów opisanych za pomocą złożonych powierzchni przestrzennych. Stosowane są różne podejścia mające na celu podniesienie dokładności frezowanych elementów. W literaturze opisano metody kompensacji błędów geometryczno-ruchowych obrabiarek uwzględniające ugięcie narzędzia w trakcie obróbki oraz metody wykorzystujące wyniki pomiarów współrzędnościowych w korekcy programów obróbkowych.

Stosowane są obecnie dwie metody kompensacji błędów obróbkowych wykorzystujące współrzędnościowe dane pomiarowe. Jedną z nich, zwaną metodą „on-line”, zakłada wykonanie pomiarów współrzędnościowych bezpośrednio na obrabiarce. Tę metodę zastosowali autorzy prac [1,2,3] uzyskując znaczną skuteczność korekcji. Przeprowadzanie pomiarów na obrabiarce CNC ma tę zaletę, że nie popełnia się błędów wynikających z różnicy w pozycjonowaniu przedmiotu na obrabiarce i na współrzędnościowej maszynie pomiarowej, wadą natomiast jest mniejsza dokładność pomiaru.

Drugą metodą kompensacji błędów obróbkowych jest metoda „off-line”, w której pomiary przeprowadzane są na współrzędnościowej maszynie pomiarowej (WMP). W artykule [4] zaproponowano i przetestowano schemat poprawy dokładności powierzchni kształtowych wykorzystujący pomiary obrabianego przedmiotu na WMP. Aby określić rozkład odchyłek dane pomiarowe były dopasowywane do profilu nominalnego obrabianej powierzchni. Następnie dokonano dekompozycji odchyłek na składową zdeterminowaną i losową, które skojarzono odpowiednio z falistością

---

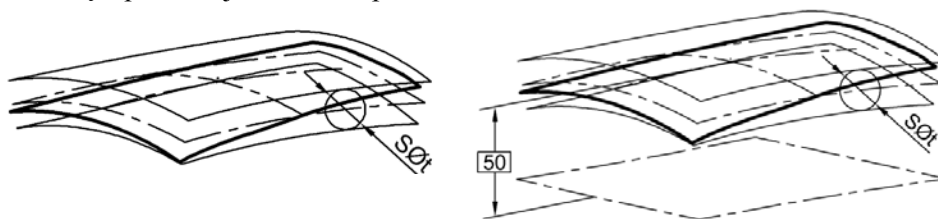
<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45

i chropowatością obrabianego profilu. Informacje te posłużyły do kompensacji falistości obrabianej powierzchni. Podobne podejście zasygnalizowane zostało w pracy [5]. Prezentowana w niej metodyka sprawdzona została na przykładzie płaskich profili krzywoliniowych opisanych za pomocą NURBS. W pracy [6] zaproponowano uniwersalną metodę korekcji błędów obróbki w produkcji seryjnej na podstawie uśrednionego dla wielu powierzchni modelu CAD odchyłek zdeterminowanych reprezentującego produkowane przedmioty. Model ten reprezentował nierówności powierzchni, dane pomiarowe dopasowano uprzednio do nominalnego modelu CAD.

Referat poświęcono metodzie, w której korekcja błędów frezowania powierzchni swobodnych odbywa się na podstawie wyników pomiarów off-line. Proponowana metoda służy do poprawy dokładności powierzchni przedmiotów produkowanych jednostkowo, np. złożonych powierzchni form i matryc i wymaga integracji takich zagadnień jak: systemy CAD/CAM, współrzędnościowa technika pomiarowa oraz inżynieria odwrotna. Na podstawie danych otrzymanych w pomiarach względem układu baz (rys. 1) wyznacza się model CAD odchyłek zdeterminowanych reprezentujący złożoną odchyłkę kształtu. Model ten jest podstawą do wyznaczenia poprawek kompensujących wpływy błędów obróbki. Wielkim wyzwaniem w tym przypadku było zapewnienie powtarzalności pozycjonowania/mocowania przedmiotu podczas obróbki.

## 2. OCENA DOKŁADNOŚCI POWIERZCHNI SWOBODNYCH

Dokładność powierzchni swobodnej opisuje odchyłka kształtu. Można ją wyznaczyć na dwa sposoby – względem układu baz i bez odniesienia do układu baz, rys. 1 [7]. Kierunek i położenie pola tolerancji kształtu mogą nie być zdefiniowane (rys. 1a), w tym przypadku nie występuje element bazowy. Inny przypadek pokazano na rys. 1b. Pole tolerancji ma analogiczną definicję jak na rys. 1a, ale powierzchnia teoretyczna jest tu w określonym położeniu i kierunku względem elementu bazowego. W takim przypadku pole tolerancji kształtu obejmuje również odchyłki położenia i kierunku. W pomiarach współrzędnościowych na bazie modelu CAD, geometrię nominalną reprezentuje wirtualna powierzchnia modelu.



Rys. 1. Pole tolerancji kształtu powierzchni:  
a) bez elementu bazowego, b) względem elementu bazowego [7]

Celem pomiaru współrzędnościowego jest wyznaczenie gładkiej powierzchni reprezentującej odchyłki kształtu, pożądana jest reprezentacja odchyłek o charakterze zdeterminowanym. Jednak w procesie pomiarowym otrzymuje się dane zawierające również niepożądany wpływ chropowatości powierzchni, ta składowa danych pomiarowych ma charakter losowy. Odchyłki o charakterze zdeterminowanym (systematycznym), mają określone przyczyny i w znacznym stopniu powtarzają się na kolejnych powierzchniach obrobionych w tych samych warunkach. Otrzymywane w pomiarach dane niosą informacje o charakterze przestrzennym. Odchyłki zdeterminowane są przestrzennie skorelowane, brak autokorelacji przestrzennej oznacza przestrzenną losowość odchyłek. Ponieważ każdy wynik pomiaru obarczony jest błędami, oprócz informacji dotyczących odchyłek powierzchni dane pomiarowe zawierają również nieodłączny szum pomiarowy.

### 3. POPRAWA DOKŁADNOŚCI FREZOWANIA

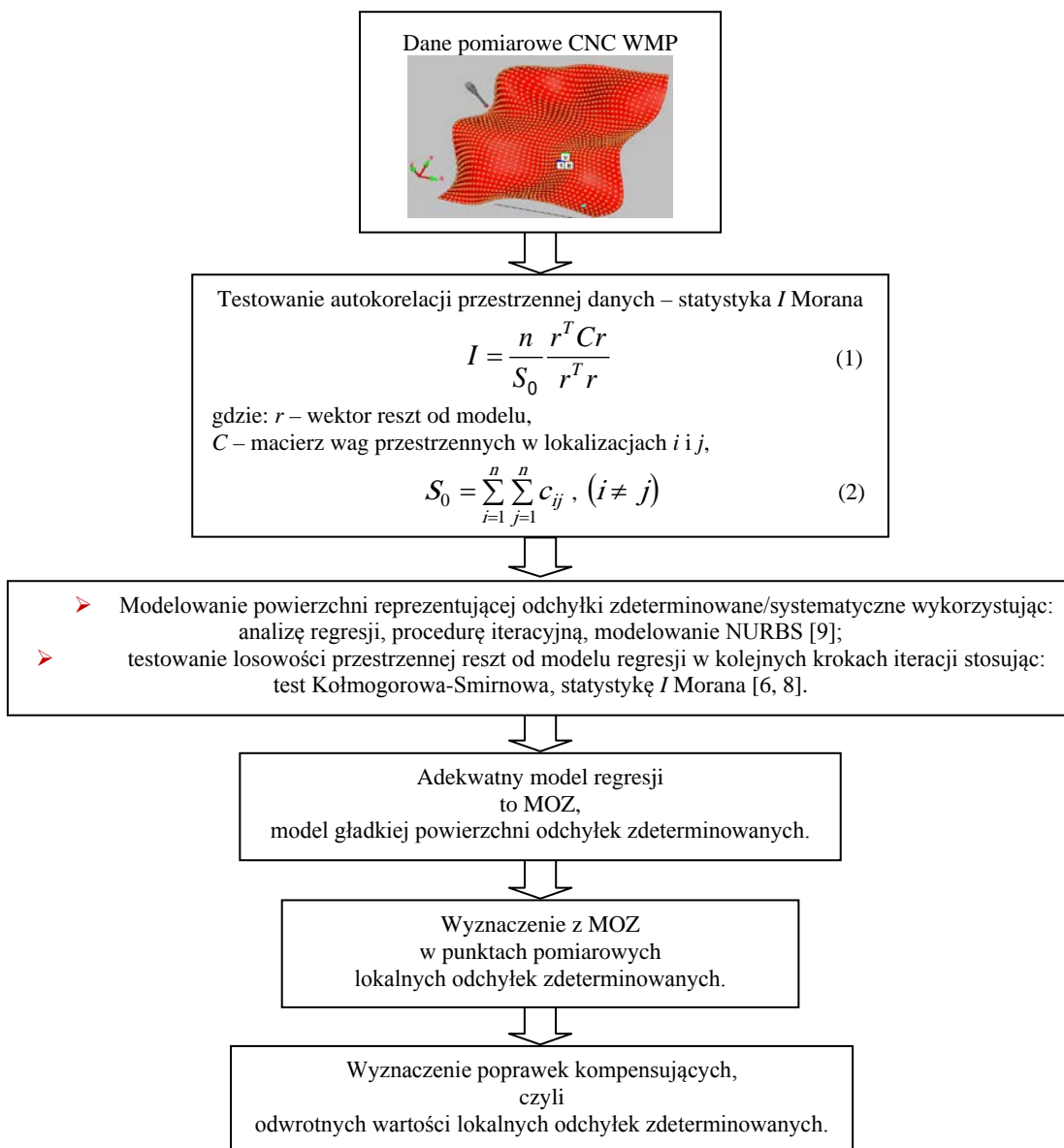
#### 3.1. OPIS METODY

W celu zebrania danych do korekcji programu obróbkowego powierzchnię swobodną odwzorowuje się na sterowanej numerycznie współrzędnościowej maszynie pomiarowej według regularnej siatki punktów. Pomiary wykonuje się w odniesieniu do układu baz, w tym przypadku wyniki reprezentują nierówności powierzchni, a także odchyłki położenia i kierunku. W proponowanej metodzie z danych pomiarowych usuwa się niepożądaną składową losową i następnie przeprowadza korekcję na podstawie oczyszczonych danych, reprezentujących wpływy systematyczne obróbki. W przeciwnym przypadku wyznaczane na podstawie surowych danych pomiarowych poprawki kompensujące wprowadzają do modyfikowanego programu obróbkowego niepożądane efekty losowe z pierwszego etapu obróbki, jak również szum pomiarowy.

Do badań zależności przestrzennych danych wykorzystuje się metodę statystyki przestrzennej, statystykę  $I$  Morana mierzącą autokorelację przestrzenną [8]. Stwierdzenie autokorelacji w danych pomiarowych dowodzi występowania odchyłek zdeterminowanych na powierzchni. Wówczas stosuje się modelowanie NURBS [9] do dopasowania modelu powierzchni regresji reprezentującej odchyłki zdeterminowane, model odchyłek zdeterminowanych (MOZ). Zgodnie z zasadami analizy regresji bada się adekwatność modelu, testując reszty pod kątem rozkładu prawdopodobieństwa i autokorelacji przestrzennej. Opracowany model jest podstawą do wyznaczenia poprawek kompensujących wpływy systematyczne obróbki. Modyfikuje się następnie nominalny model CAD i na tej podstawie generuje skorygowany program obróbkowy, skorygowaną ścieżkę narzędzia.

### 3.2. PROCEDURA WYZNACZANIA POPRAWEK KOMPENSUJĄCYCH BŁĘDY OBRÓBKII

Procedurę wyznaczania poprawek kompensujących błędy obróbki przedstawia schemat blokowy na rys. 2.



Rys. 2. Schemat procedury wyznaczania poprawek kompensujących wpływy błędów obróbki

#### 4. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Metodę weryfikowano na powierzchniach swobodnej próbek o wymiarach podstawy 50×50 mm. Obróbkę przeprowadzono na frezarskim centrum obróbkowym VMC-1020S/A OMNIS. Próbki mocowano w precyzyjnym nowym imadle. Powierzchni bazowe do definiowania układu współrzędnych przedmiotu były każdorazowo obrabiane, aby zminimalizować różnice w pozycjonowaniu podczas obróbki i pomiarów. Zastosowano frez kulisty o średnicy 6 mm, prędkość obrotową 7500 obr/min, posuw 300 mm/min, obróbkę dwustronną w płaszczyźnie XY.

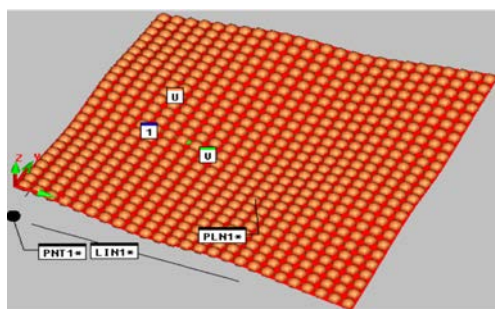
##### 4.1. AKWIZYCJA DANYCH POMIAROWYCH

Pomiary przeprowadzono na WMP GLOBAL Performance z głowicą SP25M (oprogramowanie PC DMIS,  $MPE_E=1,5+L/333 \mu\text{m}$ ). Zastosowano trzpień pomiarowy 20 mm z końcówką  $d = 4 \text{ mm}$ , zmierzono 625 punktów pomiarowych według regularnej siatki  $u \times v$  (25 wierszy  $\times$  25 kolumn, jak na rys. 3a). Otrzymano odchyłki o rozkładzie wartości zaprezentowanym na rysunku 3b, wartości odchyłek zamieszczono w tab. 1.

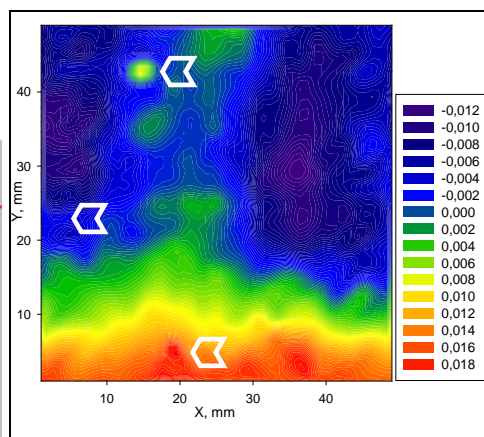
Tab. 1. Parametry statystyczne odchyłek zaobserwowanych

mm	Odchyłki
Średnia arytmetyczna	-0,0003
Min./Max.	-0,0132/+0,0198
Odch. kształtu	0,0396

a)



b)

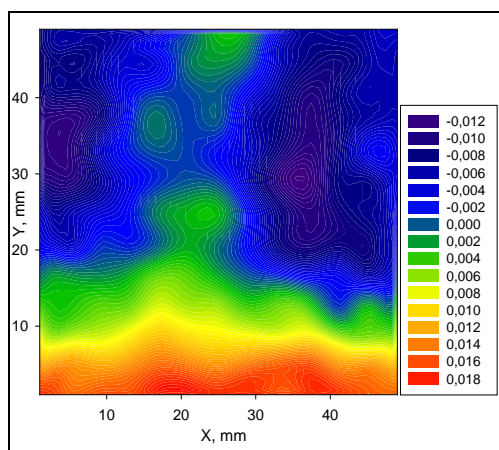


Rys. 3. Pomiary powierzchni: a) rozkład punktów pomiarowych wraz z układem współrzędnych zdefiniowanym na powierzchniach bazowych przedmiotu, b) mapa odchyłek powierzchni

Jak można zaobserwować, płat powierzchni swobodnej podczas obróbki był obrócony wokół osi  $X$ , co świadczy o istotnej wartości odchyłki kierunku. Ponadto na rozkładzie widoczne są efekty wpływów losowych obróbki i/lub pomiaru, rys. 3b.

#### 4.2. WYZNACZENIE POPRAWEK KOMPENSUJĄCYCH

Na otrzymanych w pomiarach odchyłkach modelowano powierzchnię regresji zgodnie z opisem zamieszczonym w p. 3. W procedurze iteracyjnej, w kolejnych krokach zmieniano liczbę punktów kontrolnych powierzchni NURBS w obu kierunkach (dla kolejnych stopni powierzchni 2 i 3) testując w każdym kroku reszty  $r$  od modeli. Za adekwatny przyjmowano model regresji o najmniejszej liczbie punktów kontrolnych i najniższych stopniach powierzchni w kierunkach  $u$  i  $v$  ( $u$  i  $v$  to kierunki parametryzacji powierzchni [9]), dla których reszty od modelu spełniały kryteria normalności rozkładu oraz losowości przestrzennej. Adekwatny model regresji otrzymano dla liczby punktów kontrolnych  $16 \times 16$  i stopni powierzchni  $3 \times 3$ . W modelowaniu powierzchni wykorzystano oprogramowania Mastercam X4 i Rhinoceros 3.0. Wyznaczony model to MOZ. Mapę odchyłek zdeterminowanych pokazano na rys. 4, charakterystyki statystyczne odchyłek zamieszczono w tab. 2.



Tab. 2. Parametry statystyczne odchyłek zdeterminowanych

mm	Odchyłki
Średnia arytmetyczna	-0,0003
Wartość min.	-0,0132
Wartość max.	+0,0192

Rys. 4. Mapa modelu odchyłek zdeterminowanych

Podstawą do wyznaczenia poprawek kompensujących była gładka powierzchni MOZ (rys. 4). Z opracowanego modelu w punktach pomiarowych wyznaczono lokalne odchyłki. Poprawki, czyli wartości odchyłek ze znakiem przeciwnym dodano do nominalnego modelu CAD.

#### 4.3. OCENA DOKŁADNOŚCI POWIERZCHNI PO KOREKCJI

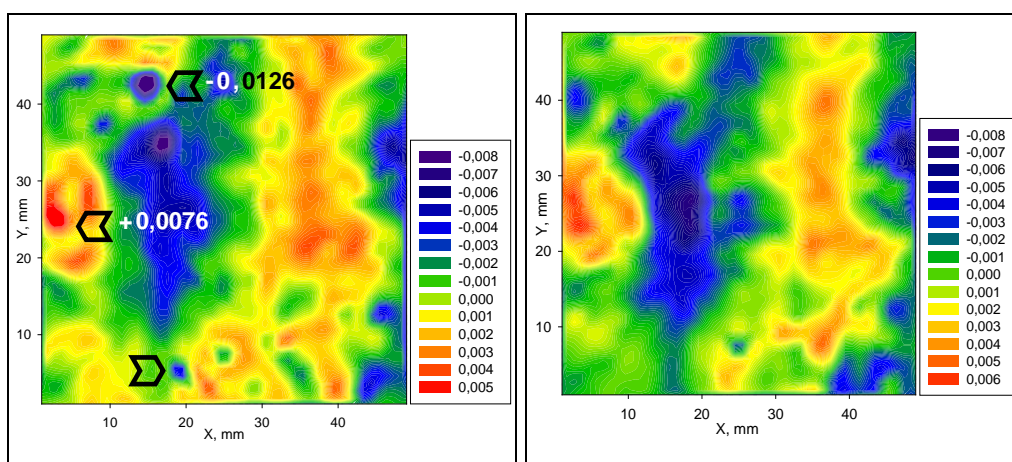
Wykonano dwie próbki po wprowadzeniu poprawek do programów obróbkowych. W przypadku pierwszej powierzchni zmodyfikowano geometrię nominalną dodając odwrócony model odchyłek, a w przypadku drugiej – surowe dane pomiarowe ze znakiem przeciwnym. Zastosowano te same parametry obróbki, co przed korekcją oraz te same parametry pomiaru. Zestawienie wyników pomiarów obu powierzchni zamieszczono w tab. 3, mapy odchyłek na rys. 5 a i b.

Tab. 3. Parametry statystyczne odchyłek po korekcji

mm	Odchyłki po korekcji na podstawie surowych danych pomiarowych	Odchyłki po korekcji na podstawie modelu odchyłek zdeterminowanych
Średnia arytmetyczna	-0,0004	-0,0003
Min./Max.	-0,0126/+0,0076	-0,0073/+0,0061
Odchyłka kształtu	0,0252	+0,0146

a)

b)



Rys. 5. Mapy odchyłek po korekcji: a) na bazie surowych danych, b) na bazie MOZ

Analiza wyników korekcji (tab. 3) wskazuje na istotną redukcję odchyłek kształtu w obu przypadkach (patrz również tab. 1). Proces obróbki charakteryzowała wyjątkowo duża powtarzalność pozycjonowania próbek w obu etapach, przed i po korekcji. Na powierzchni po korekcji na podstawie surowych danych pomiarowych

obserwuje się zdecydowanie więcej efektów losowych niż na powierzchni po korekcji na podstawie modelu, są to wpływy losowe z pierwszego etapu obróbki przeniesione na powierzchnię po korekcji. Efekty te widać np. w lokalizacjach wskazanych na rys. 5a (porównaj z rys. 3b i tab. 3). Odchyłka kształtu powierzchni obrobionej według proponowanej procedury jest znacząco mniejsza.

## 5. WNIOSKI

W referacie przedstawiono procedurę poprawy dokładności frezowania polegającą na zastosowaniu modelu odchyłek zdeterminowanych z pierwszego etapu obróbki do wyznaczenia poprawek kompensujących, następnie korekcji programu obróbkowego oraz ponownej obróbce na podstawie zmodyfikowanego modelu CAD. Wyniki korekcji na jej podstawie porównano z wynikami korekcji na podstawie surowych danych pomiarowych. Wyniki weryfikacji doświadczalnej wskazały znaczną redukcję złożonej odchyłki kształtu powierzchni, z wartości 0,0396 mm na 0,0146 mm, i były istotnie lepsze od wyników po korekcji na podstawie surowych danych, gdzie odchyłka kształtu powierzchni wynosiła 0,0252 mm. Takie wyniki były możliwe dzięki usunięciu z danych pomiarowych efektów losowych zaobserwowanych po pierwszym etapie obróbki oraz wielkiej staranności w pozycjonowaniu próbek podczas obróbki i pomiarów.

## LITERATURA

- [1] CHOI J.P., MIN B.K., LEE S.J., *Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on-machine measurement and error compensation system*. W: Journal of Materials Processing Technology, vol. 155–156, 2004, 2056-2064.
- [2] CHO M.-W., KIM G.-H., SEO T.-I., HONG Y.-C., CHENG H., *Integrated machining error compensation method using OMM data and modified PNN algorithm*. W: International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 46, 2006, 1417-1427.
- [3] CHEN Y., GAO J., DENG H., ZHENG D., CHENA X., KELLY R., *Spatial statistical analysis and compensation of machining errors for complex surfaces*. W: Precision Engineering, vol. 37, 2013, 203-212.
- [4] YANG B.D., MENQ C.H., *Compensation for form error of end-milled sculptured surfaces using discrete measurement data*. W: International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 33, Issue 5, 1993, 725-740.
- [5] LECHNIAK Z., WERNER A., SKALSKI K., KĘDZIOR K., *Methodology of off-line software compensation for errors in the machining process on the CNC machine tool*. W: Journal of Materials Processing Technology, vol. 76, 1998, 42-48.
- [6] PONIATOWSKA M., *Wyznaczanie modeli CAD śladów obróbki powierzchni swobodnych na podstawie współrzędnościowych danych pomiarowych*. W: Mechanik, nr 7, 2013, 535-538.
- [7] PN-EN ISO 1101:2006. *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Tolerancje geometryczne: Tolerancje kształtu, kierunku, położenia i bicia*.
- [8] CLIFF A.D., ORD J.K., *Spatial Processes. Models and Applications*. London, Pion Ltd, 1981.
- [9] PIEGL L., TILLER W., *The NURBS book*, 2nd ed. New York, Springer-Verlag, 1997.



# RESEARCH ON THE INFLUENCE OF AMBIENT LIGHTING ON THE ACCURACY OF LASER TRIANGULATION SCANNING

Michał RAK<sup>1,2</sup>, Adam WOŹNIAK<sup>1</sup>

## 1. INTRODUCTION

In laser triangulation a laser beam is aimed in the direction of the measured surface, producing a spot or a stripe. The spot/stripe is imaged on a detector at a position dependent on the distance of the measured area from the source of the laser. This process, as in other optical measuring methods, is strongly affected by the properties of the measured surface, such as reflectivity and absorption. Influence of the surface on the accuracy of measurements was researched by Martínez et al. [1]. They recommend that the surface should neither be specular, very shiny nor dark. The significance of the characteristics of the surface was also studied and confirmed by other authors [2 - 4]. Accuracy of measurements performed using laser triangulation scanners depends also on other factors, such as [2]: laser scanning depth, projected angle, environment effects, operation error or data processing.

Laser scanning depth is a distance between the head of the scanner and the measured surface. The most relevant scanning depth for a particular scanning head depends on its internal geometry. Projected angle should be the right angle, which means that it is recommended to conduct the measurement maintaining the scanning head normally to the surface. Vukašinić et al. [5], who measured the intensity of surface reflection, indicated that at incidence angle over 60° the intensity is equal to zero.

To environment effect, the following factors may be included: temperature, humidity, illumination, etc. As environmental conditions contain many components,

---

<sup>1</sup> Warsaw University of Technology, Faculty of Mechatronics, ul. św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warsaw

<sup>2</sup> École Polytechnique Montréal, Department of Mechanical Engineering, P.O. Box 6079, Station "Centre-Ville", Montréal, Québec, Canada H3C 3A7

their significance is considerable.

Operation error is associated with the manner of measurement performed by the operator. It is getting revealed especially in measurements with manual devices like a measuring arm equipped with a laser scanner. The operator can choose different strategies or different scanning paths.

As data obtained from optical measurements is often noisy, its filtration is needed [6]. There are many methods to filter data, and the choice of one depends on the operator.

In this paper, as a factor for analysis illumination was chosen. Both the type of lighting and exposure time were tested. Within a single type of lighting, various powers were also set. Studies were performed on a measuring arm fitted with a scanning head.

## 2. INVESTIGATION SETUP

The tests were performed using a coordinate measuring arm model MCA II made by Metris-Nikon. Accuracy [8] of this arm according to the B test is of  $\pm 0.028$  mm and according to the C test is of  $\pm 0.040$  mm.

The arm was equipped with a laser scanner head METRIS – NIKON model MMC80 with characteristics presented in Tab. 1.

Tab. 1. Parameters of the scanner MMC80 METRIS- NIKON [7]

Stripe width (Y)	80 mm
Measuring range (Z)	100 mm
Accuracy ( $2\sigma$ )	34 $\mu\text{m}$
Points per stripe	800

Accuracy test is performed on a highly accurate reference plate, which is scanned in five different orientations of the articulated arm and laser scanner. All resulting point clouds are merged into one and a best-fit plane is determined. For all points from the cloud, the distance to the best-fit plane is calculated. The result of the test is the 2 sigma value on all of the calculated deviations.

The arm (5) was placed on a metal, vibration damping, measuring table (7) to provide a common base for both measuring device and measured part. The laboratory has controlled temperature conditions so the influence of changes of the temperature was eliminated. To examine only one factor at a time, the arm was immobilized using hinged magnetic bases (3), a camera tripod (4) and a specially designed support (6). The laser head (2) was positioned normally to the scanned element, at the distance providing the best accuracy. As a test part white reference cube (1) was used. White colour is the most proper for optical measurements. Vukašinović et al. [5] made

a spectral analysis for the different surface colour using a laser diode of wavelength of 675 nm. The highest relative intensity of the reflected light was for white – 100% and red surface – 87%, and the lowest was for green and blue – 23% and 7%, respectively. Higher intensity associates obviously with a larger number of points collected from the surface. The described investigation setup is presented in Fig. 1.

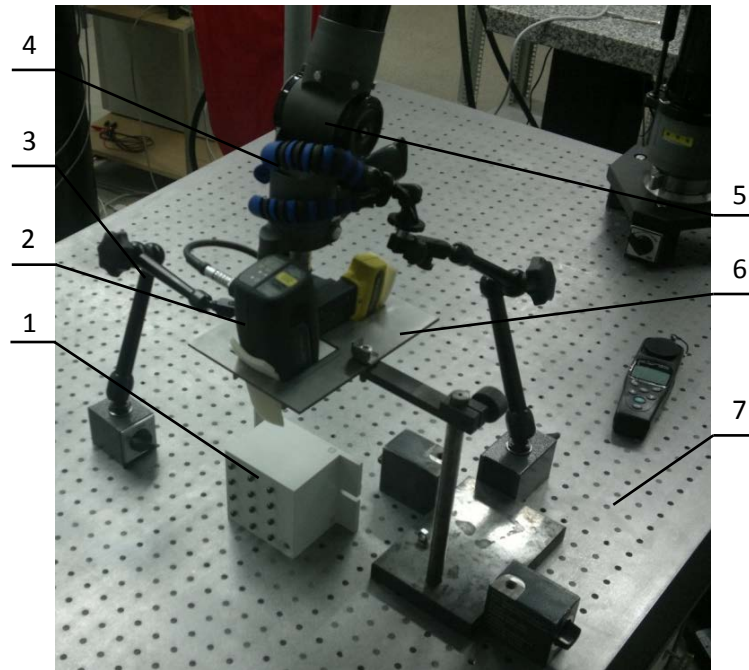


Fig. 1. Investigation setup

### 3. DESCRIPTION OF THE METHOD

From a cube presented in Fig. 1 a single line was gathered using a laser scanner, which was done by the software's option "gather single line". Gathering of a single line was possible thanks to immobilization of the head. The immobilization eliminated also the influence of the operator. The straightness of the line inspected using laser scanner was measured on a CMM and was of 7  $\mu\text{m}$ .

The laser head was positioned at the most proper distance from the cube and normally to its surface. This made it possible to eliminate the two major factors affecting the measurement accuracy.

Measurements were performed with different lightening conditions. At first, test was performed in the darkness - absence of illumination. Subsequently the cube was illuminated successively with a glow-tube lamp, a halogen lamp and a mercury lamp.

Illumination was controlled using a light meter. Straightness of these lines and number of points were determined. The objective of this study was to determine the effect of the type of light on the accuracy of reproduction of the known shape.

Within the halogen lighting different power of lamp was used. Potentiometer was used to set the minimum, average and maximum power of the lamp. Similar parameters as for the previous research were determined: straightness of the line and number of points.

The last checked parameter was the influence of the exposure time on results. Within the glow-tube lamp different times were applied. As for previous research straightness and number of points were compared.

In all tests authors worked raw point clouds, without any filtration. This eliminated the influence of used filter on obtained results. As there are many methods of filtration choice of one can give different and user-dependent results.

Obtained results were compared statistically.

#### 4. RESULTS

To points obtained from the scanning of a single line, a least-square line was fitted and deviations from this line were determined.

Tab. 2 presents a comparison of results (from series of measurements) for different types of illumination. The glow-tube lamp, the halogen lamp and the mercury lamp were used. Measurements were also performed in the absence of lighting.

Tab. 2. Results obtained from different illumination

	darkness	glow-tube lamp	halogen lamp	mercury lamp
luminance, lx	0.1	335	370	1110
average RMS, mm	0.0591	0.0509	0.0374	0.0396
average no of points	515.7	393.4	224.3	227.1

The RMS error is computed from the following equation:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (1)$$

where  $y_i$  is the observed value for the  $i$ th observation,  $\hat{y}_i$  is the predicted value,  $n$  is the number of observations.

Results from the above table are presented in Fig. 2. Error bars characterize range of results for the plotted parameters.

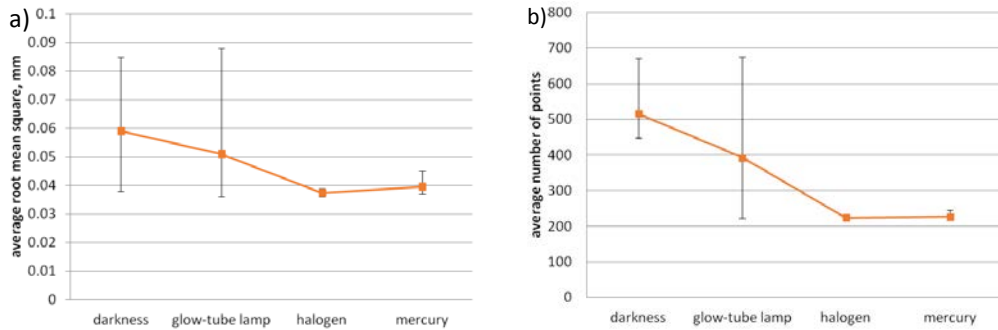


Fig. 2. Results obtained from different illumination: a) root mean square, b) number of points

For illumination with the halogen lamp, different power was used. For three settings, the light meter showed 31 lx, 370 lx and 520 lx respectively. It is equal to minimal, average and maximal values of illumination provided by the lamp. Parameters characterizing the variability of the results are shown in Fig. 3. Error bars characterize range of results for the plotted parameters. In Fig. 4 the number of points from the line for different powers of the lamp are presented.

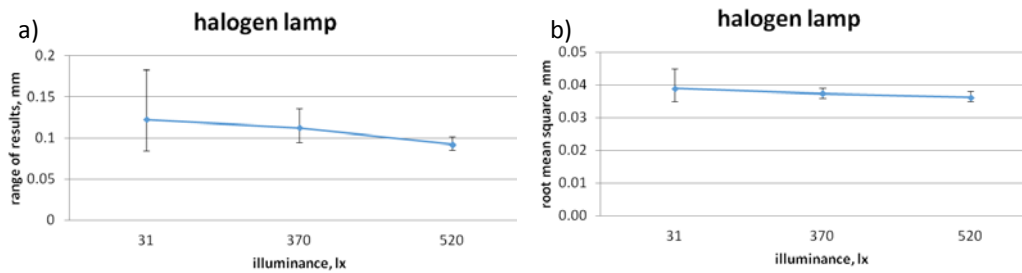


Fig. 3. Illumination with halogen lamp: a) range of results, b) root mean square

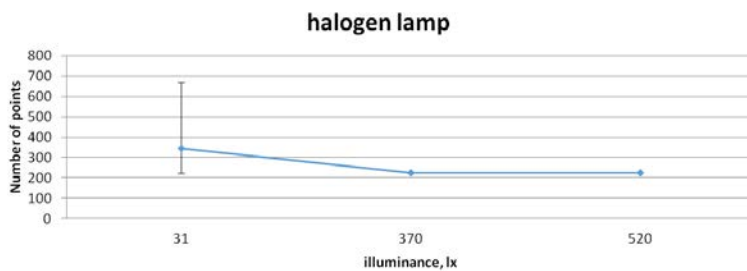


Fig. 4. Number of points for halogen lamp - different power

For illumination with the glow-tube lamp, different times of exposure were used. Root mean square and number of points were determined for 1s, 5s, 15s and 60 s. Results were presented in Fig. 5. Error bars characterize range of results for the plotted parameters.

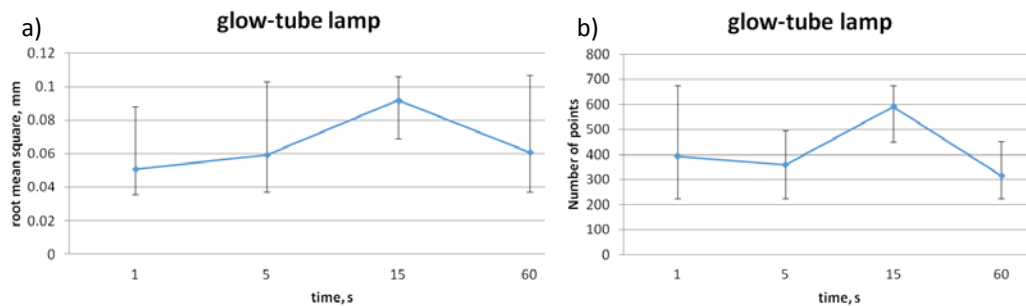


Fig. 5. Different exposure time: a) root mean square, b) number of points

## 5. DISCUSSION OF RESULTS

Comparison of different types of illumination showed that there is a relation between obtained results and ambient light. With the lack of illumination the root mean square regarding to the fitted line is the highest. The RMS decreases with the increase of illumination. Without illumination it is almost 60  $\mu\text{m}$ , while for the mercury lamp with the illumination of 1110 lx, the RMS was nearly 40  $\mu\text{m}$ . It can be concluded that stronger illumination allows to obtain better results from the same surface. It may be caused by the fact that with stronger illumination smaller number of points is gathered - Fig. 2b. If the number of points in a single line is smaller also noise appears to be smaller. It is also worth to notice that for the halogen lamp with illumination of 370 lx and for the mercury lamp with three times bigger illumination (1110 lx) both the root mean square and the number of points are on the same level for these lamps. It may well be concluded that a mercury lamp has lower effect on results despite the higher illumination. To check the significance of differences Kruskal–Wallis test was used. It is non-parametric method for testing whether samples originate from the same distribution. As the P-value obtained from the test was of 0.002 what is less than 0.05, there is a statistically significant difference amongst the medians of RMS error at the 95.0% confidence level. For number of points obtained with different types of illumination P-value was of 0.001 so there is also statistically significant difference amongst the samples. Type of illumination influence on number of gathered points.

The next study was conducted with the use of a halogen lamp with adjustable power of illumination. The first checked parameter was the deviations of points from the least-square fitted line. For both the root mean square and range of results

a tendency can be noticed. These parameters are getting slightly smaller with the increase of illumination. Similar trend was observed in previous research where different types of lamps with different the ability of illumination were compared. Also, considering the number of points the same tendency as from previous research is observed. This trend is approximately linear. Statistical test Kruskal-Wallis showed that for halogen lamp for range of results there is a statistically significant difference amongst the medians at the 95.0% confidence level for different illuminance. Obtained P-value was of 0.002. Whereas for RMS illuminance does not make significant differences (P-value = 0.083). For number of points the power of lamp influences significantly on obtained results. Computed P-value was of 0.015.

The last research concerned the influence of the exposure time on obtained results. Initially the root mean square increases with the increase of exposure time. However for 60 seconds the RMS declines down to the level obtained with the exposure time of 5 s. It could be justified by the fact that higher exposure time provides more points, so the fitted line is burdened with smaller error. Notwithstanding, analyzing the dependence of the exposure time on the number of points we can see that for the longest time, the number of gathered points is also lower. This may be due to certain characteristics of the software used for measurements, not characteristics of triangulation measurements. Kruskal-Wallis test showed that at the 95.0% confidence level exposure time influence significantly on both RMS error and number of points. The P-values for these parameters were of 0.133 and 0.095 respectively.

## 6. CONCLUSIONS

In this paper, the influence of ambient lighting on the results obtained from laser scanning was researched. The measurements were performed with different lightening conditions: darkness - absence of illumination, the glow-tube lamp, the halogen lamp and the mercury lamp. Illumination was controlled using a light meter. Within the halogen lighting different power of lamp was used. Also the influence of the exposure time on results was analysed. Within the glow-tube lamp different times were applied.

Comparison of different types of illumination showed that there is a relation between the obtained results and ambient light. The root mean square error of the fitted line (a single line from the test part was gathered) decreases with the increase of illumination. Additionally, for stronger illumination smaller number of points is gathered. If the number of points in a single line is smaller, also noise appears to be smaller. It was proved statistically that type of illumination influences significantly, at the 95.0% confidence level, on both the RMS error and number of points.

Next tests were performed with the use of a halogen lamp for different power setting. From this research it was observed that the range of results is getting smaller with the increase of illumination. Also, the number of points decreases with increasing of illumination. Statistical test Kruskal-Wallis showed that for halogen lamp for range

of results there is a statistically significant difference amongst the medians at the 95.0% confidence level for different illuminance. Illuminance influences significantly also on number of points. But impact on RMS error is insignificant.

The last test concerned the influence of exposure time on the obtained results. We could observe that both the RMS and the number of points declines for the exposure time of 60 s. This may be due to certain characteristics of the software used for measurements, not characteristics of triangulation measurements. Statistical comparison of results showed that there are significant differences between results obtained with different exposure time.

As factors making significant differences, following observations can be enumerated. Type of illumination influence significantly on RMS error of the measured line and on number of gathered points. Different illuminance of halogen lamp influences on range of results and number of points. Exposure time influences on both RMS error and number of points.

#### REFERENCES

- [1] MARTÍNEZ S., CUESTA E., BARREIRO J., ÁLVAREZ B., *Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control*. W: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2010) 46, 621-629.
- [2] WANG L., DING H., WANG S., *Measurement Error Compensation Using Data Fusion Technique for Laser Scanner on AACMMs*. ICIRA 2010, Part II, LNAI6425, 2010, 576-586.
- [3] SON S., PARK H., LEE K., *Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection*. W: International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002), 889-897.
- [4] ZUSSMAN E., SCHULER G., SELIGER G., *Analysis of the geometrical feature detectability constraints for laser-scanner sensor planning*. W: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 9 (1994), 56-64.
- [5] VUKAŠINOVIĆ N., BRAČUN D., MOŽINA J., DUHOVNIK J., *The influence of incident angle, object colour and distance on CNC laser scanning*. W: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 9 (1994), 56-64.
- [6] LEE K.H., WOO H., SUK T., *Data Reduction Methods for Reverse Engineering*. W: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2001) 17, 735-743.
- [7] [http://www.nikonmetrology.com/en\\_EU/](http://www.nikonmetrology.com/en_EU/).
- [8] ASME B89.4.22-2004 „*Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines*”.



# WSPÓLRZĘDNOŚCIOWE RAMIONA POMIAROWE – RODZAJE, PARAMETRY, ZASTOSOWANIA, TESTY DOKŁADNOŚCI

Eugeniusz RATAJCZYK<sup>1</sup>

## 1. WROWADZENIE

Współrzędnościowe ramiona pomiarowe (Portable Coordinate Measuring Machine's) stanowią obecnie zaawansowany dział techniki pomiarów geometrycznych. Jako urządzenia przenośne, możliwe do zastosowania w otoczeniu produkcji, są w pewnym sensie uzupełnieniem współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Ramiona te pracują na podobnej zasadzie co współrzędnościowe maszyny pomiarowe, bowiem ich istotą jest wyznaczanie współrzędnych punktów mierzonych przedmiotów [8]. Punkty te, poprzez aproksymacje określonymi figurami geometrycznymi, pozwalają na wyznaczanie ich wymiarów, np. średnic otworów, wymiarów walca, elementów stożkowych i innych figur, które składają się na typowe elementy maszynowe.

## 2. BUDOWA I DZIAŁANIE RAMION POMIAROWYCH

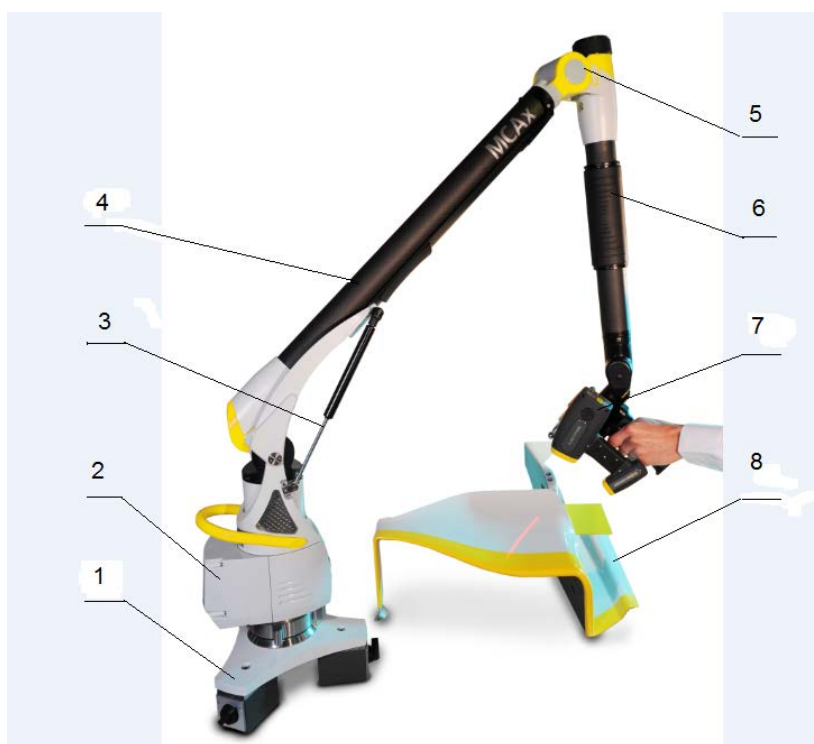
Budowa i działanie ramion pomiarowych opisane zostanie na przykładzie ramienia o symbolu **MCAx** oferowanego przez firmę **Nikon Metrology**. Taka konstrukcja jest w zasadzie podobna dla wszystkich ramion [9,10]. Cechami charakterystycznymi budowy ramion są (rys.1):

- podstawa 1 umożliwiająca mocowanie ramienia do powierzchni stołu lub statywu poprzez łączenie magnetyczne lub śrubowe lub podciśnieniowe, - korpus 2 zapewniający łączność bezprzewodową (Wi-Fi) oraz zasilanie bateryjne (Li-Ion),

---

<sup>1</sup> Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania, 00-792 Warszawa, ul.Olszewska 12. E-mail: [erat33@interia.pl](mailto:erat33@interia.pl)

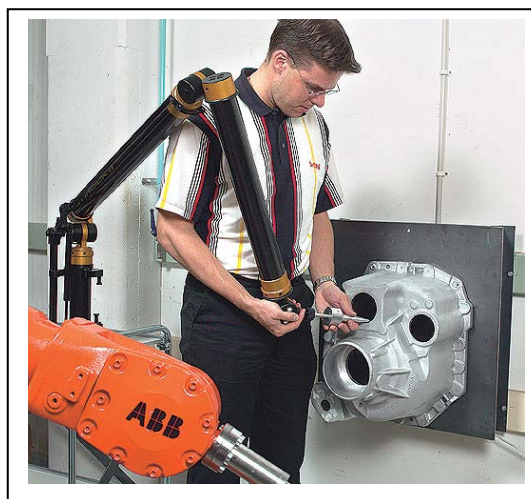
- przeciwwaga 3 o symbolu Zero-G kompensująca masę ramienia i tym samym zwiększająca komfort pracy operatora przy wykonywaniu przemieszczeń kątowych ramienia,
- tuby 4 ramienia wykonane z włókien węglowych zapewniające stosunkowo małą podatność na wpływy temperatury i odznaczające się wysoką sztywnością i małą masą,
- 8 mierzony przedmiot (w tym przypadku mierzony głowicą laserową),
- obrotowy przegub 5 zapewniający płynny obrót ramienia w dwóch płaszczyznach; w poszczególnych przegubach zamontowane są po dwa enkodery kątowe typu inkrementalnego, a w ostatnich konstrukcjach kodowe tzw. absolutne,
- obrotowy uchwyt 6 ułatwiający przemieszczanie ramieniem izolując zarazem ramię od ciepła ręki operatora,
- głowica 7, która może być wyposażona w głowicę stykową lub laserową głowicę skanującą tworząc zintegrowany układ.



Rys.1. Widok współrzędnościowego ramienia pomiarowego MCAx

Po włączeniu ramienia (jest ono trzymane przez operatora np. tak jak przedstawiono to na rys.2) obsługujący ramię musi przejść przez punkty referencyjne

wszystkich osi poprzez obrócenie o odpowiedni kąt każdego z członów. Czynność ta nie występuje w przypadku ramion z enkoderami absolutnymi. Pomiar polega na doprowadzeniu przez operatora do styku końcówki pomiarowej z powierzchnią mierzonego przedmiotu, przy czym decyzję o tym czy styk nastąpił czy nie, podejmuje obsługujący przez zatwierdzenie współrzędnych mierzonego punktu przyciskiem znajdującym się w korpusie głowicy pomiarowej. Pomiar jest więc standardowo przeprowadzany z głowicą sztywną ale stosowana jest też opcja zamocowania głowicy skaningowej, a także w niektórych ramionach głowicy z przetwornikiem dającym sygnał o zaistniałym styku np. głowicy elektrostrykowej TP20 firmy Renishaw [8].



Rys.2. Przykład pomiaru otworu ramieniem pomiarowym

Tak więc po zatwierdzeniu lokalizowanego punktu następuje odczytanie jego współrzędnych i przesłanie do komputera. Mimo, że odczyt ma charakter wartości kątowej, to – poprzez procedury obliczeniowe, współrzędne punktu są transformowane do układu kartezjańskiego  $(x,y,z)$ . Współrzędne punktów stanowią podstawę do wyznaczenia różnorodnych wymiarów przez aproksymacje mierzonego elementu przy pomocy oprogramowania, np. PowerINSPECT.

Na polskim rynku występują ramiona pomiarowe takich firm jak CimCore i Romer, Faro, Zett Mess, Nikon Metrology, a ostatnio pojawiły się ramiona firmy Kreon i Tomelleri Engineering.

W krajowym przemyśle zainstalowanych jest już paręset ramion pomiarowych różnych firm [2,10]. Również na uczelniach technicznych prowadzone są pomiary za pomocą ramion i liczne prace badawcze związane głównie z oceną dokładności pomiarów [4,6,7,11]. Takie prace prowadzone są m.in. na Wydziale Mechatroniki

Politechniki Warszawskiej, w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej, także w licznych zajęciach dydaktycznych. Na przykład autor zauważył istnienie dwóch ćwiczeń laboratoryjnych z ramionami pomiarowymi jedno za pomocą głowic stykowych, drugie za pomocą laserowej głowicy skanującej prowadzone w Instytucie Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej – ćwiczenia bardzo starannie przygotowane pod kątem m.in. zastosowania dla potrzeb inżynierii odwrotnej. Podobne ćwiczenia laboratoryjne prowadzone są w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej.

Natomiast badania naukowe rozwijane są w kraju m.in. przez autora pod kątem dokładności pomiarów za pomocą ramion, porównanie dokładności pomiaru metodami stykowymi i bezstykowymi, badania związane z oceną dokładności ramion głównie metod ich kalibracji wg różnych norm i wytycznych, itp. Niektóre z tych zagadnień zostaną w referacie zaprezentowane.

### 3. DOKŁADNOŚĆ WSPÓLRZĘDNOŚCIOWYCH RAMION POMIAROWYCH

Dotychczas podstawą do oceny dokładności były wymagania sformułowane w amerykańskiej normie ASME B89.4.22-2004 [1] w postaci testów dokładności prezentowanych we wcześniejszych publikacjach [9,11]. Ostatnio, tj. w 2009 roku, pojawiły się wytyczne sprawdzania dokładności ramion opracowane przez stowarzyszenia VDI/VDE w postaci opracowania o symbolu VDI/VDE 2617 Part 9-2009 [12]. Prowadzone są również prace związane z dostosowaniem testów dokładności do wymagań normy ISO 10360-2:2009 [5] stosowanej w odniesieniu do współrzędnościowych maszyn pomiarowych.

#### 3.1. TESTY DOKŁADNOŚCI WG ASME

Dokładność ramion wyznaczana jest na podstawie trzech testów oznaczonych umownie jako A, B i C, a mianowicie:

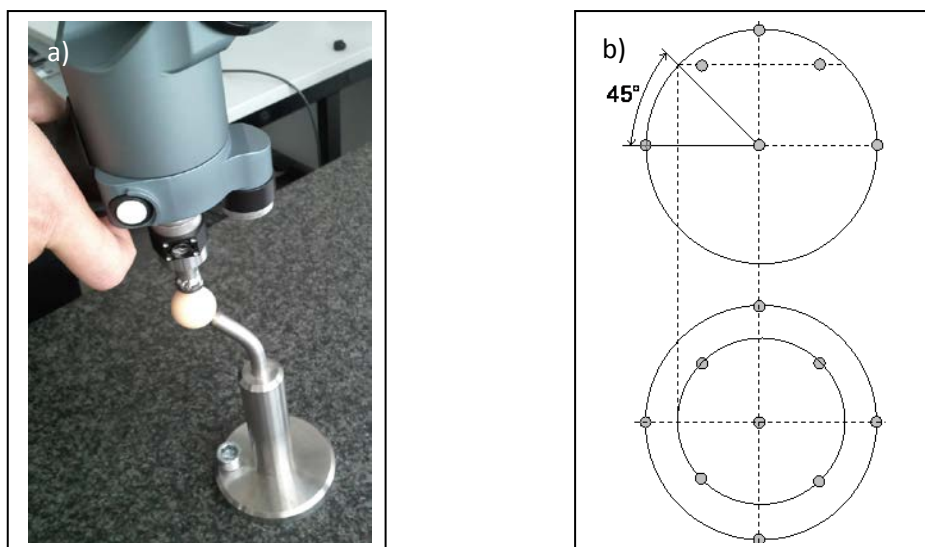
- Test na kuli (Effective Diameter Test) – test A,
- Test pojedynczego punktu (Single Point Articulation Performance Test) – test B,
- Test przestrzenny (Volumetric Performance test)-test C.

**Test A** przeprowadzany jest na kuli wzorcowej o znanej średnicy z przedziału 10-50 mm i o odchyłkach kształtu mniejszych od  $0,5\mu\text{m}$ . Test polega na trzykrotnym pomiarze kuli, która powinna być zamocowana sztywno do podłoża w przybliżeniu w środku zasięgu ramienia (rys. 3a). Podczas tego testu obrót poszczególnych przegubów ramienia powinien być zminimalizowany.

Celem tego testu jest dokonanie oceny dokładności zainstalowanej w ramieniu głowicy pomiarowej. Jeśli jest to głowica bez przetwornika tzw. sztywna, to wpływ na dokładność tego testu ma operator m.in. ze względu na zmienne naciski pomiarowe.

Test polega na pomiarze kuli wzorcowej w dziewięciu punktach rozłożonych tak jak to ilustruje rys 3b, tj.

- jeden punkt na biegunie kuli (określonym przez kierunek wyznaczony przez oś trzpienia końcówki pomiarowej);
- cztery punkty (równo od siebie oddalone) na równiku kuli;
- cztery punkty (równo od siebie oddalone)  $45^\circ$  poniżej bieguna kuli i obróconych  $45^\circ$  w stosunku do poprzedniej grupy punktów.



Rys. 3. Schemat testu A na kuli: a) widok fragmentu pomiaru, b) schemat rozłożenia punktów pomiarowych

Na podstawie wartości dziewięciu punktów uzyskanych z pomiaru, program pozwala wyliczyć średnicę kuli co daje podstawy do wyznaczenia maksymalnej odchyłki  $\Delta_{max}$  jako różnicy między średnicą wyznaczoną z pomiaru  $D_{zm}$  a średnicą kuli wzorcowej  $D_{kw}$  podanej w jej atescie  $\Delta_{max} = D_{zm} - D_{kw}$ . Przy czym cykl pomiarowy obejmuje trzy serie.

Otrzymana wartość maksymalnej odchyłki porównywana jest z wartością podaną przez producenta badanego ramienia pomiarowego. Jest oczywiste, że test jest spełniony, jeśli otrzymana wartość nie przekracza wartości podanej przez producenta dla danego ramienia pomiarowego. W przypadku przekroczenia przez odchyłkę wartości dopuszczalnych, zaleca się powtórzenie całego testu, natomiast, gdy po trzykrotnym powtórzeniu testu odchyłka nadal przekracza wartość dopuszczalną dalsze testy należy przerwać a następnie określić i usunąć przyczynę usterki.

**Test B pojedynczego punktu** jest testem mającym na celu potwierdzenie zdolności ramienia do uzyskiwania zbliżonych współrzędnych dla pomiaru tego

samego punktu w przestrzeni przy różnych ustawieniach kątowych poszczególnych przegubów ramienia.

Test ma na celu ustalenie rozrzutu współrzędnych punktu pomiarowego (powtarzalności punktu) poprzez pomiary na stożku wewnętrznym w przypadku głowicy sztywnej lub na kuli wzorcowej w przypadku głowicy impulsowej dochodząc do styku z nimi końcówką kulistą głowicy pomiarowej z różnych kierunków. Należy dziesięciokrotnie zmierzyć położenie elementu wzorcowego w przestrzeni pomiarowej ramienia. W teście tym istotne jest kompleksowe zbadanie, jaki wpływ na wyniki pomiarów ma obracanie poszczególnymi przegubami ramienia. Pomiar odbywa się w trzech miejscach w zakresie pomiarowym tj. w odległości stanowiącej do 20% długości ramienia (blisko punktu zerowego), drugie położenie w odległości 20-80%, oraz powyżej 80% długości ramienia. Dzięki tak przyjętym pozycjom enkodery umieszczone w przegubach pracują w większym zakresie kątowym, przypominającym rzeczywistą pracę urządzenia i tym samym pomiar staje się bardziej wiarygodny. Wynikiem testu są następujące parametry:

a) maksymalna odchyłka położenia  $\delta_{max}$  (parametr główny) wyznaczona z dziesięciu wartości policzonych ze wzoru:

$$\delta_i = \sqrt{(X_i - X_a)^2 + (Y_i - Y_a)^2 + (Z_i - Z_a)^2} \quad (1)$$

W każdym z trzech położen wykonuje się dziesięć pomiarów położenia środka czy to kulki trzpienia pomiarowego w otworze stożkowym czy to środka kuli mierzonego głowicą pomiarową.

gdzie:  $X_i, Y_i, Z_i$  – współrzędne punktu zmierzonego,

$X_a, Y_a, Z_a$  – uśrednione współrzędne punktu.

b) podwójna wartość odchylenia standardowego  $2s$  wyliczonego z dziesięciu pomiarów ( $n=10$ ) zgodnie ze wzorem:

$$2s = 2 \sqrt{\frac{\sum \sigma_i^2}{(n-1)}} \quad (2)$$

W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnych powinno się powtórzyć trzykrotnie cały test, jeśli jednak wartości wyznaczonych parametrów będą nadal przekraczać wartości dopuszczalne, dalsze testy należy przerwać oraz ustalić przyczynę tego przekroczenia i podjąć starania o jej usunięcie.

**Test C**, mający charakter **testu przestrzennego**, polega na pomiarze wzorca w postaci liniału, który zawiera dwie wzorcowe długości jedną mniejszą stanowiącą 50÷75 % długości ramienia oraz drugą większą stanowiącą 120÷150 % długości wyznaczone przez dwa otwory stożkowe rozmieszczone na liniale lub wzorcu stopniowym (rys.4), z którego można wybrać do pomiaru dwie długości wzorcowe.

Test polega na pomiarze dwóch atestowanych odległości wzorca w 20 określonych położeniach w przestrzeni pomiarowej ramienia obejmujące cztery położenia pionowe, dziesięć położen poziomych i dziesięć ustawień wzorca pod kątem.

Test ten jest najbardziej reprezentatywnym sprawdzianem dokładności ramienia pomiarowego informującym jak dokładnie można danym ramieniem wykonywać pomiary.

Test C pozwala wyznaczyć, w wyniku pomiaru 20 wartości długości wzorca  $L_i$ , następujące parametry charakteryzujące dokładność ramienia pomiarowego:

- jako parametr główny maksymalną odchyłkę  $D_{max}$  ze zbioru odchyłek  $D_i$ , gdzie:  $D_i$  jest różnicą między długością wzorca  $L_i$  otrzymaną z pomiarów, a wartością atestowaną wzorca  $L_{wz}$  ( $D_i = L_i - L_{wz}$ ),
- rozstęp  $R_D$  wartości  $D_i$ ,  $R_D = D_{max} - D_{min}$ ,
- podwójną wartość odchylenia średniego kwadratowego oznaczonego jako  $2RMS$  wyznaczonego dla  $n=20$  ze wzoru:

$$2RMS = 2\sqrt{\sum D_i^2 / n} \quad (3)$$

### 3.2. TESTY DOKŁADNOŚCI WG VDI/VDE

Wytyczne VDI/VDE [12] do sprawdzania dokładności współrzędnościowych ramion pomiarowych metodą stykową proponują następujące dwa testy:

- a) Test na kuli w celu wyznaczenia błędu głowicy pomiarowej,
- b) Test błędu wskazania w celu wyznaczenia błędu pomiaru długości.

**W teście na kuli** stosowany jest wzorzec w postaci kuli o średnicy nominalnej z przedziału od 10 do 50mm o atestowanym wymiarze średnicy, przy czym odchyłka kształtu powinna być mniejsza od 20% błędu dopuszczalnego kształtu  $MPE_{pp}$ . Kula wzorcowa powinna być zamocowana w trzech różnych pozycjach w zakresie pomiarowym ramienia. Do oceny dokładności głowicy pomiarowej, służą trzy następujące parametry:

- 1) Błąd głowicy pomiarowej związanej z położeniem **PL**,
- 2) Błąd głowicy pomiarowej związanej z wymiarem **PS**,
- 3) Błąd głowicy pomiarowej związanej z kształtem **PF**.

**Test błędu wskazania w celu wyznaczenia błędu pomiaru długości** polega na porównaniu długości zmierzonej z długością wzorcową podaną w świadectwie wzorcowania.

Do przeprowadzenia testu zaleca się używać takich wzorców długości jak: stos płytek wzorcowych, wzorzec stopniowy, wzorca z otworami stożkowymi, wzorzec w postaci pręta kulowego, wzorzec z kulami.

Wzorce powinny mieć przynajmniej 5 odległości wzorcowych w jednej linii pomiarowej. Długości wzorcowe powinny być wykalibrowane.

Test długości obejmuje dwa następujące rodzaje sprawdzeń:

1. Test błędu wskazania przy pomiarze długości w całym zakresie pomiarowym,
2. Test błędu wskazania przy pomiarze długości w części zakresu pomiarowego.

Należy zmierzyć co najmniej pięć wzorcowych odległości wzorca długości. Przy każdym położeniu wzorca należy zmierzyć go trzykrotnie. Maksymalna liczba odległości pomiarowych wszystkich linii pomiarowych powinna być nie mniejsza niż 135.

#### 4. WYNIK BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Badania przeprowadzono na ramieniu pomiarowym Nikon MCAII, które charakteryzuje się następującymi głównymi wartościami parametrów:

- zakres pomiarowy 2,4m,
- wartość błędu dopuszczalnego wg testu B  $\pm 28\mu\text{m}$ ,
- wartość błędu dopuszczalnego wg testu przestrzennego (test C)  $\pm 40\mu\text{m}$ ,
- masa 8,3kg.

Badania eksperymentalne, mające na celu ocenę i porównanie testów dokładności wg wymienionych dwóch procedur, tj. wg ASME i VDI/VDE, zostały przeprowadzone w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej przez M. Puławskiego pod kierunkiem autora [6]. W pomiarach zastosowano oprogramowanie podstawowe PowerINSPECT, a do kwalifikacji trzpienia pomiarowego i tzw. zerowania enkoderów kątowych oprogramowanie WinRDS.

W badaniach głowicy pomiarowej zastosowano kulę wzorcową o atestowanym wymiarze 24,9874mm i odchyłce kształtu wynoszącej  $0,03\mu\text{m}$ . Przy zastosowaniu oprogramowania PowerINSPECT wykonano dziesięć serii pomiarowych w każdej mierząc średnicę kuli trzykrotnie.

W przypadku testu A, tj. testu wg ASME uzyskano z wymienionych dziesięciu serii pomiarowych odchyłkę maksymalną od wymiaru nominalnego wynoszącą  $\Delta_{max} = -32,8\mu\text{m}$ , przy rozstępie wyników wynoszącym  $13,6\mu\text{m}$  i przy średnim kwadratowym odchyleniu wyników wynoszącym  $\pm 5,1\mu\text{m}$ .

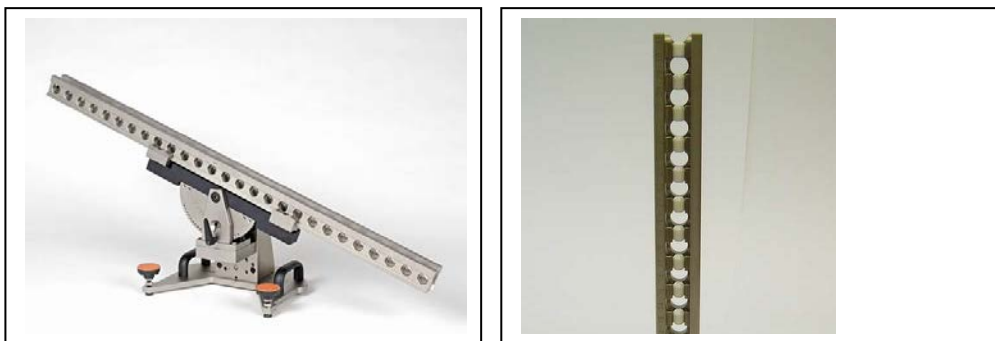
W przypadku podobnego testu na kuli wg VDI/VDE badania przeprowadzono dla trzech rodzajów błędów głowicy tj. PL, PF i PS na trzech wysokościach usytuowania kuli tj. -20%, 0 i 50% wysokości względem długości ramienia pomiarowego (rys.4). Łącznie uzyskano 90 wartości. Dla celów porównawczych przyjęto dane z testu PS, tj. testu związanego z błędem wymiaru głowicy. Uzyskano odchyłki maksymalne  $\Delta_{max}$  od wymiaru nominalnego dla położenia -20% zawierające się w przedziale od  $-15,1\mu\text{m}$  do  $30,6\mu\text{m}$  (rozstęp  $45,7\mu\text{m}$ ) i średnie kwadratowe odchylenie  $14,9\mu\text{m}$ , odpowiednio dla pozostałych położenia: 0% od  $5,2\mu\text{m}$  do  $25,2\mu\text{m}$  (rozstęp  $20\mu\text{m}$ ); 50% od  $-15,3\mu\text{m}$  do  $0,1\mu\text{m}$  (rozstęp  $15,2\mu\text{m}$ ).

Wyniki wskazują, że dla wszystkich trzech ustawień kuli wzorcowej wyniki w postaci odchyłek są mniejsze przy zastosowaniu testu VDI/VDE. Natomiast większa jest wartość rozstępu i średniego kwadratowego odchylenia wynoszącego  $14,9\mu\text{m}$ .



W celu stwierdzenia czy istnieje statystyczna różnica obu testów, po sprawdzeniu charakteru rozkładu wyników przeprowadzono test polegający na porównaniu odchyłek standardowych, następnie test Wilcozona oraz test K-S2) [3]. Wszystkie te testy dały podstawy do stwierdzenia, że statystycznie istnieją istotne różnice między procedurami badania głowicy wg ASME i wg VDI/VDE. Wartości odchyłek są mniejsze w przypadku testu wg VDI/VDE, jednak zarówno rozstęp jak i średnie kwadratowe odchylenia są większe. Należy przypuszczać, chociaż autor nie jest pewien w 100%, że złożony charakter testu wg VDI/VDE w stosunku do ASME ma pośrednio uwzględnić wymogi testu B, zwłaszcza po uwzględnieniu dalszych rodzajów testu tj PL,PF który to test istnieje w normie ASME, a nie występuje w wytycznych VDI/VDE.

Badania wg testu C (testu przestrzennego długości) przeprowadzono wg ASME z zastosowaniem wzorca stopniowego (rys.4) wybierając dwie wzorcowe długości wynoszące 399,98627 i 640,03836mm (wzorzec o nr SE 0700112 atestowany przez DKD-K-05201). Przy zastosowaniu oprogramowania PowerINSPECT wykonano dziesięć serii pomiarowych wzorca, z których każda zawierała 20 położenia wg wymagań normy ASME. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono dla każdej serii odchyłkę maksymalną  $D_{max}$  oraz rozstęp  $R_D$  i podwójne odchylenie średnie kwadratowe 2RMS. Obliczone wartości odchyłki od wymiaru nominalnego zawierają się w granicach od  $-20,89\mu m$  do  $+20,38\mu m$  w zależności od położenia wzorca, tj. jednego z dwudziestu położenia, przy średnim podwójnym kwadratowym odchyleniu 2RMS zawierającym się w przedziale od  $\pm 12,88$ , do  $\pm 26,87\mu m$ , i rozstępie  $R_D$  w przedziale od 51,28 do 78,45  $\mu m$ .



Rys.4. Widok wzorca stopniowego firmy Kolb&Baumann

W przypadku badań wg wytycznych VDI/VDE zastosowano ten sam wzorzec stopniowy co w pomiarach wykonanych wg ASME przyjmując pięć atestowanych długości wzorcowych o wymiarach 120,06307, 2000,0417, 399,9863, 519,97236 i 640,03836mm ustawiając wzorzec w siedmiu położeniach. Obliczone średnie wartości odchyłek od wymiarów wzorca (wyznaczone z serii dziesięciu pomiarów)

wynoszą dla siedmiu kolejnych położenia wzorca odpowiednio 12,85, 10,67, 8,27, 2,50, 0,82, 6,94 i 3,61  $\mu\text{m}$ , przy średnim kwadratowym odchyleniu zawierającym się w przedziale od  $\pm 13,64$  do  $\pm 17,25$   $\mu\text{m}$  i rozstępie w przedziale od 64,16 do 76,1  $\mu\text{m}$ .

Zarówno wg testu ASME jak i VDI/VDE uzyskane wartości maksymalnych odchyłek mieszczą się w dopuszczalnym błędzie ramienia MCAII wynoszącym  $\pm 40\mu\text{m}$ .

Po sprawdzeniu charakteru rozkładu wyników przeprowadzono porównania stosując odpowiednie testy statystyczne – porównano średnie wartości wyników, wartości odchyłek standardowych, mediany i przeprowadzono porównanie wyników wg testu Kolmogorova-Smirnova (K-S2) korzystając z oprogramowania Statgraphics Plus [3]. Trzy spośród wymienionych testów wykazały, że występują istotne statystyczne różnice, a jeden test (test z porównania odchyłek standardowych), że występujące różnice są nieistotne. Natomiast test z porównania odchyłek średnich kwadratowych nie wykazał wystąpienia istotnych różnic między obu metodami wyznaczania błędów pomiaru długości, należy jednak wziąć pod uwagę, że porównuje on jedynie odchylenia standardowe, które charakteryzują rozrzut wyników obu populacji danych a nie wartości średnie czy mediany, które wyraźnie się różnią. Dlatego też można stwierdzić, że między obu testami tj. ASME i VDI/VDI występują istotne różnice i nie powinno się tych testów stosować zamiennie jako równoważnych.

Badania dały podstawy do szeregu spostrzeżeń poniekąd oczywistych przydatnych w dalszych eksperymentach, a mianowicie by podczas wykonywania pomiarów element pomiarowy znajdował się blisko punktu zamocowania ramienia pomiarowego, tj. jak najbliżej enkoderów, najlepiej jeśli to możliwe, w środku zakresu pomiarowego ramienia. W przypadku stosowania głowicy sztywnej tj. bez przetwornika zauważalny jest wpływ operatora, ze względu na nie stabilne naciski pomiarowe i różne prędkości dochodzenia do styku. Tym samym wskazane jest by kalibrację ramienia przeprowadzał doświadczony operator zachowując stabilność czynności pomiarowych. Dalszym ważnym czynnikiem jest utrzymanie gradientu temperatury na odpowiednim poziomie, tj. o możliwie małym rozrzucie jej wartości w czasie pomiarów. Także ważnym czynnikiem jest, by pomiary wykonywać przy zamocowanym ramieniu na tym samym stole co zamocowany mierzony przedmiot.

#### LITERATURA

- [1] ASME B89.4.22-2004. *Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines*. An American National Standard.
- [2] CZARNECKI H., OLSZEWSKI D., *Wykorzystywanie możliwości współrzędnościowego ramienia pomiarowego w nadzorowaniu dokładności produkcji w warunkach zakładu przemysłu motoryzacyjnego*. Wybrane problemy współrzędnościowej techniki pomiarowej pod redakcją J. Śladka, ATH Bielsko-Biała 2012, 182-191.

- [3] DOBOSZ M., *Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [4] OSTROWSKA K., *Metody oceny dokładności pomiarów realizowanych przy zastosowaniu współrzędnościowych ramion pomiarowych*. Praca doktorska. Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, 2010.
- [5] PN-EN ISO 10360-2:2009. *Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Cz.2 stosowane do pomiaru wymiarów*.
- [6] PUŁAWSKI M., *Projekt procedury kalibracji ramienia pomiarowego i jej weryfikacja doświadczalna*. Praca dyplomowa magisterska. Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2011.
- [7] RAK M., RATAJCZYK E., KOWALUK T., *Badania porównawcze pomiarów wykonywanych za pomocą współrzędnościowego ramienia pomiarowego wyposażonego w głowicę sztywną i impulsową*. W: *Pomiary Automatyka Kontrola (PAK)*, vol.59, nr 5/2013, 456-458.
- [8] RATAJCZYK E., *Współrzędnościowa technika pomiarowa*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [9] RATAJCZYK E., *Ramiona pomiarowe*. W: *Mechanik* nr 12/2008, 1051-1054; nr 1/2009, 38-46; nr 2/2009 104-107.
- [10] RATAJCZYK E., *Pomiary współrzędnościowe w technikach wytwarzania za pomocą ramion pomiarowych*. W: *Przegląd Mechaniczny* nr 9/2007 Supplement, 157-166.
- [11] SŁADEK J. OSTROWSKA K., GACEK K., BRYNDZA M., *Designation of Measuring Arm, Advances in Coordinate Metrology*. Monograph edited by J. Sładek and W. Jakubiec, University of Bielsko-Biała 2010.
- [12] VDI/VDE 2617-9:2009. *Accuracy Of Coordinate Measuring Machines. Characteristics And Their Reverification – Acceptance And Reverification Tests For Articulated Arm Coordinate Measuring Machines*.

# KONTROLA POPRAWNOŚCI KALIBRACJI CIEKŁOKRYSTALICZNYCH MATRYC TERMOCHROMOWYCH DO OBRAZOWANIA MEDYCZNEGO

Jacek REINER<sup>1</sup>, Mariusz MRZYGLÓD<sup>1</sup>, Janusz ZMYWACZYK<sup>2</sup>,  
Marcin TRZYNA<sup>3</sup>, Henryk JAREMEK<sup>3</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Ciekle kryształy, których zdolność filtracji światła zależy od temperatury, co powoduje „zmianę ich barwy”, są znane od wielu lat [2, 3, 11]. Znajdują one zastosowanie do obrazowania pól temperaturowych obiektów technicznych [18], przepływów i naprężeń [9], jak i w diagnostyce medycznej [16]. W medycynie, poszukuje się możliwości różnicowania ujawnionych anomalii termicznych wynikających z procesów patofizjologicznych. Bowiem, patologie rozrostowe (o charakterze neoplastycznym) cechuje znacząca przewaga procesów anabolicznych powiązanych z intensywną neoangiogenezą [7], co jest skojarzone z pojawieniem się zmian w termogramie o cechach ognisk hipertermicznych. W przypadku nowotworów piersi zmiany takie obserwowane były dotychczas za pomocą wysokiej rozdzielczości kamer termowizyjnych [6, 13, 14, 21, 22, 23]. Jednak obrazowanie takich zmian z użyciem ciekłokrystalicznych matryc termochromowych, charakteryzuje się korzystniejszym procesem termodynamicznym [24]. Ponadto, matryce takie byłyby dostępne od kamer termowizyjnych, odpowiadając na istotny problem diagnostyczny chorób XXI wieku, a w szczególności raka piersi u kobiet.

Matryce ciekłokrystaliczne (TLC) wytwarzane są metodami mikrokapsułkowania, albo na drodze równoczesnego nakładania mikrowarstw tzw. metoda CLCF (Continuous Liquid Crystals Film). Obie technologie podatne są na zakłócenia, których skutki są tym większe im zakres pomiarowy matrycy jest węższy (tzw.

---

<sup>1</sup> Politechnika Wroclawska

<sup>2</sup> Wojskowa Akademia Techniczna

<sup>3</sup> Braster S.A.

matryce wąskotemperaturowe z zakresem poniżej 5<sup>0</sup>C). Stąd niezwykle istotny jest problem kontroli poprawności kalibracji wytworzonej matrycy, czyli wyznaczenie zależności między wejściem układu (temperatura), a wyjściem (chrominancja). Wielu autorów podejmowało ten temat, wskazując na problemy wynikające z wpływu źródła pobudzenia temperaturowego i kierunku zmiany ogrzewanie/chłodzenie (histereza) [10], rodzaju użytego oświetlenia (jego charakterystyki spektralnej) [5], kierunku oświetlenia i kierunku obserwacji [4, 8, 12], podnosząc problem niepewności pomiarowej i interpretacyjnej takiego przetwarzania. Jednak w przypadku diagnostyki medycznej zmian nowotworowych piersi, nie jest istotny pomiar temperatury, lecz detekcja gradientów pola temperaturowego.

W artykule przedstawiono stanowisko do przemysłowej kontroli poprawności kalibracji matryc TLC do celów diagnostyki medycznej. Opracowane stanowisko składa się ze stolika grzejnego oraz układu akwizycji obrazów wraz z procesem korekcji, transformacji i wizualizacji wyników. Przedstawiono sposób inspekcji odpowiedzi barwowej matrycy względem kalibracji referencyjnej, ukazując przykładowe błędy dotyczące zakresu temperaturowego oraz parametrów kolorymetrycznych.

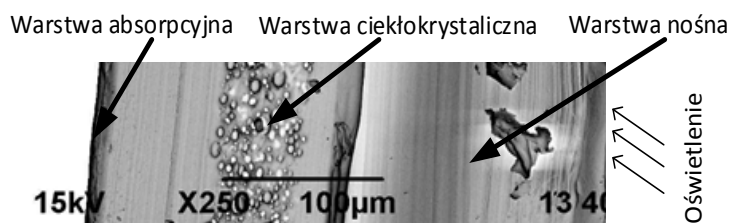
## 2. MATRYCA CIEKŁOKRYSTALICZNA

### 2.1 BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA

W zależności od przeznaczenia i projektowanego zakresu termicznej detekcji matryc TLC dobiera się odpowiednią kompozycję związków ciekłokrystalicznych. Przykładowo, aby uzyskać odpowiedź barwną w zakresie temperatur 31 - 36°C można zastosować mieszaninę pelargonianu cholesterolu i oleinowęglanu cholesterolu. Modyfikując składy mieszanin ciekłokrystalicznych można wpływać na kształt zależności temperaturowo-barwowej. W metodzie CLCF, odpowiednio spreparowana mieszanina związków ciekłokrystalicznych [19, 20] jest hermetyzowana poprzez zdyspergowanie w materiale błonotwórczym i w tej postaci наносzona jest na nośnik poliestrowy. Matryce ciekłokrystaliczne wytworzone tą metodą składają się z kilku warstw, z których najważniejsze to: poliestrowa warstwa podkładowa, warstwa termooptyczna, absorpcyjna i warstwy zabezpieczające, co przedstawiono na rys.1.

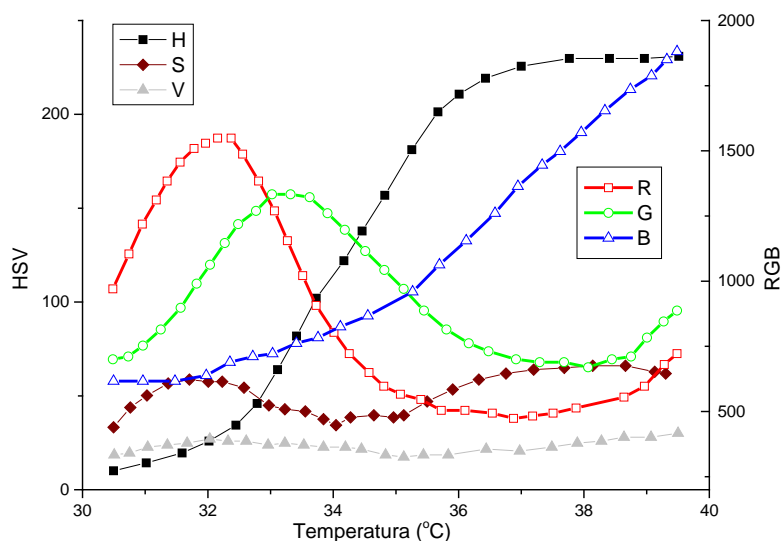
Przykładając matrycę TLC do termografowanej powierzchni, o temperaturze odpowiadającej zakresowi responsywności termicznej matrycy, już po kilku sekundach pojawia się barwny obraz pola temperaturowego. Zjawisko to wynika z aktywności optycznej tj. selektywnego odbicia światła w związkach ciekłokrystalicznych. Bowiemy fazy termochromowe ciekłych kryształów tworzą struktury warstwowe, w których molekuly w ramach warstwy przyjmują jednakowy wersor kierunkowy. Wersor ten, dla każdej kolejnej warstwy, zmienia kierunek o jednakową wartość, która jest uzależniona od temperatury. Dlatego, wraz ze wzrostem temperatury zmniejsza się skok helisy, który wyznacza zdolność

selektywnego odbicia światła. Gdy matrycę TLC oświetlimy światłem polichromatycznym (białym), to określona długość fali zostanie selektywnie odbita, pozostała zaś pochłonięta w warstwie absorpcyjnej. Tak więc, wraz ze wzrostem temperatury na matrycy pojawiać się będą kolejno, barwa czerwona, zielona, a na końcu niebieska.



Rys. 1. Widok przekroju matrycy TLC

Na rys. 2 przedstawiono zależność między barwą, reprezentowaną w przestrzeni HSV lub RGB a temperaturą.



Rys. 2. Krzywe kalibracyjne matrycy TLC, a) przestrzeń RGB, b) przestrzeń HSV

Dążąc do redukcji wymiarowości przestrzeni barw (RGB) stosuje się jedynie Hue (barwa) z przestrzeni HSV. W ten sposób zaniedbywane są składowe Saturation (nasycenia) oraz Value (jasności). Najistotniejszym ograniczeniem takiej redukcji wymiarowości chrominancji jest jednak nieliniowość przekształcenia oraz wzrost błędu konwersji w funkcji redukcji jasności i nasycenia [5]. Ponadto, konwersja

z przestrzeni RGB nie jest jednoznacznie zdefiniowana. Najczęściej użycie znajduje tu poniższa proporcjonalność:

$$\tan(Hue) \equiv \frac{\sqrt{3}(G-B)}{2R-G-B} \quad (1)$$

Na przebieg zależności między temperaturą, a chrominancją ma wpływ szereg czynników, wśród których za najważniejsze uznaje się: grubość warstwy ciekłokrystalicznej: im grubość warstwy LC większa, tym intensywność wyższa [1], udziały wagowe, sposób przygotowania emulsji, rozdrobnienie cząstek cholesterolu, etc. Wytwarzane matryce mogą różnić się zatem, temperaturą i zakresem konwersji, parametrami kolorymetrycznymi (np. jasność i nasycenie), parametrami termodynamicznymi oraz powtarzalnością i odtwarzalnością konwersji. Stąd zapewnienie jakości wytwarzania ciekłokrystalicznych matryc termochromowych wymaga procedur i narzędzi kontroli poprawności ich kalibracji.

### 3. WYZNACZANIE KRZYWEJ KALIBRACYJNEJ

#### 3.1 METODA KALIBRACJI

Zapewnienie pełnej zgodności warunków pobudzenia i obserwacji (metodą in-situ) nie jest możliwe ze względu na medyczny charakter sensora. Stąd układ pobudzenia termicznego zastępowany jest stabilizowanym stolikiem grzejnym, zaś obserwacja wizualna, poprzez obrazowanie z użyciem kamery. Prawidłowe wyznaczenie parametrów kolorymetrycznych wymaga w takim przypadku uwzględnienia charakterystyk spektralnych detektora i oświetlacza oraz charakterystyk kierunkowych. Znane są dwie metody kalibracyjne: stanu ustalonego i metoda dynamiczna. W przypadku metody stanu ustalonego wyróżnia się ponadto, metodę równomiernej temperatury oraz metodę gradientu temperaturowego [1].

#### 3.2 POBUDZENIE TERMICZNE

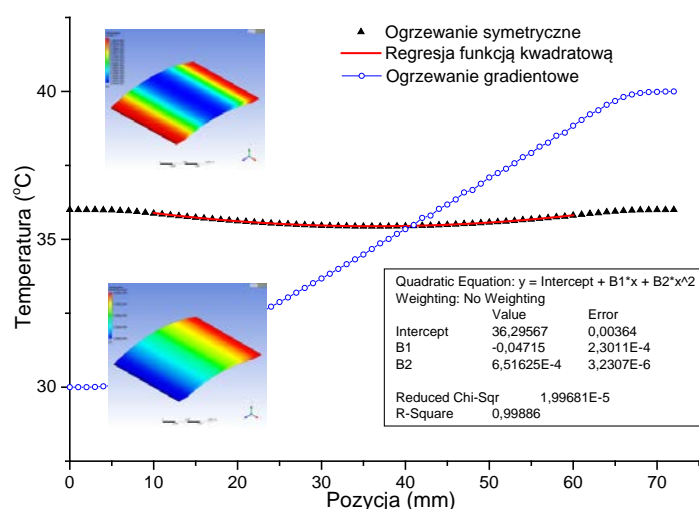
Postawiono następujące wymagania względem projektowanego stolika grzejnego:

- pole robocze umożliwiające badanie matryc o szerokości 120mm i długości minimalnej 200mm (typu wstęga),
- możliwość zadawania gradientowych rozkładów temperatury,
- stabilizacja temperatury  $\Delta T < 0,01^{\circ}\text{C}$ ,
- szybkość stabilizacji temperatury  $T_{\text{stab}} < 100\text{sec}$ ,
- równomierny termiczny opór kontaktowy powierzchni.

Dla realizacji powyższych wymagań zaproponowano blok z materiału dobrze przewodzącego ciepło (aluminium  $\lambda(T=25^{\circ}\text{C}) = 237(\text{W/m/K})$ ), ogrzewany z dwóch przeciwległych stron za pomocą ogniw Peltiera. Dla stabilizacji temperaturowej

zastosowano dwa regulatory TEC PID sterujące elementy wykonawcze sygnałem PWM, z sprzężeniem zwrotnym od czujników termo-rezystancyjnych. Dla osiągnięcia wysokiej dynamiki układu użyto dwóch zestawów ogniw Peltiera o mocy 7x17W, jednocześnie odprowadzając nadwyżki energii cieplnej za pomocą wodnego układu chłodzącego.

Analizując transfer ciepła od stolika grzewczego do izolatora (matryca) zwrócono uwagę na opór warstwy kontaktowej, który zależy od siły docisku międzywarstwami, chropowatości powierzchni oraz materiału pośredniczącego. Dla minimalizacji jego wpływu oraz zapewnienia jednorodności, powierzchnię stolika grzejnego ukształtowano jako wypukłą, co ułatwi napinanie na niej matrycy. Ponadto, poprzez polerowanie powierzchni zmniejszono jej chropowatość osiągając  $S_a < 20\mu\text{m}$ . Zauważono również, że przyłożona matryca TLC wprowadzi znacznie większy udział radiacji powierzchni, bowiem powierzchnia szlifowanego aluminium charakteryzuje się małym współczynnikiem emisyjności ( $\epsilon \sim 0,06$ ), w przeciwieństwie do czarnej warstwy absorpcyjnej matrycy TLC



Rys. 3. Modele symulacyjne stolika grzejnego przy ogrzewaniu gradientowym i symetrycznym wraz z funkcją regresji

Jak przedstawiono na profilach temperaturowych stolika grzejnego w modelu symulacyjnym (rys. 3), rozkład temperatury między elementami grzejnymi nie jest liniowy, co jest wynikiem odprowadzania ciepła do otoczenia. Wartość spadku temperaturowego jest zależna od temperatury zadanej i temperatury otoczenia. Dla jego wyznaczenia wprowadzono wielopunktowy pomiar temperatury, na podstawie którego wyznaczono model regresyjny nieliniowy (funkcja kwadratowa) uzyskując



dopasowanie  $r^2 > 0,999$ .

Przeprowadzono również badania dynamiczne układu, wyznaczając czas osiągnięcia stanu ustalonego. Powierzchnia stolika osiąga zadaną temperaturę, z uchybem poniżej 1% po czasie 100sek.

Przed kalibracją temperatury stolika dokonano analizy budżetu niepewności. Problem ten jest fundamentalnym zagadnieniem kalibracji, stąd jest szeroko omawiany w literaturze [1, 5, 8, 15]. Jednak jak zaznaczono na wstępie, badana matryca nie pełni funkcji metrologicznej, lecz inspekcyjną, stąd wymagania względem dokładności temperatury określono na  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2 AKWIZYCJA OBRAZÓW I POMIAR TEMPERATURY

Dla modułu akwizycji obrazów postawiono następujące wymagania:

- obrazowanie RGB powierzchni matrycy TLC,
- pole widzenia (FOV): długość min 120mm, szerokość min. 10mm w części środkowej stolika,
- rozdzielczość przestrzenna min.  $0,1\text{mm}/\text{pix.}$ , rozdzielczości dynamiczna min. 14bit
- minimalizacja dystorsji i aberracji
- minimalizacja wpływu prądu ciemnego przetwornika kamery oraz
- oświetlenie światłem polichromatycznym (białym) o  $\text{CRI} > 80$ .

Zwrócono uwagę na ograniczenia projektowe wynikające z silnej połyskliwości powierzchni matrycy oraz wypukłości stolika, która powoduje zmienność kątów obserwacji i oświetlenia, czego skutkiem jest zmiana odpowiedzi barwnej. Ponadto, użyty oświetlacz nie może rozgrzewać powierzchni matrycy, również czas badania powinien być minimalizowany do kilku minut, aby nie następowało fałszowanie wyników pomiaru.

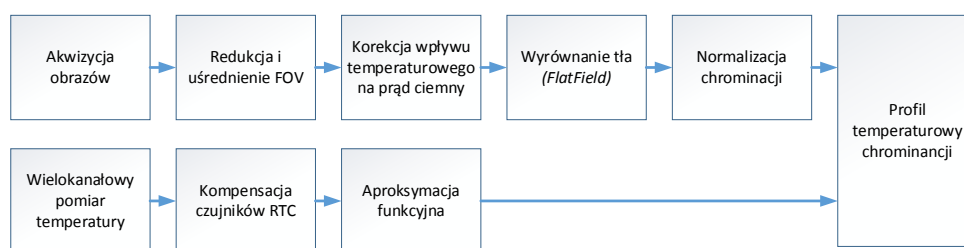
Do weryfikacji i optymalizacji układu oświetleniowego wraz z akwizycją obrazów opracowano model symulacyjny propagacji światła [17], bazujący na dwóch szeregach diod LED

Dla osiągnięcia wysokiej czułości oraz minimalizacji szumów wybrano kamerę CMOS o wielkości matrycy  $1''$  i wielkości piksela  $5,5\mu\text{m}$ . Dla kamery wyznaczono zależność prądu ciemnego od temperatury, która została użyta w procesie kompensacji. Wyznaczono również dystorsje oraz aberracje dobranej obiektywu, stwierdzając, że ich udział w budżecie błędów jest zanedbywalny.

Współbieżnie z akwizycją obrazów realizowany jest wielokanałowy pomiar temperatury stolika grzejnego oraz odczyt temperatury sensora kamery i temperatury otoczenia, które również podlegają przetwarzaniu, co pokazano na rys. 4.

Obraz z kamery zostaje zredukowany poprzez pozostawienie części środkowej o wysokości 100 pikseli, a następnie przekształcony do profili RGB poprzez uśrednienie intensywności w poszczególnych kolumnach i kanałach. Następnie, korygowany jest wpływ temperatury na wartość prądu ciemnego przetwornika, na

podstawie eksperymentalnie wyznaczonej zależności. Dalej, korygowany jest wpływ wypukłości stolika grzejnego oraz nierównomierności oświetlenia. Jest on prowadzony na podstawie profilu referencyjnego kierunkowości rozpraszania folii i niejednorodności oświetlenia, zarejestrowanego dla pobudzenia poza zakresem responsywności matrycy. Ostatnim krokiem jest normalizacja, której potrzeba wynika ze zmiennego natężenia źródła światła.



Rys. 4. Algorytm kompensacji i wyznaczenia profilu temperaturowego chrominacji

Współbieżnie z przetwarzaniem obrazów prowadzona jest korekcja profilu temperaturowego dla 12 pkt pomiarowych. Na podstawie zarejestrowanych wartości temperatur wyznaczone są współczynniki aproksymacji funkcją kwadratową i oceniana jest jakość jej dopasowania. W ostatnim etapie przetwarzania oba profile są synchronizowane, co pozwala uzyskać zależność chrominacji od pobudzenia temperaturowego – tj. krzywą kalibracji. Krzywa ta jest następnie transformowana do innych przestrzeni barw np. HSV.

### 3.4 PROCEDURA BADANIA KALIBRACJI MATRYCY

Procedura inspekcji kalibracji matryc TLC bazuje na porównaniu krzywych kalibracyjnych z mapą kalibracji referencyjnej. Zależnie od parametru opisującego kalibrację, stosowane są charakterystyki różnych komponentów chrominacji (np. *Hue* dla temperatury środkowej i jej zakresu, oraz składowa *Green* dla intensywności oraz nasycenia).

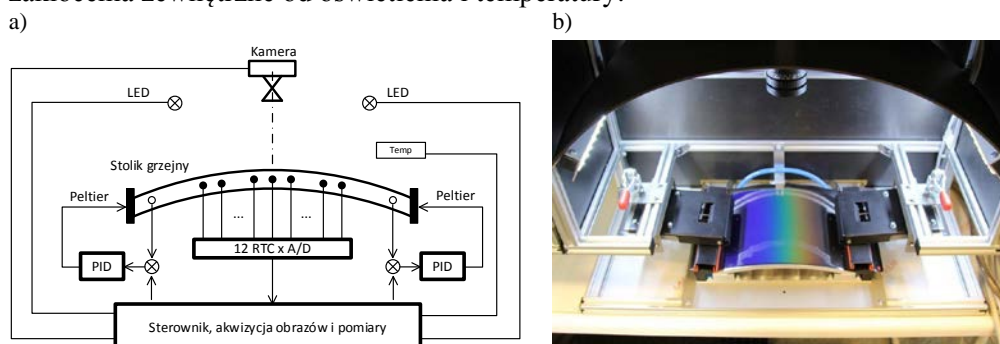
Kluczowym zadaniem przygotowania inspekcji jest wyznaczenie mapy kalibracji referencyjnej. Polega ona na skanowaniu zakresu temperaturowego przy pobudzeniu gradientowym o nachyleniu odpowiadającym zakresowi matrycy. Zakres temperaturowy mapy kalibracji referencyjnej wynika z wartości nominalnej matrycy TLC, przyjętego dla niej pola tolerancji (np.  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ) oraz rozdzielczości (np.  $0,1^{\circ}\text{C}$ ).

Badanie matrycy jest realizowane gradientowo dla kalibracji nominalnej. Ponadto, dla zachowania warunków termodynamicznych, czas badania odpowiada czasowi rejestracji referencyjnej krzywej kalibracyjnej.

### 3.5 STANOWISKO BADAWCZYE

Zgodnie z wyżej omówionymi wynikami badań i prac rozwojowych, opracowano projekt szczegółowy stanowiska, które zostało wykonane rys. 5.

Funkcje sterowania, akwizycji i przetwarzania obrazów oraz pomiarów temperatury zaimplementowano na komputerze PC połączonym z poszczególnymi komponentami poprzez interfejs komunikacyjny Ethernet. Algorytm zaimplementowano w środowisku LabView. Dla prawidłowej pracy stanowiska opracowano również układ napinania badanych matryc oraz osłony minimalizujące zakłócenia zewnętrzne od oświetlenia i temperatury.

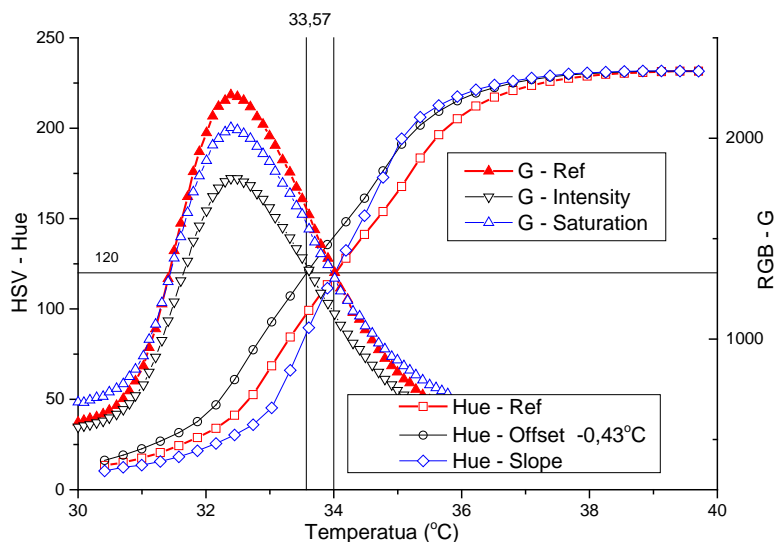


Rys. 5. Stanowisko do badania odpowiedzi termochromowej matrycy TLC, a) schemat, b) zdjęcie

Zgodnie z modelem symulacyjnym, po przyłożeniu matrycy do powierzchni stolika pojawia się stan przejściowy. Warunki równowagi dla błędu temperaturowego  $\Delta T = 0,01^\circ\text{C}$  wymagają czasu stabilizacji  $t_{\min} = 200\text{s}$ . Stąd badania kalibracyjne są prowadzone w warunkach dynamicznych (stanu nieustalonego).

### 4. WYNIKI BADAŃ POPRAWNOŚCI KALIBRACJI

Na rys. 6 pokazano przykładowe wyniki kalibracji, w przestrzeni HSV (Hue) oraz RGB (G) dla matryc referencyjnych oraz matryc wadliwych.



Rys. 6. Przebiegi krzywych kalibracji w przestrzeni HSV i RGB dla różnych wad kalibracji

Krzywe komponentu barwy (Hue) pozwalają zidentyfikować matrycę, dla której temperatura środkowa zakresu jest przesunięta o  $-0,43^{\circ}\text{C}$  oraz matrycę o zawężonym zakresie termicznym  $2,6^{\circ}\text{C}$  zamiast  $4,1^{\circ}\text{C}$ . Z przestrzeni RGB wybrano składową G, w przypadku której zidentyfikowano 20% spadek intensywności oraz 5% spadek nasycenia.

#### 4. WNIOSKI

Ciekłokrystaliczne matryce termochromowe do diagnostyki medycznej, mimo, że nie pełnią roli przetworników pomiarowych, wymagają kontroli poprawności kalibracji.

Opracowano stanowisko umożliwiające przemysłową inspekcję poprawności kalibracji matryc TLC. Pobudzenie termiczne zrealizowano za pomocą stabilizowanego stolika grzejnego. Regulację temperatury za pomocą dwóch układów TEC zasilających ogniwa Peltiera uzyskując stabilizację temperatury poniżej  $0,01^{\circ}\text{C}$ . Termiczny opór kontaktowy, między stolikiem grzejnym, a badaną powierzchnią TLC, zminimalizowano poprzez jego wypukły kształt oraz minimalizację chropowatości powierzchni styku. Do pomiaru profilu temperatury zastosowano układ wielopunktowy dopasowując model regresyjny nieliniowy. W układzie przetwarzania obrazów zaimplementowano szereg algorytmów kompensujących wpływ temperatury na prąd ciemny przetwornika CMOS, oraz nierównomierność oświetlenia i charakterystyki rozpraszania światła na powierzchni folii.

Opracowane stanowisko pozwala wykrywać wadliwe matryce TLC, z nieprawidłową temperaturą środkową i zawężonym zakresem temperaturowym oraz matryce z zaniżoną jasnością lub nasyceniem odpowiedzi barwowej.

#### PODZIĘKOWANIA

*Badania i prace rozwojowe są realizowane w ramach projektu InnoTech I (INNOTECH-K1/IN1/76/159653/NCBR/12) przez konsorcjum naukowo-przemysłowe Braster S.A. i Politechnika Wroclawska.*

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] ABDULLAH NADIA, ABU TALIB ABD RAHIM, MOHD SAIHAH HELMEY RAMDHANEY, JAAFAR A. A, MOHD SALLEH MOHAMAD AMRAN, *Film thickness effects on calibrations of a narrowband thermochromic liquid crystal*. W: Experimental thermal and fluid science, vol. 33, nr 4, 2009, 561-578.
- [2] ANDERSON M. R., *Thermochromic liquid crystal thermography. Hysteresis, illumination and imaging system effects, image processing and applications*. Praca doktorska, Mechanical and Aeronautical Engineering, University of California, 1999.
- [3] ANDRIENKO D., *Introduction to liquid crystals*. IMPRS school, Bad Marienberg, 2006.
- [4] CHAN T. L., ASHFORTH-FROST S., JAMBUNATHAN K., *Calibrating for viewing angle effect during heat transfer measurements on a curved surface*. W: International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 44, nr 12, 2001, 2209-2223.
- [5] CUKUREL B., SELCAN C., ARTS T., *Color theory perception of steady wide band liquid crystal thermometry*. W: Experimental thermal and fluid science, vol. 39, 2012, 112-122.
- [6] DIAKIDES N. A., BRONZINO J. D., *Medical infrared imaging*. CRC press, 2007.
- [7] FOLKMAN J., *Tumor angiogenesis: therapeutic implications*. The New England journal of medicine, vol. 285, nr 21, 1971, 1182-1186.
- [8] HAY J. L., HOLLINGSWORTH D. K., *Calibration of micro-encapsulated liquid crystals using hue angle and a dimensionless temperature*. W: Experimental thermal and fluid science, vol. 18, nr 3, 1998, 251-257.
- [9] IRELAND P. T., JONES T. V., *Liquid crystal measurements of heat transfer and surface shear stress*. W: Measurement Science and Technology, vol. 11, nr 7, 2000, 969.
- [10] KAKADE V. U., LOCK G. D., WILSON M., OWEN J. M., MAYHEW J. E., *Accurate heat transfer measurements using thermochromic liquid crystal. Part I: Calibration and characteristics of crystals*. W: International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 30, nr 5, 2009, 939-949.
- [11] KHOO I.-C., *Liquid crystals*. 2nd ed. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2007.
- [12] KODZWA P. M., EATON J. K., *Angular effects on thermochromic liquid crystal thermography*. W: Experiments in Fluids, vol. 43, nr 6, 2007, 929-937.
- [13] Ng Y. K. E., RAJENDRA ACHARYA U., RANGAYYAN R. M., SURI J. S., *Multimodality breast imaging: Diagnosis and treatment*, 2013.
- [14] NOWAKOWSKI A., *Postępy termografii - aplikacje medyczne*. Praca zbiorowa. Wydawnictwo Gdańskie, Gdańsk 2001.
- [15] PIASECKA M., *Determination of the temperature field using liquid crystal thermography and analysis of two-phase flow structures in research on boiling heat transfer in a minichannel*. W: Metrology and Measurement Systems, vol. XX, nr 2, 2013, 205-216.

- [16] POCHACZEVSKY R., PILLARI G., FELDMAN F., *Liquid crystal contact thermography of deep venous thrombosis*. W: American Journal of Roentgenology, vol. 138, nr 4, 1982, 717–723.
- [17] REINER J., *Identyfikacja i modelowanie optyczne systemów wizyjnej kontroli jakości wytwarzania*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- [18] SMITH C. R., SABATINO D. R., PRAISNER T. J., *Temperature sensing with thermochromic liquid crystals*. W: Experiments in Fluids, vol. 30, nr 2, 2001, 190–201.
- [19] STĘPIEŃ J., JAREMEK H., PIELAK G., *Liquid-crystal emulsion oil in water type and a preparation method of the liquid-crystal emulsion*. patent : EP2528994, 2012.
- [20] STĘPIEŃ J., JAREMEK H., PIELAK G., *Mixture of liquid-crystal compounds, system of three liquid-crystal mixtures and their use*. patent : EP2528993, 2012.
- [21] SURI J. S., *Diagnostic and therapeutic applications of breast imaging*. Bellingham, Wash. (1000 20th St. Bellingham WA 98225-6705 USA): SPIE, 2011.
- [22] UMADEVI V., RAGHAVAN S. V., JAIPURKAR S., *Interpreter for breast thermogram characterization*. W: Biomedical Engineering and Sciences (IECBES), 2010 IEEE EMBS Conference on: IEEE, 2010, 150–154.
- [23] WIĘCEK B., DE MEY G., *Termowizja w podczewieni: Podstawy i zastosowania*. Wydawnictwo PAK, Warszawa 2011.
- [24] YAHARA T., KOGA T., YOSHIDA S., NAKAGAWA S., DEGUCHI H., SHIROUZU K., *Relationship between microvessel density and thermographic hot areas in breast cancer*. W: Surgery Today, vol. 33, nr 4, 2003, 243–248.

# **APLIKACJA BEZODNIESIENIOWYCH METOD OCENY ODCHYLEKI KSZTAŁTU W ZASTOSOWANIACH MEDYCZNYCH**

Andrzej RYNIWICZ<sup>1</sup>, Marek KOWALSKI<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

W referacie przedstawiono ocenę kształtu metodami bezodniesieniowymi w aplikacjach medycznych. Metody te charakteryzują się specyfiką oceny kulistości lub okrągłości poprzez pomiary odchyłki kształtu względem osi badanego elementu. Fakt ten nabiera szczególnego znaczenia w zastosowaniach medycznych do analizy kształtu głowy stawu biodrowego, a w zastosowaniach technicznych do oceny kongruencji elementów łożyskowych [1, 2].

W odniesieniu do badań bio są to oczywiście metody *in vitro*, stosowane w celu określenia rzeczywistych kształtów powierzchni ślizgowych biołożysk u pacjentów zdrowych oraz po zmianach chorobowych. W przypadku wystąpienia zmian badania *in vitro* dają możliwość oceny wielkości ubytków powstałych w wyniku przebytych chorób lub urazów.

Przyjęta metodyka nawiązuje do badań obrazowych z zastosowaniem tomografii komputerowej poprzez wyznaczenie odchyłek okrągłości w wybranych przekrojach, a następnie utworzenie modelu przestrzennego [5]. W układach biołożysk z uwagi na specyfikę ich funkcjonowania bardzo ważnym jest wyznaczenie „osi” zarówno dla poszczególnych przekrojów pomiarowych, a szczególnie dla modeli przestrzennych. W elementach stawowych położenie osi ma duże znaczenie z uwagi na specyfikę kształtu powierzchni ślizgowych, to jest na występujące odchyłki kształtu – pofalowania naturalne i związane z chorobami zwyrodnieniowymi stawów (chzs).

W pracy przedstawiono metodykę badań odchyłek kształtu elementów stawowych wykorzystaniem bezodniesieniowej metody pomiaru zarysów kołowych, kulistych oraz metody współrzędnościowej z wykorzystaniem głowicy laserowej. Opracowano modele przestrzenne mierzonych bioelementów. Dla obu metod oszacowano

---

<sup>1</sup> Politechnika Krakowska, Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, al. Jana Pawła II 37

niepewności pomiarowe. Wyniki badań mogą stanowić materiał wyjściowy do oceny funkcjonowania stawów oraz pewne przesłanki do optymalizacji konstrukcji implantów stawowych pod kątem wprowadzenia konstrukcyjnych pofalowań na powierzchniach współpracujących.

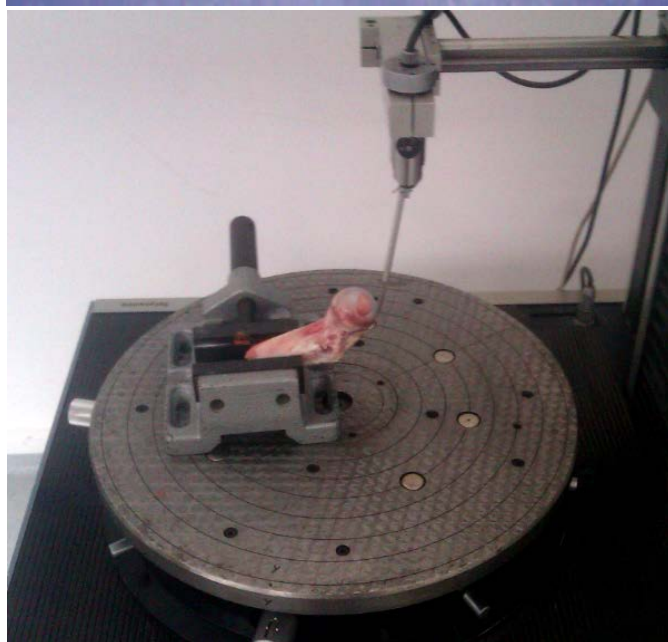
## 2. MATERIAŁ I METODA BADAŃ

Materiałem do badań były kości udowe zwierzęce: kość drobiowa i kość wieprzowa (rys. 1a,b).

a)



b)



Rys. 1. Przedmioty badań: a) kość udowa drobiowa, b) koniec bliższy kości udowej wieprzowej z główką stawu biodrowego zamocowany na stole urządzenia pomiarowego



## 2.1. POMIARY ODCHYLEK KSZTAŁTU

Odchyłkę okrągłości możemy zdefiniować względem trzech różnych elementów odniesienia:

- Względem pary okręgów okręgów współśrodkowych obejmujących zarys przedmiotu jako najmniejsza różnica promieni tych okręgów (MZC).
- Okręgu przylegającego,
- Okręgu średniego wg Gaussa.

Do pomiarów wykorzystano przyrządy pomiarowe: zautomatyzowaną maszynę Talycenta współdziałającą z programem CYFORM, która pozwalała na wykonanie pomiarów odchyłek kształtu (okrągłości i walcowości metodą bezodniesieniową) oraz ramię pomiarowe Romer Omega 2025 (rys. 2) umożliwiające pomiar kulistości stawu biodrowego metodą bezstykową [6].



Rys.2. Stanowisko pomiarowe w skład którego wchodzi ramię pomiarowe wraz z oprzyrządowaniem

Zastosowanie głowicy laserowej w ramieniu pomiarowym dało możliwość zbierania chmury punktów z badanego elementu kostnego i opracowania wyników w programie 3D Reshaper.

### 3. OCENA ODCHYLEK KSZTAŁTU GŁÓWY KOŚCI UDOWYCH

#### 3.1. POMIARY Z ZASTOSOWANIEM KSZTAŁTOGRAFU TALYCENTA

Przeprowadzone pomiary (tab. 1 oraz tab. 2) na maszynie Talycenta pozwoliły na opracowanie modeli 2D wybranych przekrojów badanych głów kości udowych. Na tej podstawie opracowano wykresy biegunowe przedstawiające zarys kształtu oraz zmiany odchyłek kształtu wraz ze zmianą przekroju badanego. Wykresy złożeniowe dla wybranych przekrojów badanych zamieszczono na rys. 3.

Z uwagi na fakt, że pomiary były wykonywane przy jednym zamocowaniu przedmiotu, oś pomiarowa nie uległa przesunięciu umożliwiło to nałożenie wykresów w celu stworzenia wykresu złożeniowego.

Przykładowe wyniki badań w postaci wykresów w układzie biegunowym przedstawiono na rys.3. Natomiast wykresy złożeniowe 2D oraz 3D dla wybranych przekrojów badanych zamieszczono na rys. 4.

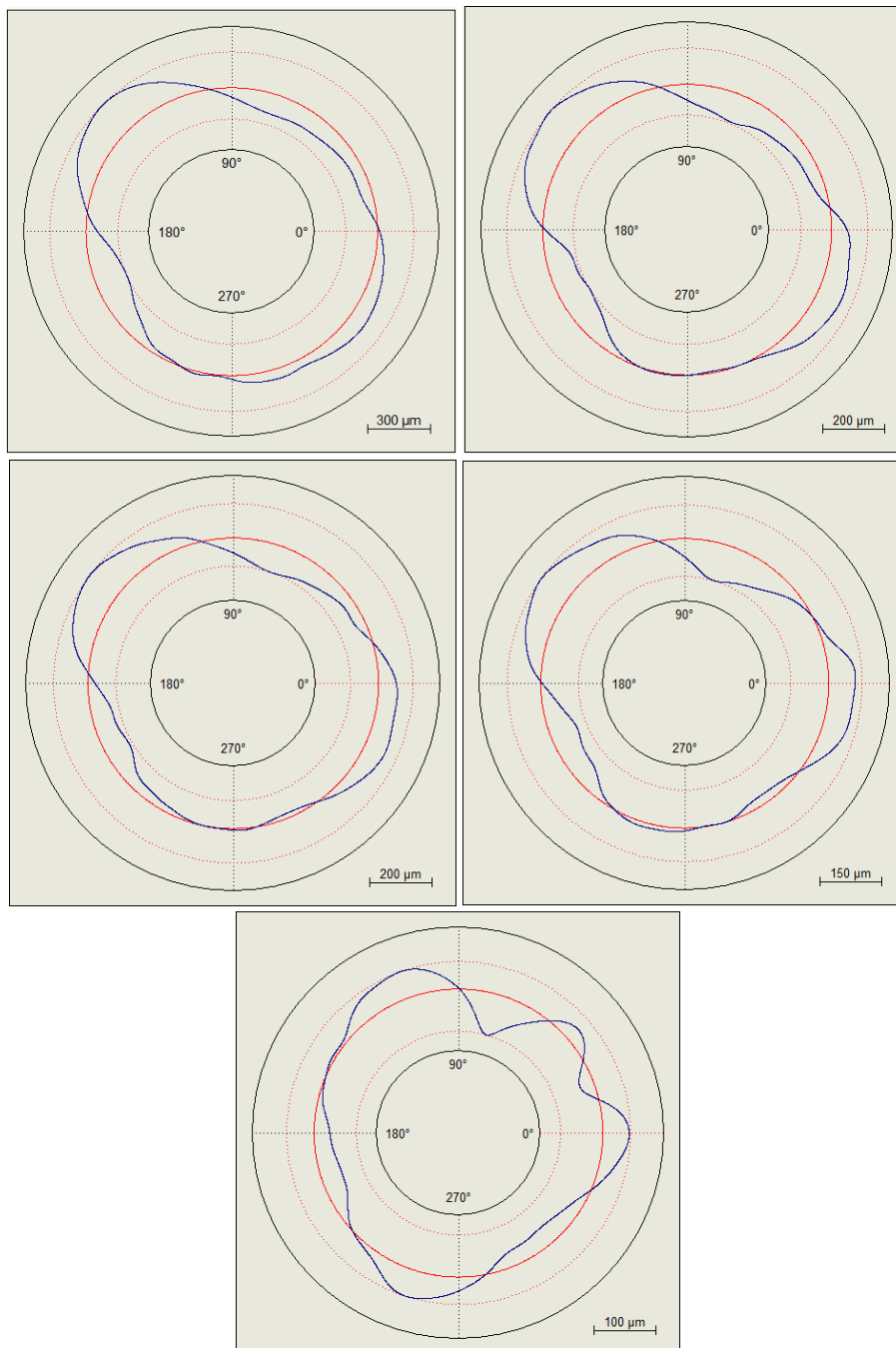
Tabela 1. Wartości liczbowe dla poszczególnych punktów pomiarowych głowy stawu biodrowego wieprzowego w kolejnych przekrojach

przekrój	Wartość punktu pomiarowego [ $\mu\text{m}$ ]							
	Pkt 1	Pkt 2	Pkt 3	Pkt 4	Pkt 5	Pkt 6	Pkt 7	Pkt 8
1	2080,79	2063,33	1897,84	1841,92	2342,14	1874,8	1862,34	1948,46
2	1841,6	2468,63	2017,65	1347,79	2403,04	1987,62	2127,66	2258,28
3	1334,53	1775,26	1439,04	791,48	1770,9	1356,31	1466,25	1191
4	1379,81	1674,75	1443,24	867,07	1722,32	1173,33	1356,27	1262
5	1037,87	1179,62	1075,06	541,32	1267,4	1006,58	921,14	831,55

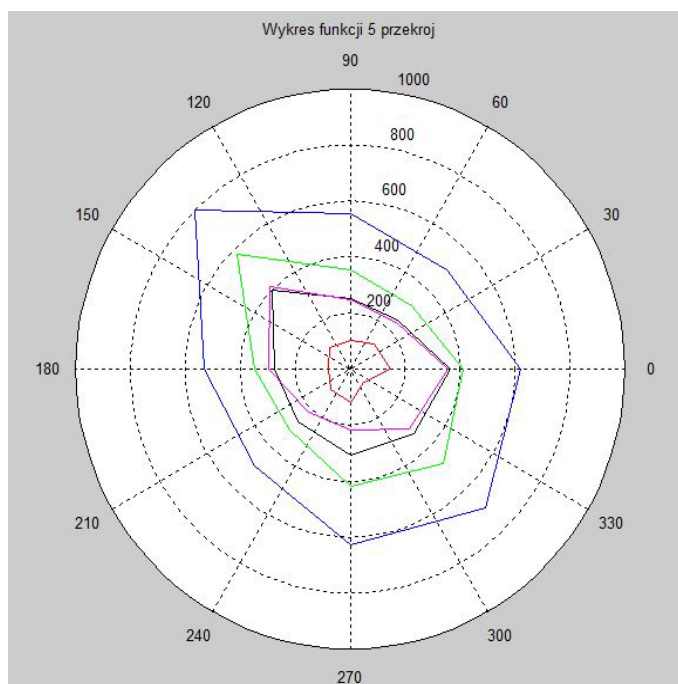
Tabela 2. Wartości liczbowe dla poszczególnych punktów pomiarowych głowy stawu biodrowego drobiowego w kolejnych przekrojach

przekrój	wartość liczbową powiększoną o promień okręgu średniego [ $\mu\text{m}$ ]							
1	620,22	499,55	554,4	800,82	529,4	489,73	625,92	698,63
2	412,72	318,61	354,27	581,72	346,14	310,18	419,39	476,95
3	357,87	237,11	245,71	413,74	295,498	215,61	303,605	354,13
4	366,08	245,37	250,48	400,16	277,25	266,55	305,56	327,48
5	146,05	125,85	102,2	106,5	76,86	102,4	121,6	67,86

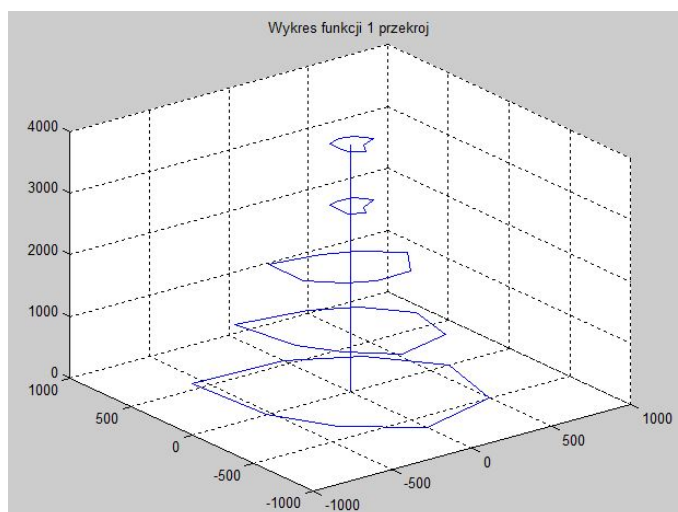
Na wykresie złożeniowym możemy dostrzec w jaki sposób zmiana przekroju wpływa na odchyłki okrągłości.



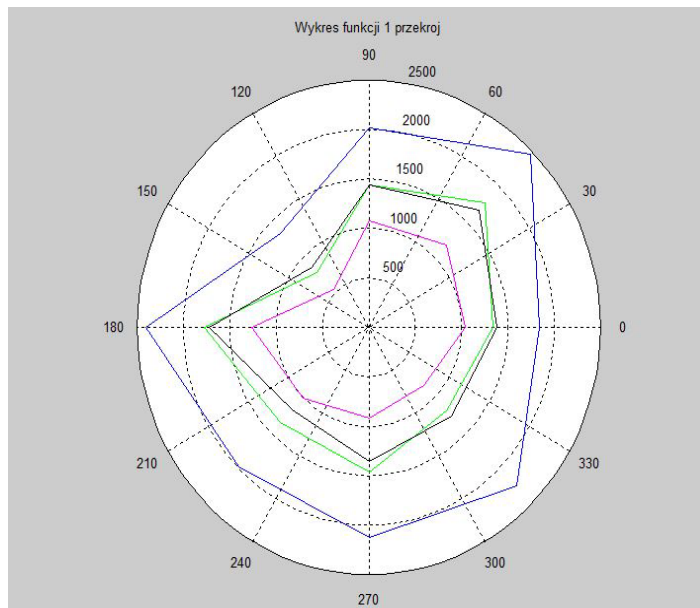
Rys. 3. Przykładowe wykresy biegunowe w wybranych przekrojach na głowie kości udowej drobiowej



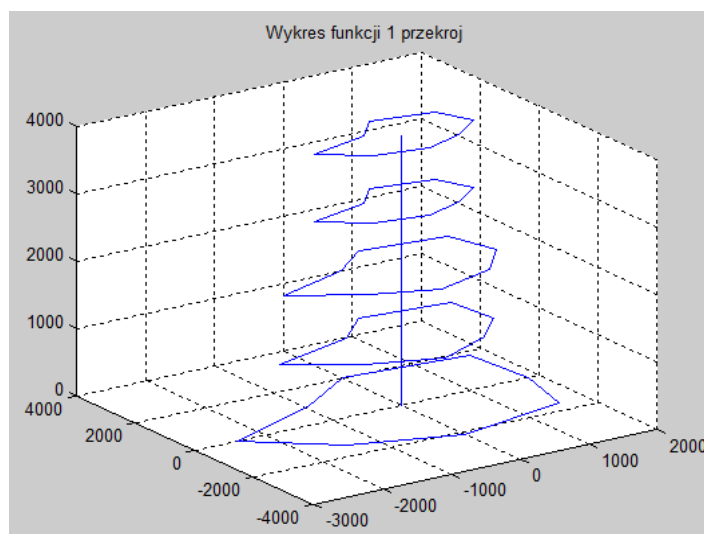
Rys. 4a. Wykres złożeniowy z pięciu przekrojów głowy stawu biodrowego drobiowego w układzie 2D



Rys. 4b. Wykres złożeniowy z pięciu przekrojów głowy stawu biodrowego drobiowego w układzie 3D



Rys. 5a. Wykres złożeniowy z pięciu przekrojów głowy stawu biodrowego wieprzowego w układzie 2D



Rys. 5b. Wykres złożeniowy z pięciu przekrojów głowy stawu biodrowego wieprzowego w układzie 3D

Wartości odchyłek kształtu dla wybranych punktów pomiarowych dla głowy stawu biodrowego drobiowego przedstawiono w tabeli 3, a dla głowy stawu biodrowego wieprzowego w tabeli 4.

Tabela 3. Odchyłki kształtu okrągłości dla głowy kości udowej drobiowej w pięciu przekrojach

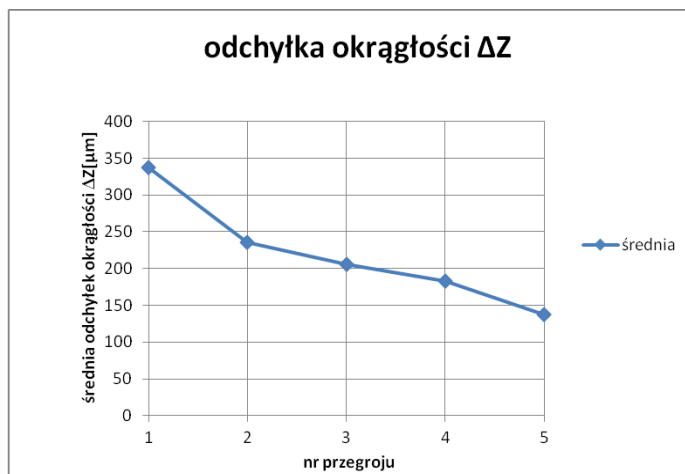
nr pomiaru	$\Delta Z1 [\mu\text{m}]$	$\Delta Z2[\mu\text{m}]$	$\Delta Z3[\mu\text{m}]$	$\Delta Z4[\mu\text{m}]$	$\Delta Z5[\mu\text{m}]$	średnia $[\mu\text{m}]$
1	338,72	336,71	338,11	337,24	338,04	337,764
2	236,77	235,65	235,09	237,76	232,99	235,652
3	210,38	204,45	207,1	202,4	203,04	205,474
4	179,41	191,82	180,24	183,72	180,15	183,068
5	134,56	137,86	139,22	137,46	138,55	137,53

Tabela 4. Odchyłki kształtu okrągłości dla głowy kości udowej wieprzowej w pięciu przekrojach

nr pomiaru	$\Delta Z1 [\mu\text{m}]$	$\Delta Z2[\mu\text{m}]$	$\Delta Z3[\mu\text{m}]$	$\Delta Z4[\mu\text{m}]$	$\Delta Z5[\mu\text{m}]$	średnia $[\mu\text{m}]$
1	1527,76	1530,67	1529,67	1528,88	1527,66	1528,93
2	1576,94	1576,10	1575,86	1574,04	1573,52	1575,29
3	1532,46	1530,94	1529,00	1528,06	1526,60	1529,41
4	1221,00	1220,53	1220,39	1225,74	1220,51	1221,63
5	896,66	896,37	896,49	893,89	897,84	896,25

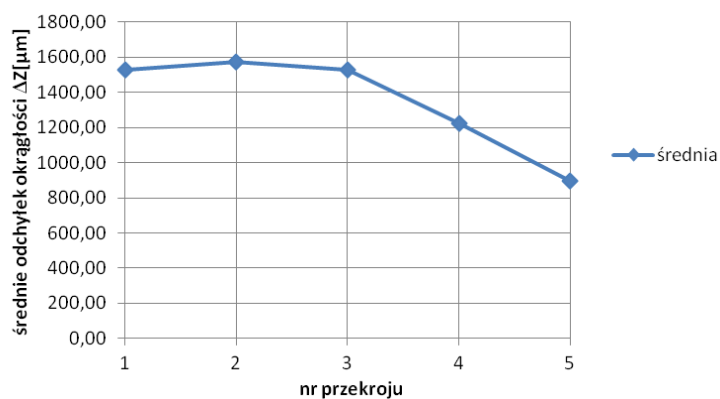
Przedstawione w tych tabelach dane wykorzystano do graficznego przedstawienia zmienności wartości odchyłek okrągłości z pięciu serii pomiarowych dla badanych punktów stawu biodrowego drobiowego i wieprzowego. Odpowiednie wykresy tych odchyłek zamieszczono na rys. 6 i 7.

W tabeli 5 podano wartości odchyłeń standardowych eksperymentalnych dla przeprowadzanych pomiarów odchyłek kształtu.



Rys. 6. Wykres odchyłki kształtu okrągłości w kolejnych przekrojach badawczych dla głowy kości udowej drobiowej

### odchyłka okrągłości $\Delta Z$



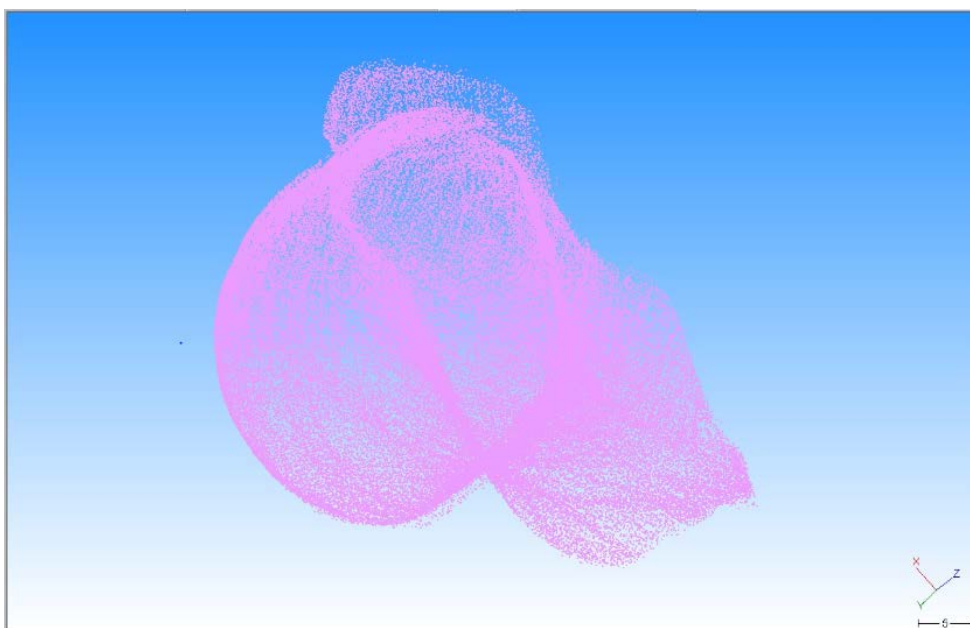
Rys.7. Wykres odchyłki kształtu okrągłości w kolejnych przekrojach badawczych dla głowy kości udowej wieprzowej

Tabela 5. Odchylenia standardowe odchyłek kształtu okrągłości: s1- odchylenie standardowe pomiarów głowy kości drobiowej s2- kości wieprzowej w [mm]

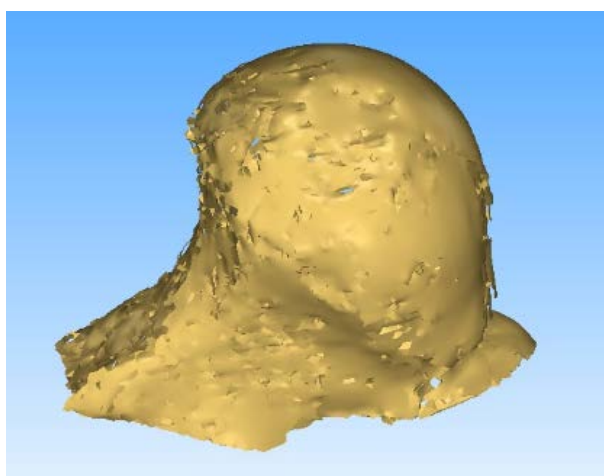
Nr przekroju	s1	s2
1	0,7898	0,9711
2	1,8094	1,2303
3	3,2839	2,2939
4	5,1700	1,7079
5	1,7910	1,1492

### 3.2. POMIARY Z ZASTOSOWANIEM RAMIENIA POMIAROWEGO WYPOSAŻONEGO W GŁOWICĘ LASEROWĄ

Przeprowadzone pomiary odchyłki kształtu sferyczności dla głowy kości udowej wieprzowej z zastosowaniem ramienia pomiarowego wyposażonego w głowicę laserową pozwoliły na określenie odchyłki kształtu sferyczności, a także na opracowanie modelu 3D przedstawiającego głowę kości udowej (rys. 8 i 9) [7].



Rys. 8. Chmura punktów zebrana przy pomocy ramienia pomiarowego

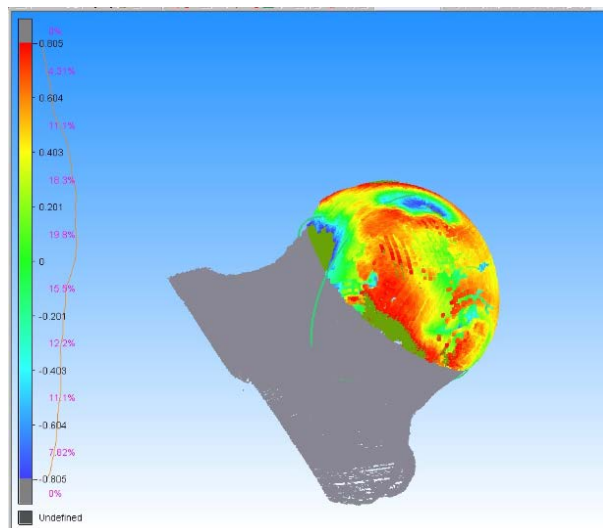


Rys. 9. Model 3D głowy kości udowej wieprzowej

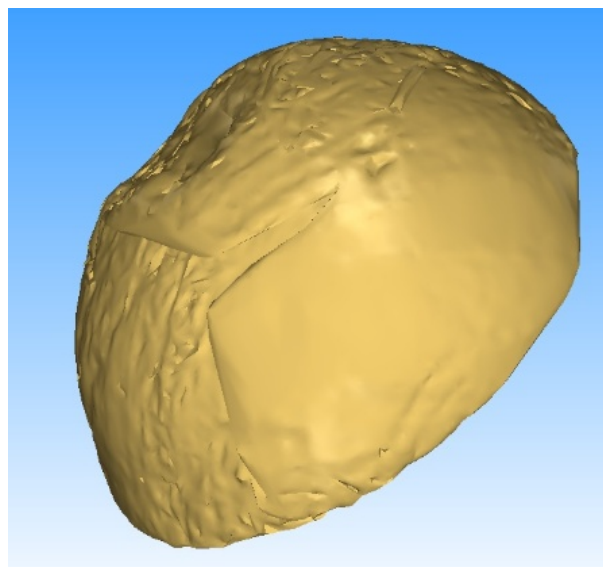
Otrzymany model 3D został porównany z kształtem kuli wzorcowej. Na wykresie (rys.10) przedstawiono rozmieszczenie poszczególnych odchyłek sferyczności, których wartości zaznaczono w formie mapy kolorów. Odchyłka kulistości wyniosła  $1600\ \mu\text{m}$  co stanowi porównywalną wartość do wyników otrzymanych na urządzeniu Talycenta.



Końcowy model 3D głowy stawu biodrowego wieprzowego przedstawiono na rys.11.



Rys. 10. Graficzne przedstawienie odchyłki sferyczności głowy kości udowej wieprzowej



Rys. 11. Końcowy model 3D głowy stawu biodrowego wieprzowego

Dokładność pomiarów stykowych oraz bezstykowych wykazują podobne wartości odchyłeń. Różnice w wynikach pomiarów wynikały między innymi z dokładności

pomiarów ale także ze sposobu realizacji badań. Wartości odchyłek dla obydwu przyrządów nie wykazywały istotnych różnic można więc uznać, że przeprowadzone badania zostały poprawnie zrealizowane.

## 5. WNIOSKI

- W pracy zostały zrealizowane zamierzone cele, dokonano pomiarów odchyłki sferyczności i okrągłości głów kości udowych zbudowano modele numeryczne oraz przeprowadzono analizę metrologiczną otrzymanych wyników.
- Dokonano oceny stykowych i bezstykowych metod pomiaru.
- Przeprowadzono pomiary na głowach kości udowych: drobiowej i wieprzowej pozwalające na określenie odchyłek kulistości oraz sferyczności.
- Przeprowadzono wizualizację wyników badań na wykresach 2D i 3D.
- Otrzymane wyniki badań kształtu głów stawów biodrowych stanowią przesłanki do oceny geometrii elementów biołożysk i mogą być wykorzystane w inżynierii biomedycznej.

## LITERATURA

- [1] BRAUN H. J. GOLD G. E., *Diagnosis of osteoarthritis: imaging*; W: Bone, 51/2, 2012, 278-288.
- [2] GÜHRING J., *Dense 3-D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components*, Proceedings of SPIE, Vol. 4309, USA, San Jose, 2001.
- [3] RATAJCZYK E., *Współrzędnościowe ramiona pomiarowe w zastosowaniach przemysłowych*. W: Pomiary, Automatyka, Robotyka, 16 (2012), 33-39.
- [4] RODRIGUEZ-MERCHAN E., *Regeneration of articular cartilage of the knee: basic concepts*, Articular Cartilage Defects of the Knee, Springer-Verlag, Italia 2012, 1-16.
- [5] RYNIEWICZ A.M., *Identification, modelling and biotribology of human joints*. AGH University of Science and Technology Press, Krakow 2011.
- [6] RYNIEWICZ A., KNAPIK R., SŁADEK J., BOJKO Ł., *Modelowanie kształtu struktur tkankowych z wykorzystaniem skanerów laserowych mobilnych i systemów fringe optic*. W: Przegląd Elektryczny, nr 5, 2014.
- [7] Materiały informacyjne firmy Smarttech, [www.smarttech.pl](http://www.smarttech.pl)

# **METODY WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK PRZEPLYWOWYCH DŁAWIKÓW HYDRAULICZNYCH**

Małgorzata SIKORA<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

Łożyska oraz prowadnice hydrostatyczne jako układy hydrauliczne zasilane olejem o stałym ciśnieniu wymagają stosowania dławików umieszczonych na dopływie każdej z komór. Odgrywają one szczególnie istotny wpływ na właściwości układów w przypadku zespołów wrzecionowych i prowadnicowych precyzyjnych obrabiarek. Należy nadmienić iż w chwili obecnej zespoły hydrostatyczne znajdują zastosowanie w takich przypadkach, w których inne typowe rozwiązania nie są w stanie sprostać stawianym ekstremalnym wymaganiom. Tym samym niezmiernie istotna jest kompleksowa znajomość właściwości i zależności obowiązujących dla elementów składowych tych zespołów, do których należą dławiki.

## **2. OBIEKT ANALIZY**

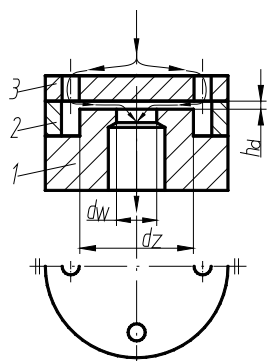
Stosowane dławiki mogą być stałe lub sterowane automatycznie. Dławiki sterowane automatycznie pozwalają na uzyskiwanie bardzo dużej sztywności zespołów jednak wykazują gorsze właściwości dynamiczne oraz są mniej pewne w działaniu i droższe [2]. Dlatego też w większości przypadków zastosowanie znajdują dławiki stałe zapewniające wystarczająco dobre cechy statyczne i dynamiczne zespołów.

W niniejszym opracowaniu rozważaniom poddano dławik stały z przepływem laminarnym, który pozwala na uniezależnienie właściwości łożysk lub prowadnic hydrostatycznych od lepkości oleju, zmieniającej się w czasie pracy. Ponadto dławik ten powinien posiadać następujące cechy: zwarta konstrukcja, łatwość wykonania, odporność na obliterację oraz nagłą utratę drożności.

---

<sup>1</sup> Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i TBM, ul. Stefanowskiego 1/15, Łódź 90-924

Wszystkie wymienione cechy jakimi powinny charakteryzować się dławiki posiada dławik szczelinowy przedstawiony na rysunku 1. Dławiki szczelinowe głównie są stosowane w konstrukcjach opracowywanych w Instytucie Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej prowadnic szlifierek do wałków i zespołów wrzecionowych szlifierek, poddanych analizie między innymi w [1, 4].



Rys. 1. Konstrukcja dławika szczelinowego:  
1 – korpus, 2 – tulejka, 3 – płytka

Dodatkowo zaletą tej konstrukcji jest możliwość precyzyjnego ustalenia szczeliny dławiącej  $h_d$  (tzw. dostrojenie dławika). Czynność tę w sposób nieskomplikowany wykonuje się podczas montażu przez docieranie czoła korpusu dławika 1, albo tulejki dystansowej 2.

### 3. METODY WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK

Strumień objętości oleju przepływającego przez dławik szczelinowy  $Q_d$  w zależności od spadku ciśnienia  $\Delta p$  można wyznaczyć na trzy sposoby. Na drodze eksperymentalnej albo teoretycznej wykorzystując zależności analityczne lub metody numeryczne.

#### 3.1. METODY ANALITYCZNE

Strumień objętości oleju przepływającego przez dławik szczelinowy  $Q_d$  można obliczyć z wzoru (1), słusznego dla przepływu laminarnego [5]:

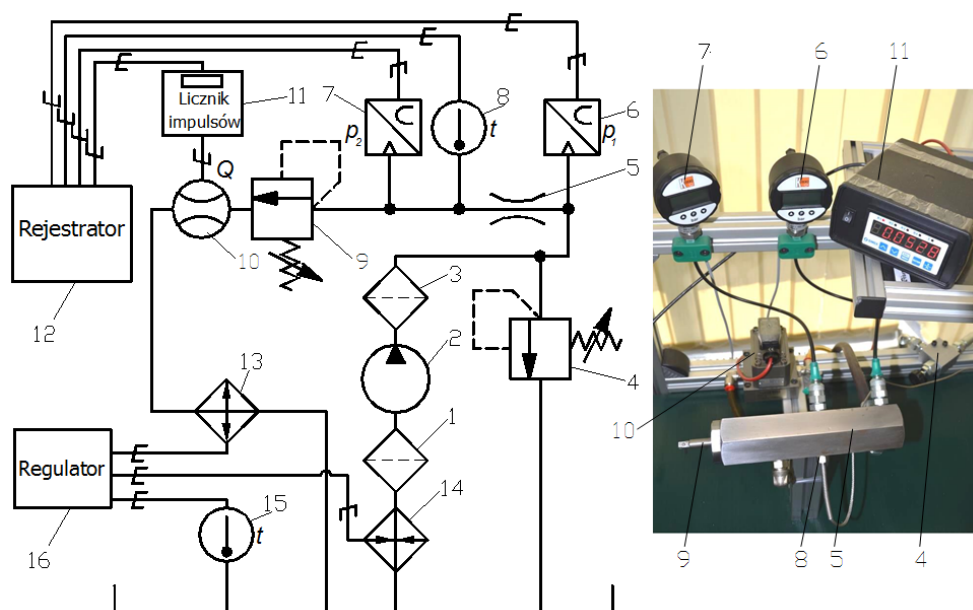
$$Q_d = \frac{\pi \cdot h_d^3}{6 \cdot \eta \cdot \ln \frac{d_z}{d_w}} \Delta p \quad (1)$$

w którym:  $d_z$  – średnica zewnętrzna dławika,  $d_w$  – średnica wewnętrzna dławika,  $\eta$  – lepkość dynamiczna oleju.

Drugą możliwością teoretycznego wyznaczenia charakterystyk jest przeprowadzenie symulacji numerycznych przy wykorzystaniu aktualnie dostępnych programów symulacyjnych, do których zaliczyć można moduł Simulation CFD programu Autodesk Inventor [6]. Przy czym w tym wariantcie obliczeń analizie poddany został kompletny dławik w przeciwieństwie do wzoru (1) gdzie przyjęto założenie iż straty występują tylko głównej szczeliny dławiącej  $h_d$ .

### 3.2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W celu przeprowadzenia badań eksperymentalnych zbudowano stanowisko do badania zależności strumienia objętości  $Q_d$  oleju przepływającego przez dławik od spadku ciśnienia  $\Delta p$ . Schemat oraz widok niniejszego stanowiska przedstawiono na rysunku 2. Olej podawano na stanowisko przez filtry: wstępny 1 i dokładny 3, pompą zębatą 2. Ciśnienie  $p_1$ , panujące przed badanym dławikiem 5, nastawiano za pomocą zaworu przelewowego 4, zaś ciśnienie  $p_2$  za dławikiem – za pośrednictwem zaworu progowego 9. Wartości ciśnień  $p_1$  i  $p_2$  odczytywano na rejestratorze 12 na podstawie sygnału z przetworników ciśnienia 6 i 7 o klasie dokładności 0,25%. Tym samym spadek ciśnienia na dławiku  $\Delta p$  był równy  $\Delta p = p_1 - p_2$ .



Rys. 2. Schemat oraz widok stanowiska do badania dławików: 1 – filtr wstępny, 2 – pompa zębata, 3 – filtr dokładny, 4 – zawór przelewowy, 5 – badany dławik, 6,7 – przetworniki ciśnienia, 8 – termopara, 9 – zawór progowy, 10 – przepływomierz zębatkowy, 11 – licznik impulsów, 12 – rejestrator, 13 – chłodnica, 14 – grzałka, 15 – termopara, 16 – regulator

Do pomiaru chwilowego strumienia objętości przepływającego przez dławik wykorzystano przepływomierz zębatkowy 10 o zakresie 0,0012–0,24 m<sup>3</sup>/s i klasie dokładności 0,3%.

Pomiar temperatury oleju za dławikiem realizowano za pomocą termopary Pt100 8 o zakresie pomiarowym 0–100°C.

Sygnały pomiarowe z przetworników ciśnienia 6, 7, przepływomierza 10 oraz czujnika temperatury zbierano przy wykorzystaniu rejestratora danych 12 połączonego z komputerem.

Dodatkowo stanowisko zostało wyposażone w układ automatycznej stabilizacji temperatury, którego układem sterującym był regulator 16, elementem pomiarowym temperatury oleju w zbiorniku termopara 15, natomiast zespołami wykonawczymi chłodnica 13 oraz grzałka 14.

Zależność lepkości oleju  $\eta$  od temperatury  $\tau$  wyznaczono doświadczalnie przy wykorzystaniu lepkościomierza Hoepplera. Dla oleju L-HL 46 użytego w badaniach zależność ta jest następująca:  $\eta = 23,4 \tau^{-1,73}$ .

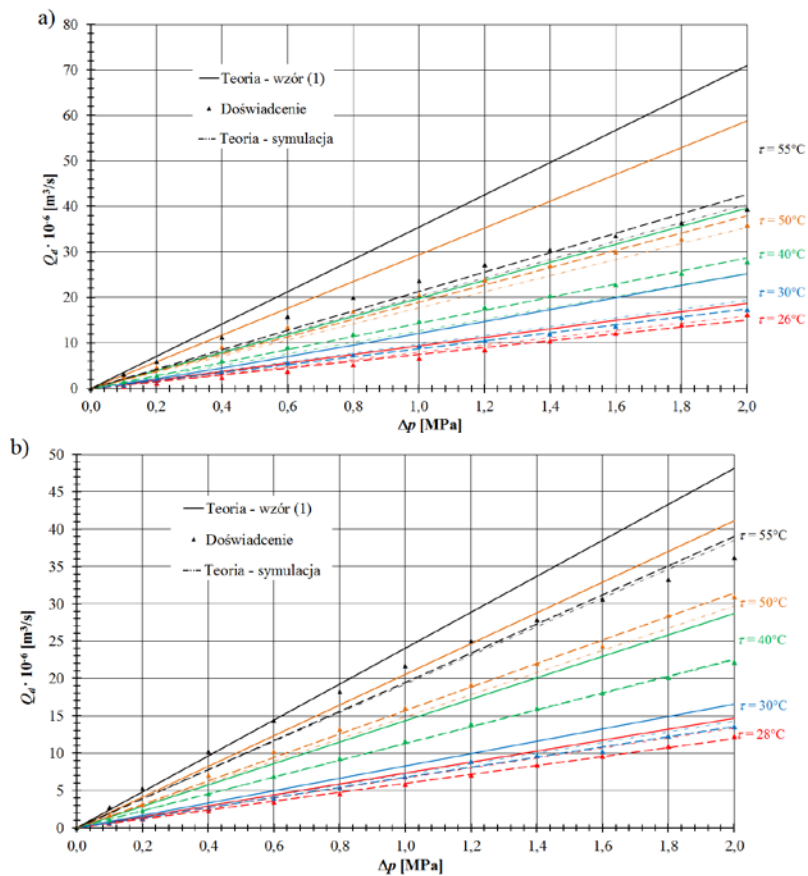
### 3.3. WYNIKI BADAŃ

Celem określenia zgodności wyników uzyskanych na drodze analizy teoretycznej dławików szczelinowych z rzeczywistymi charakterystykami przepływowymi, rozważaniom poddano dwa dławiki charakteryzujące się średnicą wewnętrzną  $d_w = 1,95$  mm i średnicą zewnętrzną  $d_z = 6,5$  mm, natomiast różniące się wielkością szczeliny  $h_d = 105 \mu\text{m}$  oraz  $h_d = 120 \mu\text{m}$ .

Badania dławików wykonano w zakresie temperatur 26–55°C. Otrzymane charakterystyki przepływowe  $Q_d = f(\Delta p)$  dla przebadanych dławików przedstawiono na rys. 3. Przebiegi teoretyczne uzyskane na podstawie zależności analitycznej (1) naniesiono liniami ciągłymi, wyniki z symulacji – linią dwupunktową a doświadczalne – punktami i linią przerywaną.

Do punktów uzyskanych z badań eksperymentalnych dopasowano linie trendów, posługując się metodą najmniejszych kwadratów przy wykorzystaniu programu Microsoft Excel. Zgodnie z zależnością teoretyczną opisującą badany dławik, linie trendów były liniami prostymi. O dobrym dopasowaniu prostych do wyników doświadczeń świadczyły wartości współczynników korelacji, które w większości przypadków były nie mniejsze niż 0,995. Jedynie dla temperatury 55°C współczynnik ten wynosił 0,975. Wartości uzyskanych współczynników korelacji pozwalają uznać, iż zależności dla temperatur do 50°C  $Q_d = f(\Delta p)$  są liniowe.

Należy zauważyć, że w temperaturze 55°C punkty z badań dławików odchylają się od charakterystyki liniowej w podobny sposób: przyrosty natężeń przepływu są coraz to mniejsze od odpowiadających im przyrostów spadków ciśnień. Odchylenia te są niewielkie, ale wyraźne i systematyczne. Może to świadczyć o tendencji do przechodzenia przepływu laminarnego w pośredni, co potwierdza [4].



Rys. 3. Zależność natężenia przepływu  $Q$  od spadku  $\Delta p$  dla dławika o szczelinie: a)  $h_d = 120 \mu\text{m}$ , b)  $h_d = 105 \mu\text{m}$

Aby ocenić zgodność wyników uzyskanych drogą eksperymentalną z wynikami obliczeń teoretycznych, określono różnice względne  $\delta_Q$  natężeń przepływu:

$$\delta_Q = \frac{(Q_d)_e - (Q_d)_t}{(Q_d)_t} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie  $(Q_d)_t$  oznacza teoretyczną, a  $(Q_d)_e$  doświadczalną wartość natężenia przepływu.

Otrzymane wyniki obliczeń dla przebiegów funkcji  $Q_d = f(\Delta p)$  zestawiono w tab. 1.

Na podstawie zestawienia przedstawionego w tabeli 1 można uznać, że rozbieżności między wynikami teoretycznymi uzyskanymi na podstawie zależności analitycznej a doświadczeniem są większe od wyników otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych. Należy zauważyć iż we wszystkich przypadkach wartości uzyskane na podstawie wzoru analitycznego są większe od rzeczywistych, natomiast

w przypadku wyników symulacyjnych sytuacja w 75% przypadków jest odmienna, jest to zapewne spowodowane przyjętymi założeniami co do strat ciśnienia.

TABELA 1. Różnice względne  $\delta_o$  natężeń przepływu

Lp.	Dławik	Teoria	Temperatura oleju $\tau$ [°C]			
			30	40	50	55
			Lepkość oleju $\eta$ [Pa·s]			
			0,0608	0,0351	0,0245	0,0209
Różnica względna $\delta_o$ [%]						
1.	$h_d=105$	wzór (1)	-18,17	-21,32	-23,58	-18,95
		symulacja	-5,35	0,70	5,92	1,38
2.	$h_d=120$	wzór (1)	-30,70	-27,66	-35,41	-39,85
		symulacja	-10,00	12,97	7,39	5,26

#### 4. PODSUMOWANIE

Można przyjąć, że w zakresie badanych parametrów zależność natężania przepływu od spadku ciśnienia jest funkcją liniową dla temperatur oleju poniżej 50°C.

Należy jednak pamiętać, że przedstawione wyniki odnoszą się do dławików o określonych wymiarach geometrycznych. Jeśli zatem dławik znacznie odbiega wymiarami od opisywanych, to konieczne są jeszcze badania doświadczalne.

Dzięki możliwościom jakie daje oprogramowanie symulacyjne już na etapie projektowania można przeprowadzić optymalizację poszczególnych podzespołów jak i całego opracowywanego układu, oszczędzając tym samym czas i obniżając koszty.

Przedstawione wyniki badań mają przede wszystkim znaczenie praktyczne, co oznacza, że mogą okazać się przydatne w doborze optymalnej szczeliny dławiącej.

#### LITERATURA

- [1] FRONCKI W., *Optymalizacja przewodnic hydrostatycznych zamkniętych*. W: *Hydraulika i Pneumatyka*, nr 5, 2010, 10-13.
- [2] KALENIK G., LEWANDOWSKI D., *Podwyższenie sztywności poprzecznych łożysk hydrostatycznych drogą automatycznej regulacji dławienia*. W: *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej 2000 Nr 860 Ciepne Maszyny Przepływowe Nr 118*, 33-52
- [3] PRZYBYŁ R., *Charakterystyki przepływowe dławików*. W: *Hydraulika i Pneumatyka*, nr 6, 1997, 8-11.
- [4] PRZYBYŁ R., *Przykłady współczesnych zastosowań łożysk hydrostatycznych*. W: *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej 2000 nr 860 Ciep. Masz. Przepł. nr 118*, 9-22
- [5] SIKORA M., *Badania dławików stosowanych w łożyskach hydrostatycznych*. W: *Hydraulika i Pneumatyka*, nr 6, 2007, 5-8.
- [6] STOJEK J., *Wykorzystanie techniki CFD do modelowania zjawisk przepływowych w hydraulicznych zaworach wzniosowych*. W: *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, 2008, vol. 28 nr 4, 89-97.



# WSPÓLRZĘDNE ODNIESIENIA W POMIARACH ZARYSU ZWOJU ŚLIMAKÓW WALCOWYCH

Leszek SKOCZYLAS<sup>1</sup>, Dawid WYDRZYŃSKI<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Przeprowadzenie pomiarów dokładności wykonania kół zębatach ze względu na ich złożoną geometrię uzębienia w wielu przypadkach jest zagadnieniem trudnym. Rozwiązaniem problemu może być specjalistyczne oprogramowanie dla maszyn współrzędnościowych dedykowane do pomiarów kół ewolwentowych. Występują jednakże koła zębata z nietypowym zarysem, jak również w ewolwentowym uzębieniu celowo wprowadzane są modyfikacje. Tego typu rozwiązania mogą ograniczać lub nawet eliminować zastosowanie specjalnego oprogramowania. Przykładem takich kół są koła przekładni ślimakowych. Pozostaje więc wykorzystanie rozwiązań uniwersalnych. Aktualnie dostępnych jest szereg rozwiązań o dużych możliwościach i uniwersalnym przeznaczeniu. Chodzi tutaj o pomiarowe systemy współrzędnościowe i optyczne, które wykorzystywane są do pomiarów różnych kół zębatach [1,3,6]. Również do ślimaków mogą być one z powodzeniem wykorzystane. Powstaje jednak pytanie jak najprościej zdefiniować obiekt odniesienia, wygodny tak ze strony realizacji pomiaru jak i analizy wyników. Biorąc pod uwagę specyfikę budowy ślimaka, można zauważyć, że najwygodniejszym przekrojem do pomiarów jego zarysu jest przekrój osiowy. W związku z tym, przy dużej różnorodności zarysów zwojów ślimaków, dodatkowo definiowanych w różnych przekrojach, zasadnym jest określenie współrzędnych teoretycznego zarysu zwoju w przekroju osiowym ustalając tym samym zarys odniesienia.

---

<sup>1</sup> Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 8, Rzeszów

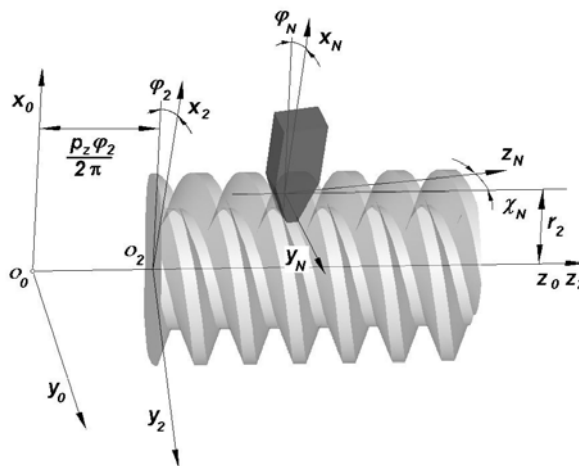
## 2. WSPÓLRZĘDNE TEORETYCZNEGO OSIOWEGO ZARYSU ŚLIMAKA

Zarys ślimaka może być definiowany bezpośrednio lub pośrednio, poprzez kształt powierzchni narzędzia wykorzystanego do jego obróbki. Wobec tego, wyróżniane są dwie grupy powierzchni śrubowej ślimaka [5]:

- powierzchnie definiowane znamionowym zarysem uzwojenia ślimaka,
- powierzchnie definiowane znamionowym zarysem narzędzia.

W literaturze można spotkać różne modele matematyczne opisujące uzwojenie ślimaków [2, 4, 5]. Często odnoszą się do wybranego typu powierzchni śrubowej. Podejście w prezentowanym opracowaniu ma charakter uniwersalny i pozwala na opis wszystkich typów powierzchni śrubowych.

Powierzchnie śrubowe definiowane znamionowym zarysem uzwojenia charakteryzują się tym, że zarys jako jedna z tworzących jest zapisany w postaci równania linii o dowolnym przebiegu na płaszczyźnie. Nawiązując do technologii kształtowania tej grupy ślimaków, znamionowy zarys powierzchni odpowiada dokładnie krawędzi skrawającej narzędzia (noża tokarskiego). W trakcie kształtowania, narzędzie może przyjmować różne ustawienia względem osi ślimaka. Schemat do przygotowania opisu powierzchni śrubowej przedstawiono na rysunku 1.

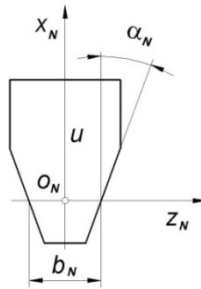


Rys. 1. Schemat kinematyczny kształtowania ślimaków z bezpośrednią definicją zarysu powierzchni śrubowej, gdzie:  $p_z$ - skok linii śrubowej,  $r_2$ - promień podziałowy ślimaka,  $\chi_N$ ,  $\varphi_N$ - kąty obrotu układu narzędzia,  $\varphi_2$ - kąt obrotu ślimaka

Równanie opisujące współrzędne powierzchni śrubowej ma zatem postać:

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x_N(u) \left( \cos \varphi_2 \cos \varphi_N + \sin \varphi_2 \cos \chi_N \sin \varphi_N \right) - \\ &\quad - z_N(u) \sin \varphi_2 \sin \chi_N + r_2 \cos \varphi_2 \\ y_2 &= x_N(u) \left( \cos \varphi_2 \cos \chi_N \sin \varphi_N - \sin \varphi_2 \cos \varphi_N \right) - \\ &\quad - z_N(u) \cos \varphi_2 \sin \chi_N - r_2 \sin \varphi_2 \\ z_2 &= x_N(u) \sin \chi_N \sin \varphi_N + z_N(u) \cos \chi_N - \frac{P_z \varphi_2}{2\pi} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Układ (1) jest układem wyjściowym, wymagającym określenia równań krawędzi narzędzia. Podstawowym znamionowym kształtem zarysu powierzchni śrubowej tej grupy ślimaków jest linia prosta. Parametryczny opis prostoliniowej krawędzi narzędzia przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Prostoliniowy zarys narzędzia, gdzie:  $b_N$  – szerokość znamionowa narzędzia,  $\alpha_N$  – znamionowy kąt zarysu narzędzia,  $u$  – parametr odpowiadający współrzędnej  $x_N$

Zgodnie z rysunkiem 2 parametryczne równanie linii zarysu narzędzia jest następujące:

$$\left. \begin{aligned} x_N &= u \\ z_N &= \frac{b_N}{2} + u \operatorname{tg} \alpha_N \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Równania (1) i (2) opisują powierzchnię śrubową o prostoliniowym zarysie znamionowym. Wszelkie zmiany kształtu powierzchni śrubowej będą wynikały z kształtu linii reprezentującej krawędź narzędzia oraz jej ustawienia względem osi ślimaka. Współrzędne osiowego zarysu ślimaka uzyskać można przez przyrównanie

do zera współrzędnej  $y_2$ . Dla nieprostoliniowych znamionowych zarysów ślimaka przebieg obliczeń jest identyczny. Inną formę przyjmuje tylko równanie (2).

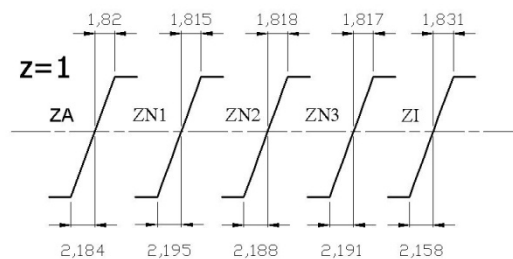
W praktyce występuje kilka charakterystycznych typów tej grupy ślimaków. Są to ślimaki Archimedesza ZA, ślimaki o prostoliniowym zarysie zwoju ZN1, o prostoliniowym zarysie wrębu ZN2, o prostoliniowym normalnym zarysie zwoju ZN3 oraz ewolwentowe ZI. Wymienione odmiany odpowiadają szczególnym przypadkom powierzchni śrubowej zwoju, powstałej przy ściśle określonym położeniu prostej definiującej zarys.

Ślimak Archimedesza ZA powstaje przy zerowych wartościach kątów  $\chi_N$  i  $\varphi_N$ . Osiowy zarys zwoju ślimaka dokładnie odpowiada zarysowi narzędzia i jest niezmienny dla różnej liczby zwojów, a tym samym różnej wartości kąta wzniosu linii śrubowej.

Ślimaki ZN1, ZN2 i ZN3 są kształtowane przy ustawieniu układu narzędzia odpowiadającemu przekrojowi normalnemu ślimaka. Różnica pomiędzy nimi wynika z odmiennego ustawienia krawędzi kształtującej narzędzia w stosunku do wrębu lub zwoju ślimaka. Dla typu ZN3 krawędź przesunięta jest do początku układu współrzędnych.

Odmienne przypadki stanowią ślimaki ewolwentowe ZI, który powstaje przy zerowej wartości kąta  $\chi_N$  oraz wychyleniu  $\varphi_N$ , zapewniającym styczność płaszczyzny zarysu narzędzia z walcem zasadniczym ślimaka. Dodatkowo, znamionowy kąt zarysu narzędzia  $\alpha_N$  jest równy kątowi wzniosu linii śrubowej ślimaka na średnicy zasadniczej.

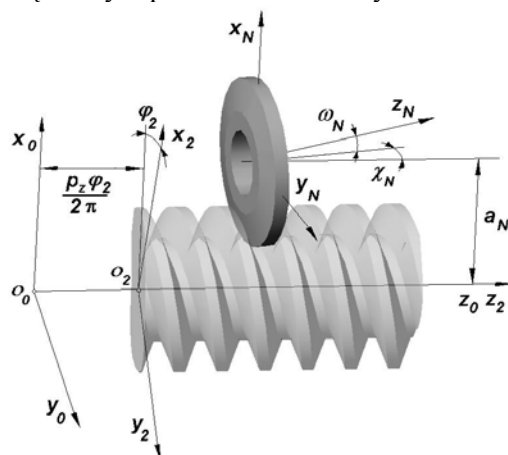
Przykładowe osiowe zarysy ślimaków jednozwojnych ZA, ZN1, ZN2, ZN3 i ZI o module 5mm oraz wskaźniku średnicowym 10 przedstawiono na rysunku 3. W obliczeniach skorygowano kąt  $\alpha_N$  tak, aby w każdym przypadku osiowy kąt zarysu ślimaka wynosił  $20^\circ$ . Umożliwia to porównanie z zarysem prostoliniowym (Archimedesza).



Rys.3. Osiowe zarysy ślimaków ZA, ZN1, ZN2, ZN3, ZI

W podobny sposób można określić współrzędne zarysu osiowego dla drugiej grupy powierzchni śrubowych, tj. definiowanych znamionowym zarysem narzędzia. Ta

grupa powierzchni może być kształtowana różnego typu narzędziami (krążkowe, trzpieniowe, pierścieniowe, garnkowe). W zależności od tworzącej narzędzia uzyskuje się ślimaki stożkopochodne (ZK) oraz torusopochodne (ZT). Można zastosować również dowolny zarys narzędzia. Kinematykę kształtowania powierzchni śrubowej ślimaka narzędziem krążkowym przedstawiono na rys. 4.



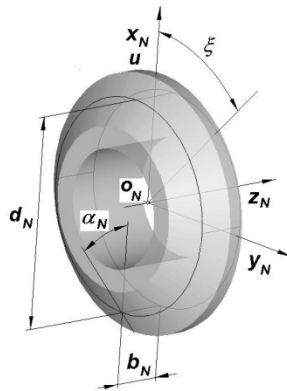
Rys. 4. Układ kinematyczny kształtowania ślimaka narzędziem krążkowym, gdzie:  $a_N$  – odległość osi ślimaka i narzędzia,  $\chi_N, \omega_N$  – kąty obrotu układu narzędzia,  $\varphi_2$  – kąt obrotu ślimaka

Równanie powierzchni śrubowej w funkcji współrzędnych powierzchni narzędzia, w tym przypadku jest następujące:

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x_N (\cos \varphi_2 \cos \omega_N + \sin \varphi_2 \sin \gamma \sin \omega_N) + y_N \sin \varphi_2 \cos \gamma + \\ &\quad + z_N (\cos \varphi_2 \sin \omega_N - \sin \varphi_2 \sin \gamma \cos \omega_N) + a_N \cos \varphi_2 \\ y_2 &= x_N (-\sin \varphi_2 \cos \omega_N + \cos \varphi_2 \sin \gamma \sin \omega_N) + y_N \cos \varphi_2 \cos \gamma + \\ &\quad + z_N (-\sin \varphi_2 \sin \omega_N - \cos \varphi_2 \sin \gamma \cos \omega_N) - a_N \sin \varphi_2 \\ z_2 &= x_N (-\cos \gamma \sin \omega_N) + y_N \sin \gamma + z_N \cos \gamma \cos \omega_N - \frac{P_z \varphi_2}{2\pi} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

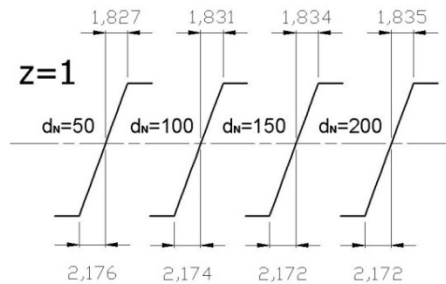
Parametry opisujące powierzchnię stożkową narzędzia krążkowego przedstawiono na rys. 5. W oparciu o dwa parametry ( $u, \xi$ ) można określić parametryczne równanie powierzchni bocznej. Zależności przedstawiają się następująco:

$$\left. \begin{aligned} x_N &= \left( \frac{d_N}{2} + u \right) \cos \xi \\ y_N &= \left( \frac{d_N}{2} + u \right) \sin \xi \\ z_N &= \frac{b_N}{2} - u \operatorname{tg} \alpha_N \end{aligned} \right\} \quad (4)$$



Rys.5. Geometria narzędzia krążkowego o zarysie prostoliniowym, gdzie:  $b_N$  – szerokość znamionowa narzędzia,  $d_N$  – średnica znamionowa narzędzia,  $\alpha_N$  – znamionowy kąt zarysu narzędzia,  $u$  – parametr powierzchni narzędzia określony na osi  $x_N$ ,  $\xi$  – kąt obrotu wokół  $z_N$  mierzony od płaszczyzny  $x_N z_N$

Do obliczeń współrzędnych powierzchni śrubowej oprócz równań (3) i (4) niezbędne jest jeszcze wyznaczenie wektorów stycznego i normalnego do powierzchni. Można je wyznaczyć z kinematyki kształtowania i geometrii narzędzia. Przyrównując współrzędną  $y_2$  (zależność 3) do zera można wyznaczyć zarys osiowy ślimaka. Przykładowy zarys jednozwojnego ślimaka dla różnych średnic narzędzia uzyskany przedstawionym sposobem pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Osiowy zarys ślimaka kształtowanego narzędziem krążkowym o prostoliniowym zarysie znamionowym

W podobny sposób można wyznaczyć współrzędne zarysu osiowego dla pozostałych przypadków definicji powierzchni śrubowych definiowanych przez zarys narzędzia.

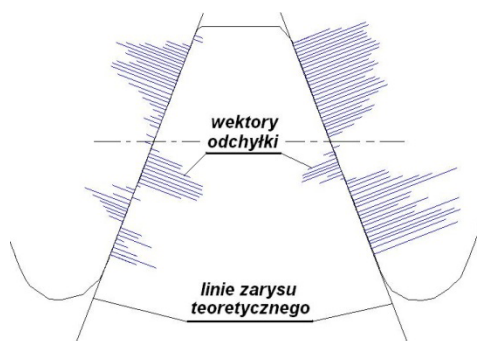
### 3. REALIZACJA POMIARU I ANALIZA WYNIKÓW

Wybór osiowego zarysu ślimaka do oceny dokładności wykonania jego uzwojenia narzuca wyznaczenie płaszczyzny przekroju osiowego. Położenie kątowe płaszczyzny wokół osi ślimaka jest dowolne; nie ma wymogu określenia miejsca przecięcia zwoju. Istotną rzeczą jest dokładne wyznaczenie osi ślimaka, do czego mogą być wykorzystane czopy łożyskowe, czy też powierzchnia wierzchołków zwoju. Przebieg pomiaru zarysu zwoju w przykładowej płaszczyźnie przekroju osiowego ślimaka na współrzędnościowej maszynie pomiarowej przedstawiono na rysunku 7.



Rys.7. Pomiar zarysu ślimaka

Uzyskane współrzędne zarysu służą do wyznaczenia rzeczywistego zarysu ślimaka, który bezpośrednio można porównać z teoretycznym zarysem odniesienia. Przykładowe zestawienie obu zarysów oraz porównanie zrealizowane w środowisku CAD przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Rozkład odchyłki kształtu zarysu dla ślimaka Archimedesesa

Z uwagi na dowolne kątowne położenie ślimaka podczas pomiaru wokół jego osi może wystąpić niezgodność położenia porównywanych zarysów. Brak pokrycia zarysów można usunąć przesuwając jeden z zarysów wzdłuż osi ślimaka. Działanie takie nie wprowadza dodatkowych błędów, gdyż w przekroju osiowym występuje powtarzalność zarysu teoretycznego zwoju ślimaka.

#### 4. PODSUMOWANIE

Spośród wielu przekrojów charakterystycznych uzwojenia ślimaków najbardziej użytecznym w pomiarach jest przekrój osiowy. Znajomość teoretycznych współrzędnych geometrii zwoju w tym przekroju pozwala na bezpośrednie ich porównanie z wynikami pomiaru, bez względu na kształt zarysu ślimaka. Przekrój ten charakteryzuje się łatwością wyznaczenia płaszczyzny pomiaru oraz łatwością względnego zestawienia porównywanych zarysów. Pomiaru mogą być zrealizowane przy użyciu uniwersalnych urządzeń i oprogramowania pomiarowego, a analiza wyników może być przeprowadzona w dowolnym środowisku CAD. Należy zaznaczyć, że znajomość teoretycznego zarysu ślimaka w przekroju osiowym pozwala również na łatwe zamodelowanie trójwymiarowej geometrii uzwojenia ślimaka w środowisku CAD. Model taki może być wykorzystany jako model odniesienia w analizach porównawczych powierzchni uzwojenia ślimaka uzyskanej drogą skanowania.

#### LITERATURA

- [1] GRZELKA M., *Współrzędnościowe pomiary kół zębatych*. W: *Pomiary Automatyka Kontrola*. vol.53, nr 9, 2007, 489-492.
- [2] DUDAS I., *Theory and Practice of Worm Gear Drives*. Elsevier 2004.
- [3] HAERTIG F., LOTZE W.: *3D Gear Measurement by CMM*. W: *Laser Metrology and Machine Performance*, nr 5, 2001.
- [4] KORNBERGER Z., *Przekładnie ślimakowe*. WNT, Warszawa, 1973.
- [5] MARCINIAK T., *Przekładnie ślimakowe walcowe*. PWN, Warszawa, 2001.
- [6] MARCINIEC A., DZIUBEK T., ZABORNIAC M., *Odtwarzanie geometrii kół zębatych z zastosowaniem WMP oraz systemu CAD*. W: *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol.56, nr 1, 2010, 61-62.



# OCENA DOKŁADNOŚCI POZYCJONOWANIA CENTRUM FREZARSKIEGO HERMLE B-300

Edward MIKO<sup>1</sup>, Michał SKRZYNIARZ<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Jednym z głównych zadań, które powinny być realizowane przez obrabiarki sterowane numerycznie jest zachowanie wysokiej dokładności i powtarzalności pozycjonowania narzędzia względem przedmiotu obrabianego [1,2]. Jest to szczególnie ważne w przypadku prowadzenia obróbki wykańczającej, gdzie oczekując szczególnie wysokiej dokładności np. w przypadku wykonywania kosztownych form, oczekiwana jest bezbłędna powierzchnia przedmiotu obrabianego [3]. Na jakość wykonania wpływa bardzo wiele czynników związanych z procesem technologicznym jak i z samą obrabiarką. Do najważniejszych czynników zaliczyć można: dokładność i powtarzalność realizowanych przemieszczeń kątowych jak i liniowych, geometryczną prawidłowość realizacji ruchów, ustawienie osi względem siebie oraz dokładność realizacji zadanych torów ruchów i ich prędkości realizacji [4]. Dokładność wykonania przedmiotu obrabianego jest bezpośrednio związana z maszyną, która została użyta do obróbki [5, 6].

Norma PN-ISO 10791-4 [7], określa przepisy związane z badaniem dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi sterowanych numerycznie (liniowych i obrotowych) centrów frezarskich, jak również podaje tolerancje obliczonych wartości na podstawie zaleceń z normy PN-ISO 203-3 [8].

Do realizacji pomiarów został wykorzystany laserowy system pomiarowy XL-80 firmy Renishaw. Zasada pomiaru przemieszczenia polega na zliczaniu liczby długości fali światła laserowego padającego na optyczny detektor. Emitowana wiązka jest rozdzielana na dwie: jedna odbita pod kątem 90°, druga zaś zostaje przepuszczona. Po odbiciu od reflektorów ponownie są łączone w jedną wiązkę [9]. W czasie pomiarów jeden z reflektorów jest nieruchomy, natomiast drugi może się przesuwać. Laserowy

---

<sup>1</sup> Politechnika Świętokrzyska, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii. Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, PL – 25314 Kielce

system rozpoznaje względne przemieszczenia pomiędzy dwoma reflektorami [9].

Dokładność liniowego pomiaru określona przez producenta systemu laserowego wynosi  $\pm 0,5 \mu\text{m/m}$  w całym zakresie pomiarowym (w zakresie temperatur  $0^\circ - 40^\circ \text{C}$ ) [10]. Wysoka dokładność pomiaru jest otrzymywana dzięki kompensatorowi XC-80, który bardzo dokładnie mierzy temperaturę powietrza, jego ciśnienie oraz wilgotność względną. Modyfikacja wartości długości fali promieniowania laserowego zapewnia praktycznie wyeliminowanie błędów pomiarów wynikających ze zmieniających się warunków pomiarowych [10].

Badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi sterowanych numerycznie zostały przeprowadzone w Laboratorium Obrabiarek Sterowanych Numerycznie na Politechnice Świętokrzyskiej. Maszyną na której przeprowadzony został test było centrum frezarskie Hermle B-300 sterowane w pięciu osiach: liniowych (X, Y, Z) i obrotowych (A, C).

## 2. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Głowica laserowa została ustawiona na specjalnym trójnogu poza obrabiarką. Dokonano zwolnienia osłony przestrzeni roboczej obrabiarki a następnie rozpoczęto procedurę ustawienia i kalibracji układów pomiarowych. Kompensator został umieszczony na obrabiarce CNC. Pomiary przeprowadzono w trzech osiach liniowych: X, Y, Z, a także w osi obrotowej C za pomocą specjalnej przystawki RX-10 do pomiarów kątowych.

### 2.1 BADANIA OSI OBROTOWEJ C

Przed przystąpieniem do realizacji badań napisano program sterujący osią obrotową C wg. przyjętego planu badań. Do ustawienia specjalnej przystawki RX-10 użyto czujnik zegarowy (rys. 2.), ponieważ musi ona znajdować się w osi obrotu stołu. Niedokładne ustawienie przyrządu pomiarowego powoduje wyjazd zwierciadeł poza zakres pomiarowy a tym samym zerwanie wiązki laserowej.

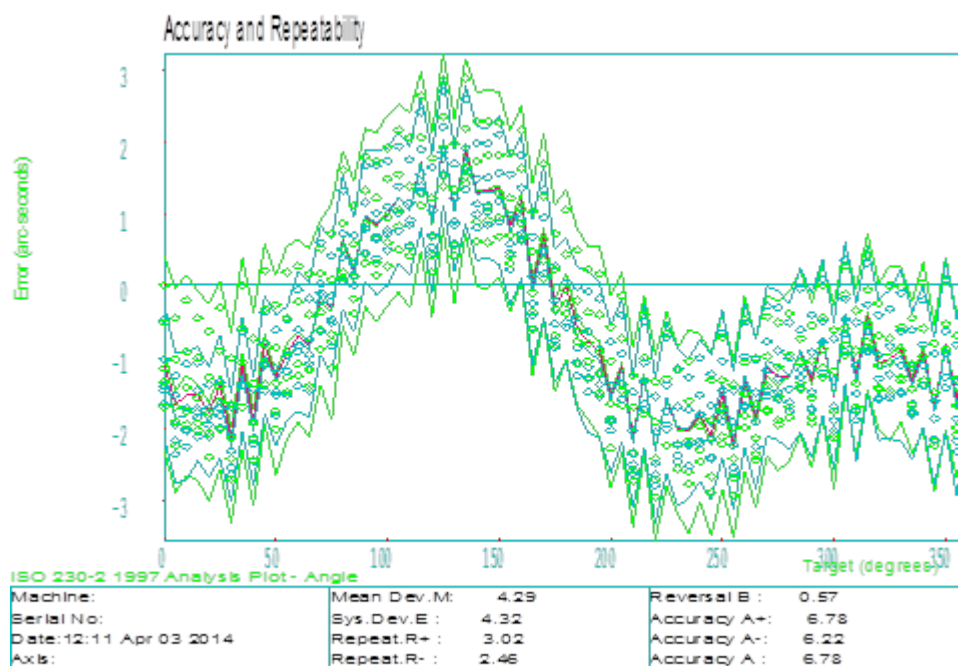


Rys. 1. Widok ustawiania przystawki pomiarowej RX-10.

Do realizacji pomiaru dokładności pozycjonowania osi obrotowej przyjęto następujące warunki:

- odstęp pomiędzy punktami pomiarowymi -  $5^\circ$ ,
- wartość wybiegu oraz nabiegu przed osiągnięciem pierwszego punktu pomiarowego -  $4^\circ$ ,
- dla każdego zadanego położenia wykonano pięć najazdów w każdym kierunku,
- postój pomiarowy w każdym punkcie - 8 sekund,
- prędkość ruchu posuwowego  $f = 1000 \text{ mm/min}$ .

Centrum frezarskie podczas przeprowadzania testu wykonywało ruchy z pewnymi niedokładnościami pozycjonowania. Błąd ten określono, przez porównanie wartości ruchów zaprogramowanych z wartościami rzeczywistymi realizowanymi przez maszynę, które zostały zmierzone za pomocą interferometru laserowego. Na rysunku 2 przedstawiono punkty zarejestrowane podczas pomiaru, a także wartości przedstawiające dokładności osi sterowanej numerycznie.

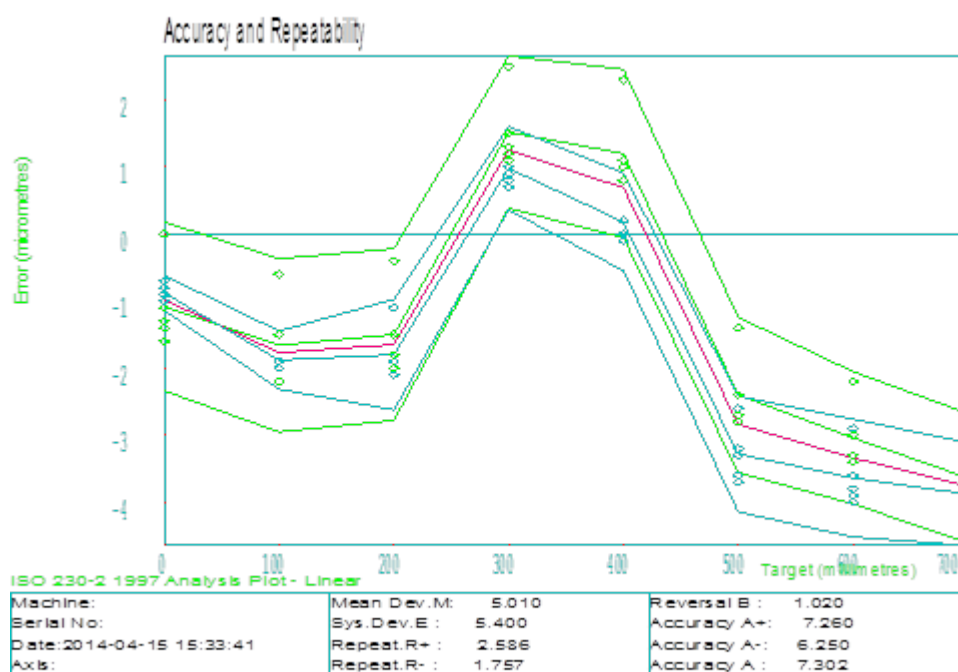


Rys. 2. Dwukierunkowa dokładność i powtarzalność pozycjonowania osi obrotowej C

Analizując powyższy wykres widać, że dwukierunkowa dokładność pozycjonowania osi obrotowej, czyli kombinacja dwukierunkowych systematycznych odchyłek i estymatora standardowej niepewności dwukierunkowego pozycjonowania z wykorzystaniem współczynnika pokrycia wynosi 6,78". Z otrzymanego wykresu odczytana wartość luzu zwrotnego opisująca największą bezwzględną wartość zwrotną we wszystkich zadanych położeniach wzdłuż lub dookoła osi wyniosła 0,57". Kolejnym ważnym parametrem opisującym stan techniczny badanej osi jest średnia dwukierunkowa odchyłka pozycjonowania opisująca, różnicę pomiędzy maksymalną a minimalną średnią dwukierunkowych odchyłek pozycjonowania w dowolnym położeniu. Przy badaniu osi C wartość ta wyniosła 4,29". Dwukierunkowa systematyczna odchyłka pozycjonowania wyrażająca różnicę pomiędzy największą i najmniejszą średnią jednokierunkowych odchyłek pozycjonowania przy najeździe z obu kierunków wyniosła 4,32". Stan techniczny badanej osi opisuje jeszcze parametr jednokierunkowej powtarzalności pozycjonowania. W wyniku przeprowadzonego eksperymentu stwierdzono, że powtarzalność ta w kierunku dodatnim wyniosła 3,02", natomiast w kierunku ujemnym 2,46".

## 2.2 BADANIA OSI LINIOWEJ X

W przypadku badania osi liniowych każdy pomiar przeprowadzono trzykrotnie. Podczas badania dokładności pozycjonowania w osiach liniowych zwierciadło stałe zostało przymocowane do stołu obrabiarki, natomiast zwierciadło ruchome przymocowano do poruszającego się wrzeciona obrabiarki. Wyniki dwukierunkowej dokładności i powtarzalności w osi X zostały zaprezentowane na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowy wykres dwukierunkowej dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi X

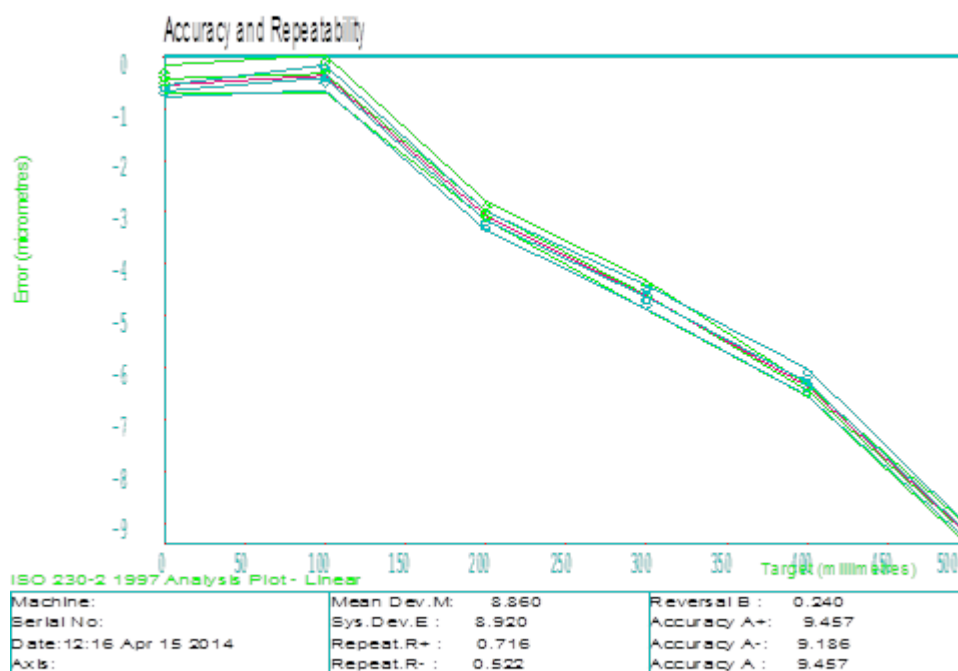
Analizując zestawione wyniki pomiarów w osi X stwierdzono, że wszystkie wartości nie wybiegają poza tolerancję określoną przez normę PN-ISO 1071-4. Z tabeli pod wykresem odczytano główne wartości:

- Dwukierunkowa dokładność pozycjonowania: 7,30  $\mu\text{m}$ ,
- Osiowa wartość zwrotna : 1,02  $\mu\text{m}$ ,
- Średnia dwukierunkowa odchyłka pozycjonowania : 5,01  $\mu\text{m}$ ,
- Dwukierunkowa systematyczna odchyłka pozycjonowania : 2,59  $\mu\text{m}$ .

Luzy w badanej osi wyniosły 0,45  $\mu\text{m}$  co pozwala stwierdzić, że obróbka prowadzona w tej osi będzie dokładna. Dwukierunkowa powtarzalność pozycjonowania wyniosła 3  $\mu\text{m}$ , co pozwoli uzyskać dużą dokładność w tej osi.

### 2.3 BADANIA OSI LINIOWEJ Y

Analizując otrzymany wykres dokładności i powtarzalności w osi Y (rys.4), zauważono, że dokładność pozycjonowania zmniejsza się wraz ze zwiększaniem się drogi przesuwu wrzeciona.



Rys. 4. Przykładowy wykres dwukierunkowej dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi Y

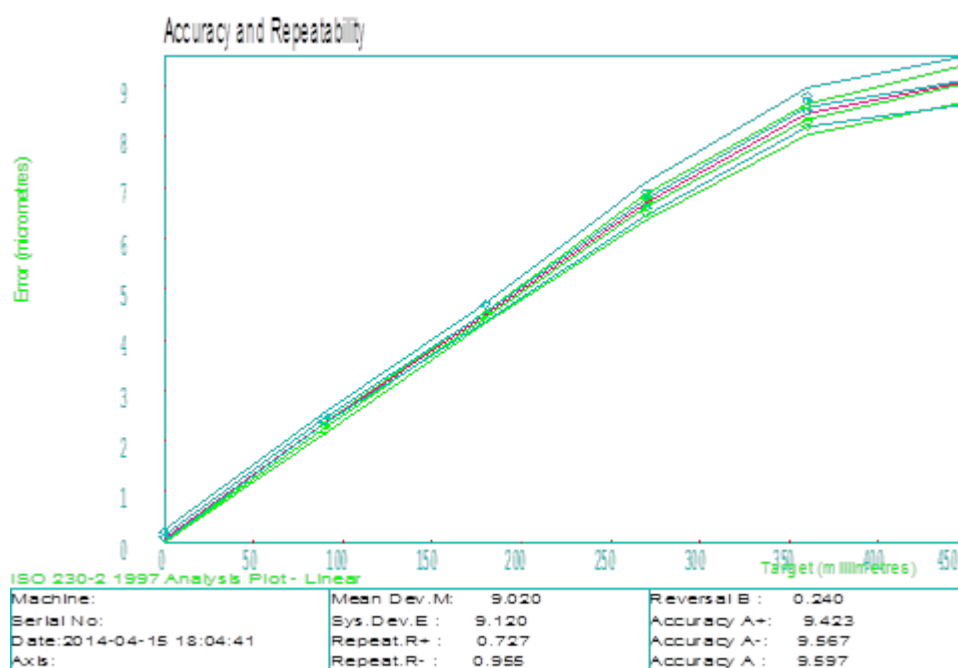
Z analizy wyników badań w osi Y zauważono, że:

- Dwukierunkowa dokładność pozycjonowania: 9,46  $\mu\text{m}$ ,
- Osiowa wartość zwrotna : 0,24  $\mu\text{m}$ ,
- Średnia dwukierunkowa odchyłka pozycjonowania : 8,86  $\mu\text{m}$ ,
- Dwukierunkowa systematyczna odchyłka pozycjonowania : 8,92  $\mu\text{m}$ .

Luzy w osi Y wyniosły 0,06  $\mu\text{m}$ , są one dużo mniejsze w porównaniu z tymi otrzymanymi w osi X. Tak samo również wartość dwukierunkowej powtarzalności pozycjonowania jest mniejsza niż w poprzedniej osi i wynosi 0,72  $\mu\text{m}$ , przez co oś Y jest dokładniejsza od badanej poprzednio. Porównując wyniki pomiarów z tolerancją podaną przez normę, stwierdzono, że zmierzone wartości nie wybiegają poza ustalony zakres.

## 2.4 BADNIA OSI Z

Przeprowadzając analizę dokładności i powtarzalności pozycjonowania w osi Z (rys 5.), widać, że dokładność pozycjonowania zmniejsza się wraz z oddalaniem się wrzeciona od płaszczyzny stołu. Największy błąd dokładności pozycjonowania występuje w krańcowej odległości od stołu, co można pominąć z racji tego, że obróbka w tym zakresie osi Z jest prowadzona bardzo rzadko lub wcale.



Rys. 5. Przykładowy wykres dwukierunkowej dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi Z

Z przeprowadzonych pomiarów dokładności i powtarzalności w osi Z stwierdzono, że otrzymane wartości mieszczą się w tolerancji podanej przez normę. Dwukierunkowa powtarzalność pozycjonowania wynosi  $0,96 \mu\text{m}$ .

Wyniki pomiarów różnią się dla każdej ze zmierzonych osi. Największą dokładność pozycjonowania odznacza się oś X a następnie oś Y i Z. Przy badaniu dwukierunkowej powtarzalności pozycjonowania stwierdzono, że najdokładniejsza pod tym względem jest oś Y, a najmniej dokładna Z. Przeprowadzone wyniki badań mogą być obciążone większym lub mniejszym błędem spowodowanym nierównoległym ustawieniem zwierciadeł względem siebie.

### 3. WNIOSKI

Analizując wyniki badań stwierdzono, że w obrabiarce nie występują błędy, które miałyby znaczący wpływ na dokładność wymiarowo-kształtową wytworzonych na niej przedmiotów. Największą dokładnością odznacza się oś X, natomiast największą powtarzalnością oś Y. W układach napędowych osi X i Z powstają nieznaczne luzy, które zaleca się wykasować. Oś obrotowa C charakteryzuje się dużą dokładnością i powtarzalnością pozycjonowania.

Wykresy dokładności i powtarzalności pozycjonowania wykazują pewne charakterystyczne strefy, gdzie dokładność pozycjonowania nie odbiega znacznie od wartości zadanej. W przypadku obróbki przedmiotów o podwyższonej dokładności zaleca się korzystanie z tych stref. W celu utrzymania wysokiej dokładności obrabiarki zaleca się przeprowadzanie systematycznych kontroli obrabiarki, a także przeprowadzenie kompensacji błędów w przypadku niezadawalającej dokładności i powtarzalności pozycjonowania.

### LITERATURA

- [1] MAJDA P., *The influence of geometric errors compensation of a CNC machine tool on the accuracy of movement with circular interpolation*. W: Advances in Manufacturing Science and Technology, vol.36, No.2, 2012.
- [2] OKAFOR A.C., ERTEKIN Y. M., *Vertical machining center accuracy characterization using laser interferometer Part I. Linear positional errors*. W: Journal of Materials Processing Technology 105, 2000, 394-406.
- [3] OTKO T., ZĘBALA W., ŚLUSARCZYK Ł., *Badania wpływu dokładności układów pomiarowych drogi w obrabiarkach CNC na dokładność obróbki*. Inżynieria Maszy, R. 15, z.3, 2010.
- [4] MIKO E. JAREMA M., *Badania dokładności pozycjonowania pionowego centrum obróbkowego*. PAK, vol. 56, 2010, 63-65.
- [5] CEDLIK M., SOKIVIC J., JURKOVIC J., *Calibration and Checking the Geometrical Accuracy of a CNC Machine-Tool*. W: Journal of Mechanical Engineering, vol. 52, 11, 2006, 752-762.
- [6] EKINOVIC S., PRACANOVIC H., BEGOVIC E., *Calibration of machine tools by means of laser measuring system*. W: Asian Transactions on Engineering, vol. 02, issue 06, 2013.
- [7] Polska Norma PN-ISO 10791-4., *Warunki badania centrów obróbkowych. Dokładność i powtarzalność pozycjonowania w osiach liniowych i obrotowych*. Marzec 1999.
- [8] Polska Norma PN-ISO 230-2., *Przepisy badania obrabiarek. Wyznaczenie dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi sterowanych numerycznie*. Marzec 1999.
- [9] HONCZARENKO J., KWAŚNIEWICZ J., *Nowe systemy pomiarowe do sprawdzenia dokładności obrabiarek CNC*. W: Mechanik nr 12/2008, 1012-1016.
- [10] Materiały reklamowe firmy Renishaw ([www.renishaw.pl](http://www.renishaw.pl)).



# **ROZWÓJ METROLOGII WSPÓLRZĘDNOŚCIOWEJ I JEJ WPLYW NA JAKOŚĆ I INNOWACYJNOŚĆ WYTWARZANIA W INŻYNIERII PRODUKCJI**

Jerzy SŁADEK<sup>1</sup>, Kamila GROMCZAK<sup>1</sup>, Marcin KRAWCZYK<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

Dostosowanie wytwarzanych produktów do obowiązującego rynku będącego zagłębieniem jakości i innowacji, stanowi niemałe wyzwanie dla zakładów produkcyjnych w dzisiejszych czasach. Wysoko postawione standardy narzucają przedsiębiorcom pracę z wykorzystaniem naukowych technologii produkcyjnych. Mowa tutaj przede wszystkim o metrologii współrzędnościowej - nauce o pomiarach geometrii obiektów ukształtowanych przestrzennie. Zapewnia ona podstawy naukowe i techniczne pomiarów i obrazowania wzorców w zakresie od makro do nano wymiarów z dokładnością wynikającą ze specyfikacji ich geometrii i czasem realizacji dostosowanym do rytmu wytwarzania. Dzięki nowym technologiom oraz rozwojowi nauki konstruuje się współrzędnościowe systemy pomiarowe (WSP), których obszar zastosowań ciągle się poszerza, a dokładność wzrasta. Współrzędnościowe systemy pomiarowe to obecnie najbardziej zaawansowane technologicznie rozwiązania stosowane w inżynierii produkcji. Praktycznie każda nowa instalacja, stanowi o wysokim poziomie rozwoju i innowacyjności zakładu przemysłowego czy laboratorium badawczego. Przyjęło się uważać ilość zastosowanych systemów współrzędnościowych, jako miernik poziomu rozwoju technologicznego nie tylko zakładu, ale i całego regionu czy kraju. Tylko najbardziej zaawansowane przedsiębiorstwa są zdolne do zaadaptowania tej technologii, gdyż obecnie generuje ona wysokie koszty zakupu i późniejszego utrzymania systemu współrzędnościowego. W naszym kraju, mimo ciągłego rozwoju mamy niskie nasycenie w współrzędnościową technikę pomiarową, konieczne są, więc inwestycje

---

<sup>1</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

wspomagane ze środków finansowych Państwa czy Unii Europejskiej. Zapotrzebowanie na specjalistów z zakresu metrologii współrzędnościowej wzrasta z roku na rok, czego dowodem są szybko rozwijające się akredytowane laboratoria wzorcujące specjalizujące się w tej technice.

## 2. WSPÓLRZĘDNOŚCIOWE SYSTEMY POMIAROWE

Metrologia Współrzędnościowa to ciągle nowy dział metrologii, zmieniający tradycyjne podejście do pomiarów długości, kąta i opisu geometrii przedmiotów, czego dowodem są nowe rozwiązania techniczne współrzędnościowych systemów pomiarowych. Najpopularniejsze z nich to współrzędnościowe maszyny pomiarowe (CMM), ramiona pomiarowe, skanery optyczne komputerowe laser tracery (rys. 1) oraz najnowsze tomografy.



Rys. 1. Współrzędnościowe systemy pomiarowe

Rozwijane systemy pomiarów i obrazowania obiektów technicznych i naturalnych umożliwiają rozwój nauki i wytwarzania obiektów od skali nano przez mikro do makro wymiarów. Obecnie graniczną wartością błędów wskazania systemu współrzędnościowego w przestrzeni trójwymiarowej nadal jest:

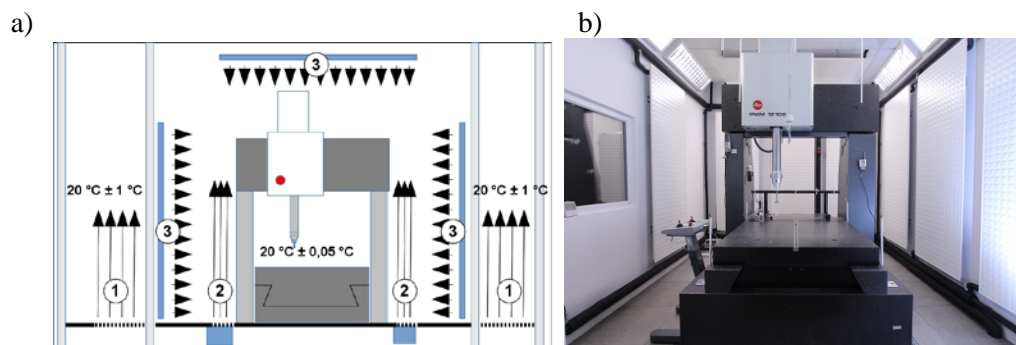
$$E = 0,1 + L / 1000 \mu\text{m} \quad (1)$$

gdzie:  $L$  – mierzona długość podawana w milimetrach.

Granice dokładności takich super maszyn wyznacza tu technologia wykonania i weryfikacji wzorców koniecznych do powiązania z jednostką danego systemu pomiarowego. Za jedną z najdokładniejszych maszyn współrzędnościowych na świecie uważany jest system holenderskiej firmy IBS ISARA 400 o potencjalnej dokładności pomiaru lepszej niż 100nm w całej przestrzeni pomiarowej czyli 400x400x100. Innym istotnym rozwiązaniem jest konstrukcja maszyny NMN-1 firmy SIOS o zakresie pomiarowym 25x25x5mm i o jeszcze mniejszych błędach granicznych i rozdzielczości 0,1 nm.

Problemem rozwoju i stosowania nie tylko nanomaszyn jest jednak brak wzorców i technologii wzorcowania co stanowi podstawowe zadanie dla rozwoju metrologii współrzędnościowej w obecnym dziesięcioleciu [3-4]. Technologiami przyszłościowymi w tym zakresie będzie wzorcowanie oparte nie o pomiar długości ale o odtwarzalne zbiory punktów referencyjnych. Konstrukcja takich wzorców jako artefaktów lub zbiorów punktów naturalnych oraz techniki ich stosowania jest obecnie kluczowym zadaniem dla metrologii współrzędnościowej [1].

Zadanie jakie stawiane jest super maszynom współrzędnościowym to zadanie wzorcowania elementów przestrzennych koniecznych dla współczesnych technologii wytwarzania. Rozwój i wzrost dokładności tych systemów limitowany jest nie tylko konstrukcją koniecznych wzorców ale lepszą zgodnością w wymaganymi warunkami – temperaturą odniesienia. Nie wystarcza już stabilność termiczna w zakresie  $\pm 0,1$  K. Wymagane są już niezwykle trudne technicznie w realizacji systemy klimatyzacji typu high w zakresie  $\pm 0,05$  K. Takie właśnie rozwiązanie zostało zrealizowane w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej. Na rys 2 zaprezentowano schemat ideowy oraz praktyczne rozwiązanie klimatyzacji typu high z umieszczoną w nim maszyną PMM12106 Leitz..



Rys. 2: a) Schemat laboratorium maszyny PMM12106 firmy Letiz w laboratorium o stabilności termicznej 0,05 °K. 1 – strefa izolująca, 2 – kurtyna powietrzna, 3 – panele wodne  
b) System klimatyzacji Hi-Accuracy w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej PK

Dzięki modernizacji również samej maszyny i zapewnieniu warunków temperaturowych możliwe będzie uzyskanie błędów granicznych dopuszczalnych systemu  $MPE = 0,4 \mu\text{m} + 0,1 \cdot 10^{-6} L$  (gdzie L jest podawane w metrach).

### 3. KIERUNKI ROZWOJU TECHNOLOGICZNEGO METROLOGII WSPÓLRZĘDNOŚCIOWEJ W INŻYNIERII PRODUKCJI

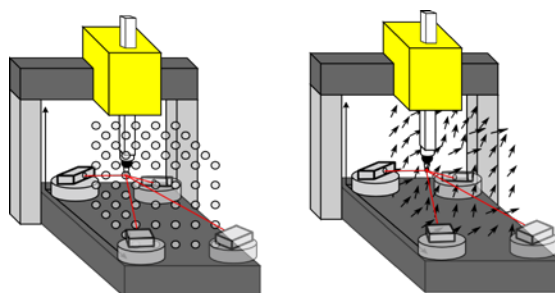
Metrologia współrzędnościowa intensywnie rozwijana jest w skali nano, obecnie projektowane są systemy na potrzeby rozwijającego się przemysłu MEMS i OEMS, niezbędne dla konstrukcji mikro maszyn i robotów oraz optyki, elektroniki, mikromechaniki czy inżynierii biomedycznej. Należy oczekiwać, że pokonana zostanie granica błędu wskazania  $E = 0,1 + L/1000 \mu\text{m}$  w zakresie nie tylko konstrukcji ale i wzorcowania, a dla takich systemów jak nanomaszyna NMN-1 firmy SIOS potwierdzona zostanie ich dokładność w obszarze 3D w granicach  $E \leq 10\text{nm}$ . Istotny też będzie trend rozwoju systemów multisensorycznych z wyraźnym odchodzeniem od dominujących pod względem dokładności technologii stykowych na rzecz laserowych systemów bezstykowych o dokładnościach odtworzenia punktu lepszych od 10 nm. W klasycznych maszynach przemysłowych właśnie realizowany jest pomiar multisensoryczny z uzyskaniem tej samej dokładności przestrzennej dla wszystkich systemów stykowych i bezstykowych z błędem wskazania poniżej  $E = 0,1 + 0,6 \cdot 10^{-6} L$ .

Rozwój oraz miniaturyzacja zarówno systemów laserowych, systemów opartych na świetle strukturalnym oraz innych systemów bezstykowych powoduje, iż głowica jaką dzisiaj znamy tj. klasyczna stykowa, w przypadku maszyny pomiarowej, będzie tylko jedną z możliwych do wyboru alternatyw. Zatem można przewidywać, że maszyny multisensoryczne w najbliższym czasie skrócą znacząco czas pomiaru. Ponadto oprogramowanie metrologiczne będzie musiało umożliwić pomiar przy wykorzystaniu wielu różnych głowic pomiarowych oraz powiązać ze sobą elementy mierzone różnymi technikami.

Zauważalny w ostatnich latach rozwój technologii tomografii komputerowej to większe zakresy pomiarowe i uzyskanie potwierdzonej wzorcowaniem dokładności  $E=1+L/1000 \mu\text{m}$  dla litych materiałów o gęstości stali dla grubości ścianek przedmiotu powyżej 150 mm. Należy tutaj podkreślić fakt, iż tomografia komputerowa najlepiej odzwierciedla możliwości współrzędnościowej techniki pomiarowej – zobrazowania geometrii mierzonego elementu jako zbioru punktów.

Istotny jest też rozwój systemów redundantnych - ramion pomiarowych, laser trackerów oraz metod opartych o multiulaterację i metod wzorcowania pozwalających na uzyskanie błędu wskazania poniżej  $E = 5 \mu\text{m} + 0,6 \cdot 10^{-6} L$ . Ważnym kierunkiem rozwoju systemów w skali makro są właśnie systemy laser trackerów o zakresach obecnie do 50 -100 metrów oraz systemów zaopatrzonych w układy śledzące położenie końcówek pomiarowych (T- Probe Leica).

W obszarze wszystkich systemów współrzędnościowych koniecznym staje się opracowanie nowych systemów softwarowej korekcji dokładności i odejście od klasycznego systemu składowych geometrycznych kinematyki systemu pomiarowego co pokazano na Rys. 3. Należy sądzić że istotna rolę odegrają tu systemy laser tracerów konstrukcji firmy Etalon AG o dokładności  $E=0,2 +0,3L/1000 \mu\text{m}$  oraz nowoczesne systemy softwarowej interpolacji [2].



Rys. 3. Idea systemów korekcji dokładności opartych o punkty referencyjne i wykorzystanie laser tracerów [1]

#### 4. LABORATORIA WZORCUJĄCE POMIARÓW WSPÓLRZĘDNOŚCIOWYCH ROZWIĄZANIEM DLA ZAKŁADÓW PRZEMYSŁOWYCH

Korzystanie z usług laboratoriów wzorcujących w zakresie wzorcowania posiadanych współrzędnościowych systemów pomiarowych i wzorców odniesienia techniką współrzędnościową, stanowi podstawę do oceny dokładności pomiarów przemysłowych i tym samym orzekania o zgodności ze specyfikacją geometrii wyrobu. W ostatnich latach można zauważyć wzrost zainteresowania wzorcownikami przeprowadzanymi przez laboratoria akredytowane. Systemy zarządzania jakością stosowane w przedsiębiorstwach narzucają kierownictwu i użytkownikom współrzędnościowych systemów pomiarowych spełnienie wymagań w zakresie ich należytego nadzorowania i okresowego wzorcowania. Użytkownicy współrzędnościowych systemów pomiarowych nadal często korzystają z usług serwisu producenta sprzętu pomiarowego w zakresie wzorcowania swoich systemów zamiast powierzać im tylko adiustacje i obsługę okresową a weryfikować spełnienie wymagań odnośnie dokładności i powiązania z jednostką systemu pomiarowego niezależnemu akredytowanemu laboratorium wzorcującemu. Błędnie i niezgodnie z wymogami powierza się te obie rozłączne czynności serwisowi producenta. Takie postępowanie wpływa drastycznie na zdolność systemów pomiarowych i w konsekwencji systemu wytwarzania. W Polsce, w odróżnieniu od krajów bardziej rozwiniętych, mamy jeszcze wiele do poprawy. Szczególną rolę spełniają tu coraz powszechniejsze wymagania specyficzne dla grup wytwórców np. VDA 5 (nie.

*Verband der Automobilindustrie*, Band 5) w zakresie MSA (ang. *Measurement System Analysis*) oraz świadomi zadań audytorzy systemowi. Poruszany problem wiąże się z szerszym zagadnieniem jakim jest tzw. kultura metrologiczna w obszarze współczesnego przemysłu. Tu kamienie milowe to właściwy – racjonalny dobór systemów pomiarowych posilkujący się zasadą Berndta, wybór właściwej i specyficznej przedmiotowo strategii pomiarowej, nadzorowanie okresowe dokładności systemów pomiarowych poprzez wyznaczanie i potwierdzanie obszaru błędów granicznych dopuszczalnych MPE (ang. *Maksimum Permissible Error*) i w końcu wyznaczanie niepewności dla poszczególnych zadań pomiarowych jako podstawy o orzekaniu o zgodności ze specyfikacją geometrii wyrobu (GPS ang. *Geometrical Product Specification*) Wspomaganie rozwoju kultury metrologicznej wyznacza zadania dla Głównego Urzędu Miar, akredytowanych laboratoriów wzorcujących oraz szkół wyższych czy instytutów badawczych dostarczających nowoczesnych technologii pomiarowych i wzorcujących. Jest to bardzo ważne dla intensywnie rozwijającej się metrologii współrzędnościowej korzystającej z rozwiązań technicznych z obszaru *Hi-Tech*. Szczególną rolę w tym zakresie pełni Polskie Centrum Akredytacji potwierdzające kompetencje techniczne laboratoriów wzorcujących w zakresie metrologii współrzędnościowej posiadających wdrożony system zarządzania wg ISO 17025 i tym samym gwarantujących jakość i jednoznaczność przekazywanych wyników wzorcowania z zapewnieniem tak kluczowej spójności pomiarowej.

## 5. PODSUMOWANIE

Produkcja przemysłowa wspierana procesami pomiarowymi techniką współrzędnościową gwarantuje przede wszystkim dokładność wykonania i konkurencyjną jakość finalnego wyrobu. Fakt ten jest już powszechnie znany, dlatego też coraz więcej zakładów przemysłowych wychodzi naprzeciw innowacjom i inwestuje we współrzędnościowe systemy pomiarowe a laboratoria wzorcujące doskonalą swoje metody poprzez ich walidację oraz spełnienie kompetencji technicznych zgodnie z normą ISO 17025 i akredytację.

Źródła norm i opracowań z zakresu metrologii współrzędnościowej, będące podstawą stosowanych w laboratoriach metod wzorcujących, są stale poszerzane o liczne badania prowadzone w międzynarodowych ośrodkach naukowych a w kraju przez coraz lepiej wyposażone laboratoria uczelniane w tym m.in. w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej jako jednostki naukowej i jednocześnie akredytowanego laboratorium wzorcującego.

#### LITERARURA

- [1] SŁADEK J., *Dokładność pomiarów współrzędnościowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2011.
- [2] SŁADEK J, GAŚKA A., OLSZEWSKA M, KUPIEC R., KRAWCZYK M., *Virtual coordinate measuring machine built using lasertracer system and spherical standard*. W: *Metrology and Measurement System*, Vol. XX, no 1, 2013, 77-86.
- [3] DONKER R., WIDDERSHOVEN I., BROUNS D., SPAAN A. M., *Realization of ISARA 400: A large Measurement Volume Ultra-Precision CMM*, *Advances in Coordinate Metrology*, Monograph edited by J. Sładek and W. Jakubiec, University of Bielsko-Biała (2010), 50-56.
- [4] WECKENMANN A., *Koordinatenmesstechnik, Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*, Hansen, 2012.

# **NADAŻNY SYSTEM KOREKCJI POZYCJI ROBOTA W SYSTEMIE DO NAPAWANIA LASEROWEGO DETALI WIELKOGABARYTOWYCH**

Maciej STANKIEWICZ<sup>1</sup>, Mariusz MRZYGLÓD<sup>1</sup>, Jacek REINER<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

### **1.1. NAPAWANIE LASEROWE**

Napawanie laserowe należy do grupy metod generatywnych, stosowanych do nakładania, modyfikacji lub uszlachetniania istniejących powierzchni, poprzez zmianę ich właściwości fizykochemicznych. Technologia ta polega na wprowadzeniu dodatkowego materiału, najczęściej w postaci drutu lub proszku, w miejsce oddziaływania wiązki laserowej, gdzie następuje jego stapianie z materiałem bazowym tworząc napoinę o szerokości do kilku milimetrów [1]. Najczęściej w zautomatyzowanym stanowisku do manipulacji głowicą napawającą stosuje się obrabiarki wieloosiowe lub roboty. Gdy przedmiotem obróbki są duże obiekty, które podlegają odkształceniom w wyniku oddziaływań termicznych oraz dodatkowej masy proszku, jakość uzyskanej warstwy napawanej bywa nieprawidłowa. W takim przypadku konieczne jest nadażne sterowanie procesem obróbki, bazujące na pomiarach odkształceń obiektu.

### **1.2 DEFORMACJE GEOMETRYCZNE NAPAWANEGO ELEMENTU**

Gdy obiektem obróbki laserowej technologią napawania są elementy wielkogabarytowe, np.: panele termiczne o długości 6m i szerokości 0,8m, zamocowane obrotowo w uchwytach zainstalowanych na ich końcach, podlegają one deformacjom głównie ze względu na ich ugięcie grawitacyjne wynikające ze sposobu montażu, ale także ze względu na stopniowo nakładaną masę napoiny oraz naprężenia

---

<sup>1</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, 50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27



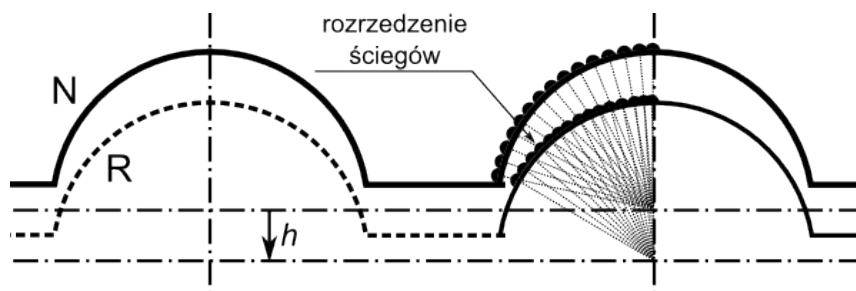
termiczne wynikające z miejscowego dostarczania dużej energii cieplnej z lasera o mocy 4kW. W trakcie procesu napawania laserowego obiekt podlegający obróbce w sposób znaczny odkształca się, co uniemożliwia wykorzystanie statycznej trajektorii przejazdu głowicy napawającej. Konieczne jest zatem opracowanie systemu nadążnej korekcji pozycji głowicy napawającej, w zależności od aktualnej pozycji i orientacji lokalnej powierzchni napawanej.

W artykule przedstawiono system nadążnej korekcji pozycji robota prowadzącego proces napawania laserowego, który dokonuje skanowania powierzchni za pomocą układu triangulacyjnego. Uzyskane obrazy profili powierzchni, umożliwiają ekstrakcję cech obiektu, ocenę ich jakości z zastosowaniem algorytmów stabilizujących i filtra Kalmana w celu określania skorygowanej pozycji i orientacji głowicy obróbkowej dla sterownika robota.

## 2. ANALIZA TEORETYCZNA

### 2.1. WYMAGANIA

W przypadku napawania obiektów o skomplikowanej geometrii (rys. 1), zapewnienie prostopadłości wiązki względem obrabianej powierzchni jest warunkiem jednakowej grubości nanoszonej warstwy. Gdy występuje kolizyjność między głowicą a obiektem, wówczas zachodzi konieczność obróbki kątowej, w przypadku której korekcji podlega trajektoria ruchów głowicy. Jednak, gdy powierzchnia napawana ulega przesunięciu względem głowicy, odległości między sąsiadującymi napoinami się zmieniają, co skutkuje wadami równomierności a nawet brakiem szczelności powłoki.



Rys. 1. Zmiana pozycji ściegu napoiny wynikająca z nieskompensowanego ugięcia obiektu napawanego (N- nominalny kształt obiektu, R – obiekt ugięty,  $h$  – strzałka ugięcia)

Zapewnienie szczelności powłoki wymaga zakładkowego układania poszczególnych spoin (30-50%). W analizowanym przykładzie nakładanie kolejnych ścieżek napoin musi być realizowane z dokładnością  $r_x=3\text{mm}$  w płaszczyźnie prostopadłej do wiązki lasera. Dzięki zastosowaniu głowicy o dużej długości

Rayleigha i specjalnej dyszy kształtującej strumień proszku, odległość głowicy od powierzchni panelu (wzdłuż wiązki), nie jest tak krytyczna, i zadowalająca jest dokładnością do  $r_z=5\text{mm}$ . Kluczowe jest zatem pozycjonowanie głowicy nie tylko w zadanej odległości od panelu, ale także w punkcie, w płaszczyźnie prostopadłej do jej osi. Jak wskazano wyżej, w przypadku powierzchni podlegających odkształceniom, korekcja pozycji z użyciem wyłącznie czujnika odległości nie będzie w stanie kompensować błędów prowadzenia ściegu w przypadku, gdy napawanie odbywa się pod pewnym kątem w stosunku do strzałki ugięcia, co przedstawiono na rys. 1.

## 2.2 WYKORZYSTANIE SYSTEMÓW WIZYJNYCH DO PROWADZENIA ROBOTÓW

W praktyce przemysłowej od wielu lat wykorzystuje się systemy wizyjne do nadążnego sterowania pozycją robota. Najczęstszym ich zastosowaniem jest pozycjonowanie podczas chwytu, śledzenie szczeliny podczas spawania lub geometrii podczas cięcia itp. Stosuje się w tym celu systemy wizyjne 2D [2], [3], lub 3D, np. oparte o stereowizję [4], [5]. W przypadku aplikacji związanych z prowadzeniem narzędzia często wykorzystuje się sensory oparte o metodę triangulacji laserowej [6]–[8]. Pomiar w tym przypadku polega na wyznaczeniu na obrazie triangulacyjnym kształtu profilu świetlnego powstałego w wyniku projekcji płaszczyzny światła na powierzchnię odwzorowywanego obiektu. Kształt profilu niesie informację o geometrii 3D pojedynczego przekroju obiektu [9]. Alternatywnie proponuje się także wykorzystanie światła powstającego w procesie (emisyjność plazmy) dla celów pomiarowych [10].

Powyższe metody nie umożliwiają jednak korekcji pozycjonowania głowicy w taki sposób, aby zapewnić jej niezmiennosć względem odkształcającej się powierzchni podczas obróbki.

## 3. OPRACOWANIE ROZWIĄZANIA

### 3.1 ARCHITEKTURA ORAZ KOMPONENTY SYSTEMU

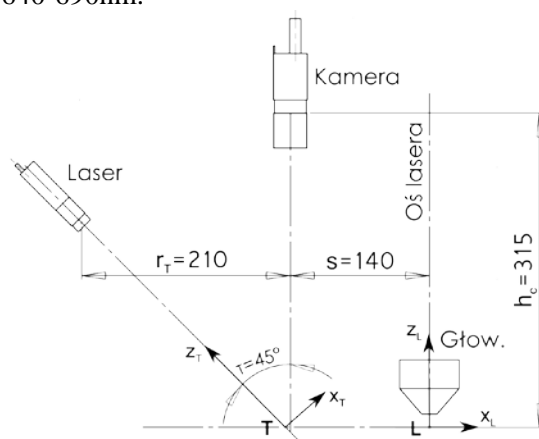
Do określenia prawidłowej pozycji głowicy napawającej względem przedmiotu obrabianego został zastosowany system wizyjny w układzie triangulacyjnym. Rozwiązanie takie odwzorowuje profil 3D elementu, który dostarcza zarówno informacji o odległości, ale także o orientacji obiektu w płaszczyźnie obróbki. Ponadto, zastosowanie światła laserowego do oświetlenia powierzchni zwiększa odporność układu na zakłócenia od emisyjności plazmy oraz rozbłyski.

Dla uzyskania wystarczającej rozdzielczości w płaszczyźnie X-Y (błąd max.  $r_x < 0,3\text{mm}$ ) przy założonym polu widzenia wzdłuż linii laserowej  $FOV_y = 250\text{mm}$  i odległości roboczej  $h_c > 300\text{mm}$ , zastosowano kamerę monochromatyczną o rozdzielczości  $1024 \times 1280\text{px}$ , uzyskując rozdzielczość w osi Y:  $250\text{mm}/1280\text{piksel}$

= 0,195mm/piksel.

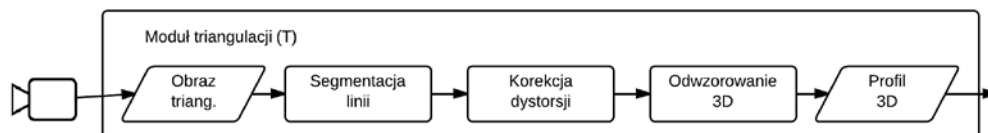
Dla takiej kamery dobrano obiektyw o ogniskowej  $f=8\text{mm}$ , a następnie obliczono optymalną geometrię triangulacyjną, tj. kąt nachylenia kamery i projektora laserowego względem sceny. Konfigurację ostateczną układu przedstawiono na rys. 2.

Ze względu na bezpośrednią bliskość promieniowania plazmy, zastosowano projektor linii laserowej o mocy 50mW i długości fali 660nm oraz dodatkowy filtr pasmowoprzestawowy 640-690nm.



Rys. 2. Układ triangulacyjny zastosowany do nadążnego systemu korekcji pozycji robota do napawania  
3.2 ANALIZA OBRAZÓW

Do obliczenia prawidłowej pozycji i orientacji głowicy napawającej konieczne jest zinterpretowanie danych uzyskanych z systemu wizyjnego, którego algorytm działania pokazano na rys. 3. Obraz triangulacyjny podlega w pierwszej fazie procesowi segmentacji, którego zadaniem jest identyfikacja punktów środkowych całego profilu świetlnego. Ponieważ na obrazie widoczne są zniekształcenia i nieciągłości linii związane z charakterem powierzchni, dlatego pierwszą operacją jest ujednorodnienie linii. Jest ono realizowane poprzez rozmycie gaussowskie obrazu z elementem strukturalnym o rozmiarze  $9 \times 9$  pikseli. Operacja ta stabilizuje segmentację bazującą na algorytmie środka ciężkości. Dla poprawy odporności na zakłócenia zaimplementowano segmentację kierunkową, tj. wyszukanie wyłącznie pierwszego maksimum. Wybór taki wynika z faktu, że zakłócenia pojawiają się w większości przypadków wyłącznie po jednej stronie profilu laserowego [9].



Rys. 3. Schemat przekształceń triangulacyjnych

### 3.3 REKONSTRUKCJA 3D

Wynikiem działania algorytmów analizy obrazów jest zbiór punktów  $P$  w układzie współrzędnych obrazu U-V. Muszą one zostać skorygowane, dla usunięcia wpływu dystorsji ( $D^{-1}$ ), a następnie przeliczone do układu współrzędnych głowicy laserowej, przez przemnożenie z macierzą homografii  $\mathbf{H}$  i rzutowane na płaszczyznę Y-Z układu współrzędnych  $\mathbf{L}$  (rys. 2) zgodnie z równaniami (1-3).

$$P' = \begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = D^{-1}\{P\} \quad (1)$$

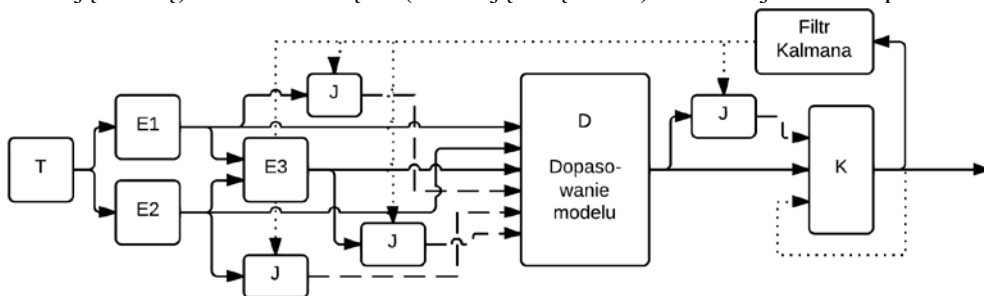
$$P_T = \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ 1 \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix}, s = \frac{1}{w'} \quad (2)$$

$$P_L = \begin{bmatrix} 0 \\ y'' \\ x'' \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Do prawidłowego odwzorowania 3D punktów z obrazów triangulacyjnych konieczne jest przeprowadzenie tzw. kalibracji układu triangulacyjnego, której celem jest wyznaczenie parametrów dystorsji, macierzy homografii oraz parametrów transformacji układów współrzędnych [11].

### 3.4 STABILIZACJA WYNIKÓW POMIARÓW

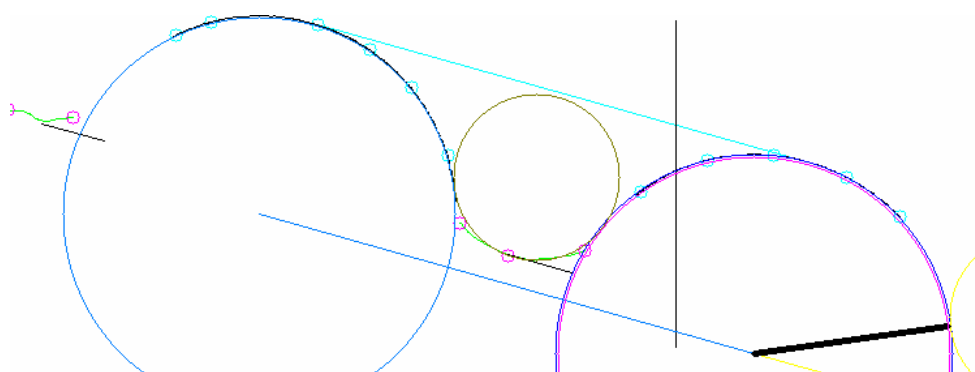
Dzięki przeliczeniom opisanym w rozdz. 3.3 (T) znany jest przekrój 3D napawanego przedmiotu w układzie współrzędnych głowicy napawającej. Ze zbioru odwzorowanych punktów wyznaczane są prymitywy geometryczne, które można dopasować do modelu. W przypadku napawania zespołu rur są to łuki wypukłe (obrazujące rurę) oraz łuki wklęsłe (obrazujące łączniki) oraz wzajemne ich położenie.



Rys. 4. Schemat algorytmu dopasowania punktów profilu do uproszczonego modelu ze stabilizacją

Proces określania położenia elementu obrabianego (rys. 4) rozpoczyna się zatem od identyfikacji cech, tj. pozycji kolejnych prymitywów: rur (E1) i płaskowników (E2). Następnie obliczone jest ich wzajemne położenie (E3). Dla każdej z cech wyznaczany jest współczynnik jakościowy (J), który określa zgodność parametrów kształtu z modelem. Z tak wyznaczonych cech przedmiotu wraz z ich współczynnikami jakościowymi budowany jest jego uproszczony model (D) w przestrzeni rzeczywistej w układzie współrzędnych kamery.

W kolejnych iteracjach algorytmu do oceny zidentyfikowanego modelu wchodzi wartości, które są filtrowane przez filtr Kalmana z poprzednich iteracji, zamykając pętlę sprzężenia zwrotnego [12].



Rys. 5. Model dopasowany do zmierzonego profilu (widok z aplikacji)

Ważnym elementem algorytmu poprawiającym stabilność wyników jest tzw. kumulator (K). Ze względu na to, że w trakcie procesu zarejestrowane przez kamerę obrazy mogą posiadać zakłócenia w postaci rozbłysków światła odbitego lasera procesowego oraz odprysków (iskry) od samego procesu, to wyznaczone cechy oraz model przedmiotu mogą być zakłócone. Ocenę stopnia zakłócenia umożliwiają parametry jakościowe. W czasie jednego cyklu korekcyjnego głowicy napawającej, realizowane są 3-10 cykle pomiarowe, w zależności od prędkości przemieszczania robota. Kumulator uśrednia wyniki z poszczególnych cykli wagowo w zależności od współczynnika jakościowego. Działanie opracowanego kumulatora opisują równania (5) i (6):

$$\mathbf{K}[i] = \begin{cases} \mathbf{M}_{out}[i] = \mathbf{M}_{in}[i] \frac{\mathbf{J}_{in}[i]}{\mathbf{J}_{in}[i] + \mathbf{J}_{out}[i-1]} + \mathbf{M}_{out}[i-1] \frac{\mathbf{J}_{out}[i-1]}{\mathbf{J}_{in}[i] + \mathbf{J}_{out}[i-1]} \\ \mathbf{J}_{out}[i] = \frac{k(\mathbf{J}_{in}[i] + \mathbf{J}_{out}[i-1])}{1 + \mathbf{J}_{in}[i]\mathbf{J}_{out}[i-1]} \end{cases} \quad (4)$$

$$\mathbf{K}[0] = \begin{cases} \mathbf{M}_{out}[0] = \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_{out}[0] = \mathbf{0} \end{cases} \quad (5)$$

gdzie:  $\mathbf{K}[i]$  – stan kumulatora w  $i$ -tej iteracji,  $\mathbf{M}_{in}[i]$ ,  $\mathbf{M}_{out}[i]$  – wektory parametrów modelu wejściowego i wyjściowego w  $i$ -tej iteracji,  $\mathbf{J}_{in}[i]$ ,  $\mathbf{J}_{out}[i]$  – wektory jakości parametrów modelu wejściowego i wyjściowego w  $i$ -tej iteracji,  $k$  – współczynnik wiarygodności poprzednich pomiarów ( $\approx 0,95$ ).

Na podstawie modelu rzeczywistego położenia przedmiotu, aktualnego położenia głowicy i określeniu żadanego położenia punktu napawania na przedmiocie, obliczana jest orientacja głowicy napawającej w globalnym układzie współrzędnych, która jest wartością zadaną dla sterownika robota.

#### 4. TESTY STANOWISKA

Dla weryfikacji działania powyższego systemu opracowano prototyp funkcjonalny układu triangulacyjnego i zamontowano go na robocie. Został on podłączony do sterownika.

Do przemieszczania głowicy napawającej wykorzystany został robot ABB. Jak wykazały testy, zgodność odczytywanej pozycji robota z jego pozycją aktualną, uzależniona jest od prędkości przemieszczenia głowicy obróbkowej. Przy prędkości 80mm/s błąd odczytu waha się w granicach 1÷3mm a przy 800mm/s błąd sięga już 7÷11mm. Powyższe błędy są wynikiem opóźnienia w układzie sterowania, komunikacji i interpretacji danych.

Dlatego zaproponowano zmniejszenie częstości korekcji pozycji głowicy oraz rozbicie przejazdu wzdłuż napawanego obiektu na odcinki składające się z fazy przejazdu (zmiany położenia robota w płaszczyźnie XY) i fazy pomiaru (przy niezmiennym położeniu w płaszczyźnie XY i ruch wyłącznie w osi Z systemem jezdny) gdzie będzie określane położenie dla kolejnego punktu dla fazy przejazdu. Długość odcinka dla fazy przejazdu określono na poziomie 30mm i około 60mm dla fazy pomiaru dla prędkości napawania 100mm/s. Dla tak przyjętych wartości dokładność pomiaru pozycji jest o rząd wielkości większa niż dokładność odczytu pozycji z układu pomiarowego robota.

#### 5. PODSUMOWANIE

Dla poprawy jakości procesu napawania laserowego obiektów wielkogabarytowych, które podlegają odkształceniom w czasie obróbki, opracowano system sterowania nadążnego. Uzyskuje on informacje o odkształconym obiekcie za pomocą sensora triangulacyjnego o podwyższonej odporności na zakłócenia związane z obróbką laserową. Opracowany system pomiarowy umożliwia pomiar odległości, jak i orientacji głowicy względem odkształconej powierzchni napawanej. Algorytm

stabilizacji wyników pomiarów oparty o filtr Kalmana zapewnia poprawę odporności na zakłócenia i poprawę dokładności pozycjonowania. Dzięki zastosowaniu nadążnego systemu korekcji pozycji robota do napawania obiektów wielkogabarytowych udało się skompensować zmiany kształtu geometrycznego obiektu napawanego w zakresie 20mm, przy dokładności nakładania kolejnych ściegów napoiny  $\pm 0,9$ mm, dzięki czemu całość obiektu jest pokrywana równomierną warstwą powłoki.

*Prace zrealizowano w ramach działalności statutowej Katedry Technologii Laserowych, Automatyzacji i Organizacji Produkcji, Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej.*

#### LITERATURA

- [1] KLIMPEL A., *Napawanie i Natryskiwanie Ciepłne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000.
- [2] IAKOVOU D. et al., *Integrated sensors for robotic laser welding*. W: Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing 2005, 2005, 1-6.
- [3] ZHANG J. et al., *Improving robustness of robotic grasping by fusing multi-sensor*. 2012 IEEE Int. Conf. Multisens. Fusion Integr. Intell. Syst., 2012, 126-131.
- [4] RYBERG A. et al., *Stereo vision for path correction in off-line programmed robot welding*. 2010 IEEE Int. Conf. Ind. Technol., 2010, 1700-1705.
- [5] WANG J. et al., *Multi-Pass Weld Profile Detection for Spherical Tank Through 'Quasi Double Cameras' Stereovision Sensor*, 2004, 376-379.
- [6] HATWIG J. et al., *An automated path planning system for a robot with a laser scanner for remote laser cutting and welding*. W: Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2012, 1323-1328.
- [7] SHI Y., WANG G., *Adaptive Robotic Welding System Using Laser Vision Sensing for Underwater Engineering*. vol. 00, 2007, 1213–1218.
- [8] WU J. et al., *Weld bead placement system for multipass welding*. IEE Proc. - Sci. Meas. Technol., vol. 143, no. 2, 1996, 85–90.
- [9] M. STANKIEWICZ, *Metoda triangulacji laserowej odporna na refleksy świetlne dla kontroli jakości geometrii wyrobu*. Praca doktorska, Politechnika Wroclawska, 2013.
- [10] LIU X., XIE C., *Robotic Seam Tracking by Utilizing Arc Light*. Sixth Int. Conf. Intell. Syst. Des. Appl., vol. 2, 2006, 616–621.
- [11] REINER J., STANKIEWICZ M., *Elimination of geometrical image distortion for laser triangulation*. w: Pomiar, Automatyka, Kontrola, no. 1, 2010, 54–57.
- [12] STANKIEWICZ M. et al., *Positioning of scanned part inside of the laser triangulation system*. W: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII, 2011.

# **ANALIZA DOKŁADNOŚCI POMIARU CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI ZA POMOCĄ PRZENOŚNEGO PROFILOMETRU**

Krzysztof STĘPIEŃ<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

Chropowatość jest niezwykle istotną składową strukturą geometrycznej powierzchni i bardzo znacząco wpływa na własności funkcjonalne części maszyn [1]. Dlatego poprawny pomiar różnego rodzaju parametrów chropowatości jest zagadnieniem szczególnie ważnym biorąc pod uwagę wymagania wzrastające wymagania dotyczące jakości wytwarzanych części maszyn i urządzeń [2]. Analiza problemu pomiaru chropowatości dotyczy na przykład wpływu końcówki pomiarowej na wyniki pomiaru. Inne prace obejmują zagadnienia związane z wpływem materiałów narzędzi skrawających na chropowatość skrawanej powierzchni [3, 4].

Obecnie, na skutek rozwoju metod trójwymiarowej analizy struktury geometrycznej powierzchni badacze zajmują się także digitalizacją wyników pomiarów [5] oraz definiowaniem parametrów odpowiednich do ilościowej oceny chropowatości trójwymiarowego obrazu powierzchni [6].

Do pomiaru w warunkach produkcyjnych, w tym bezpośrednio na stanowisku roboczym bardzo dobrze nadają się przenośne profilometry. Są to przyrządy opierające się zazwyczaj na wykorzystaniu metody stykowej. Z reguły cechują się one zwartą konstrukcją, małą masą i możliwością łatwego transportowania ich na stanowisko, gdzie ma być przeprowadzany pomiar. Łatwość transportowania i przeprowadzania pomiaru jest główną zaletą przenośnych profilometrów. Ich wadą jest jednak to, że na wynik pomiaru może mieć wpływ wiele czynników zewnętrznych [7]. Jednym z takich czynników są np. błędy operatora przyrządu. Z tego względu istnieje potrzeba przeprowadzenia badań dotyczących dokładności pomiaru

---

<sup>1</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Al. 1000-lecia P. P. 7, 25-314 Kielce

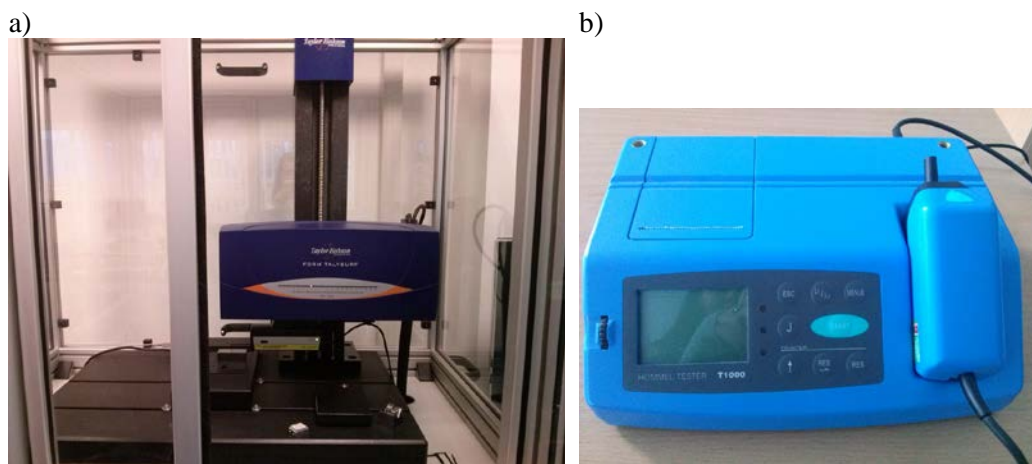


chropowości za pomocą przenośnych profilometrów. W artykule niniejszym przedstawiono propozycję metodologii oceny dokładności tego typu urządzeń oraz wyniki badań eksperymentalnych w oparciu o opracowaną procedurę postępowania.

## 2. METODYKA BADAŃ

Badania eksperymentalne miały na celu praktyczną ocenę dokładności pomiaru chropowości za pomocą profilometru przenośnego. W tym celu zmierzono wybrane parametry chropowości powierzchni płytki stalowej frezowanej za pomocą obrabiarki sterowanej numerycznie firmy DMG. Liczba pomiarów wynosiła pięćdziesiąt, a ocenianymi parametrami chropowości były : Ra, Rq, Rsm i Rt. Następnie te same parametry zostały zmierzone za pomocą wysoko dokładnego stacjonarnego profilometru stykowego. Uzyskane z tego przyrządu wyniki zostały uznane za wartości odniesienia przy statystycznej ocenie dokładności pomiaru profilometrem przenośnym. Badanym profilometrem przenośnym był przyrząd Hommel Tester T1000 firmy Hommelwerke, natomiast przyrządem wzorcowym profilometr stykowy Form Talysurf PGI 1230.

Na rysunkach 1a i 1b przedstawiono przyrządy pomiarowe użyte podczas eksperymentu.



Rys. 1. Przyrządy pomiarowe użyte podczas eksperymentu:  
a) profilometr Form Talysurf PGI 1230, b) profilometr przenośny Hommel Tester T1000

W odniesieniu do każdego mierzonego parametru, na podstawie uzyskanych wyników pomiaru wyliczone zostały wartości następujących wielkości opisujących dokładność pomiaru chropowości za pomocą przyrządu Hommel Tester T1000:

- błąd poprawności przyrządu  $e_j$  zgodnie z zależnością (1)

$$e_j = \bar{x}_i - x_p \quad (1)$$

gdzie:

$\bar{x}_i$  to średnia arytmetyczna z wyników pomiaru danego parametru uzyskanych za pomocą przyrządu T1000,

$x_p$  to wartość poprawna danego parametru uzyskana za pomocą przyrządu Form Talysurf PGI 1230.

- błąd wierności przyrządu  $w$  liczony zgodnie z zależnościami (2) i (3)

$$w = u \cdot \sigma \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_p)^2}{n}} \quad (3)$$

gdzie:

$u$  to zmienna standaryzowana rozkładu normalnego dla przyjętego poziomu ufności,

$\sigma$  to odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru,

$x_i$  to poszczególne wyniki pomiarów danego parametru,

$n$  to liczba pomiarów w serii.

- klasa dokładności przyrządu  $\delta$  liczona zgodnie z zależnością (4)

$$\delta = \left| \frac{e_j + w}{W_{max}} \right|_{max} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie:

$e_j$  to błąd poprawności przyrządu,

$w$  to błąd wierności przyrządu,

$W_{max}$  to górna granica zakresu pomiarowego przyrządu.

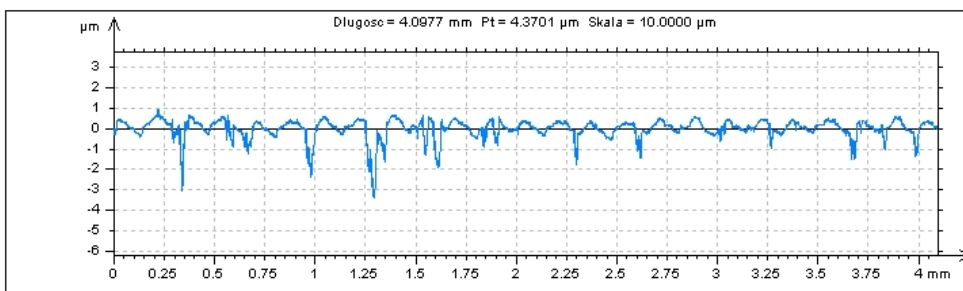
### 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Pierwszym etapem badań eksperymentalnych było wyznaczenie wartości poprawnych wybranych parametrów chropowatości dla mierzonej powierzchni za pomocą przyrządu Form Talysurf PGI 1230. Uzyskane wyniki przedstawia rysunek 2.

ISO 4287						
		Kontekst	Mean	Std dev	Min	Max
Parametry amplitudy – profil chropowatości						
<b>Rp</b>	µm	Filtr gaussowski, 0.8 mm	1.1693	0.6427	0.6358	2.8598
<b>Rv</b>	µm	Filtr gaussowski, 0.8 mm	1.9800	0.2406	1.4766	2.4757
<b>Rz</b>	µm	Filtr gaussowski, 0.8 mm	3.1494	0.7295	2.1876	4.9332
<b>Rt</b>	µm	Filtr gaussowski, 0.8 mm	5.3324	2.3959	2.9480	11.6778
<b>Ra</b>	µm	Filtr gaussowski, 0.8 mm	0.3594	0.0749	0.2971	0.5693
<b>Rq</b>	µm	Filtr gaussowski, 0.8 mm	0.5158	0.1434	0.4023	0.9204
<b>Rsk</b>		Filtr gaussowski, 0.8 mm	-0.3350	3.8179	-2.9268	10.7356
<b>Rku</b>		Filtr gaussowski, 0.8 mm	20.0580	26.5305	4.8601	98.9097
Parametry rozmieszczenia – profil chropowatości						
<b>RSm</b>	mm	Filtr gaussowski, 0.8 mm	0.1077	0.0234	0.0809	0.1703
<b>Rdq</b>	°	Filtr gaussowski, 0.8 mm	5.1078	0.3708	4.5096	5.7003

Rys. 2. Wyniki pomiarów uzyskane za pomocą przyrządu Form Talysurf PGI 1230

Na rysunku 3 przedstawiono zarys chropowatości mierzonej powierzchni.



Rys. 3. Zarys chropowatości badanej powierzchni uzyskany za pomocą przyrządu Form Talysurf PGI 1230

Następnie, zgodnie z przyjętą metodyką opisaną w poprzednim punkcie, badana powierzchnia została zmierzona pięćdziesiąt razy za pomocą profilometru przenośnego Hommel Tester T1000. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Kolejnym etapem badań było obliczenie wartości błędu poprawności, wierności oraz klasy dokładności przyrządu Hommel Tester T1000 przy wyznaczaniu poszczególnych parametrów chropowatości. W obliczeniach przyjęto poziom ufności  $P = 0,95$  i posłużono się zależnościami matematycznymi podanymi w punkcie poprzednim. Wyniki obliczeń przedstawiono w tablicy 2.

Tabl. 1. Wyniki pomiarów za pomocą przyrządu Hommel Tester T1000

Lp	Ra	Rq	Rsm	Rt	Lp	Ra	Rq	Rsm	Rt
1	0,556	0,76	0,38	5,34	16	0,307	0,42	0,131	6,89
2	0,410	0,57	0,44	4,88	17	0,271	0,35	0,152	2,19
3	0,661	0,95	0,44	7,52	18	0,391	0,52	0,216	3,59
4	0,654	0,95	0,45	6,44	19	0,341	0,55	0,127	6,86
5	0,512	0,71	0,54	5,72	20	0,316	0,44	0,156	4,32
6	0,397	0,56	2,37	5,15	21	0,308	0,44	0,141	4,56
7	0,288	0,40	1,07	4,11	22	0,316	0,45	0,153	4,40
8	0,283	0,41	1,38	3,99	23	0,592	0,88	0,087	6,34
9	0,264	0,36	0,47	3,21	24	0,392	0,64	0,220	5,31
10	0,236	0,33	1,28	3,48	25	0,387	0,52	0,176	4,59
11	0,268	0,39	2,35	4,34	26	0,346	0,47	0,166	3,47
12	0,352	0,51	0,46	5,55	27	0,390	0,53	0,305	3,86
13	0,377	0,51	0,52	4,49	28	0,318	0,46	0,216	4,86
14	0,304	0,43	0,46	3,82	29	0,373	0,52	0,247	5,16
15	0,285	0,38	0,160	3,86	30	0,381	0,55	0,165	5,00

Tabl. 2. Obliczone wartości błędu poprawności, wierności oraz klasy dokładności przyrządu Hommel Tester T1000

Parametr chropowości	Błąd poprawności $e_i$ [ $\mu\text{m}$ ]	Błąd wierności $w$ [ $\mu\text{m}$ ]	Klasa dokładności [%]
Ra	0,017	0,181	0,247
Rq	0,016	0,172	0,235
Rsm	0,406	4,361	5,960
Rt	-0,556	5,961	8,150

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Biorąc pod uwagę wartości podane w tabeli 2 widać, że w przypadku parametrów Ra i Rq uzyskano dużą dokładność pomiaru. Co więcej, uzyskane wartości błędów poprawności, wierności i klasa dokładności są do siebie bardzo zbliżone. Obliczona wartość parametru odnoszącego się do klasy dokładności w przypadku parametrów Ra i Rq predestynuje badany przyrząd do grupy przyrządów laboratoryjnych.

Z kolei, w przypadku parametrów Rsm i Rt uzyskane wyniki nie cechują się taką dokładnością. Zarówno wartości błędu poprawności, jak i błędu wierności osiągają dla Rt i Rsm znaczne wartości. Potwierdza to też uzyskany wynik obliczeń odnoszących się do klasy dokładności przyrządu. W przypadku parametru Rsm obliczona klasa dokładności wyniosła 5,96 %, natomiast w przypadku parametru Rt jest to wartość

jeszcze większa, osiągająca ponad 8 %. Duża wartość błędów w przypadku parametru  $R_t$  jest zrozumiała, biorąc pod uwagę, że jest on liczony jako odległość najwyższego i najniższego punktu zarysu na długości odcinka elementarnego. Taki sposób obliczania wartości parametru powoduje, że nawet nieznaczne zmiany sygnału mają wpływ na otrzymany wynik. Jest zrozumiałe, że w przypadku, gdy głowica pomiarowa jest trzymana ręcznie o takie zmiany nie jest trudno [8]. Mniej zrozumiała jest duża wartość błędów w przypadku oceny parametru  $R_{sm}$ , którego wartość jest średnią odległością nierówności powierzchni na długości odcinka elementarnego. Specyfika parametru  $R_{sm}$  (liczonego jako wartość średnia) powinna go czynić bardziej odpornym na chwilowe zakłócenia sygnału pomiarowego.

Z tego względu autor uważa, że otrzymane wyniki są bardzo interesujące i powinny stać się punktem początkowym dalszych badań nad dokładnością pomiaru różnych parametrów chropowatości za pomocą przenośnych profilometrów. W dalszych badaniach należałoby przede wszystkim zwiększyć liczbę pomiarów i przeanalizować więcej parametrów chropowatości. Dodatkowo, interesującą kwestią jest powtarzalność i odtwarzalność wyników pomiarów za pomocą profilometrów przenośnych, co także będzie tematem dalszej pracy badawczej w obszarze, którego dotyczy niniejszy artykuł.

*Artykuł opracowano w ramach projektu badawczo-rozwojowego NCBiR (PBS II), pt. „Badania i ocena wiarygodności nowoczesnych metod pomiaru topografii powierzchni w skali mikro i nano”.*

#### LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., Makiela W., *Analyzing the variations in roundness profile parameters during the wavelet decomposition process using the MATLAB environment*. W: Metrology and Measurement Systems, nr 18/1, 2011, 25-34
- [2] MATHIA T.G. et al., *Recent trends in surface metrology*, W: Wear, vol. 271, no. 3-4, 2011, 494-508.
- [3] ADAMCZAK S., MIKO E., CUS F., *A model of surface roughness constitution in the metal cutting process applying tools with defined stereometry*. W: Strojnicki Vestnik, nr 55, 2009, 45-54.
- [4] GRZESIK W., *Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools*. W: Wear, vol. 265, no. 3-4, 2008, 327-335.
- [5] PAWLUS P., *Digitisation of surface topography measurement results*. W: Measurement, vol. 40, no. 6, 2007, 672-686.
- [6] ZAWADA-TOMKIEWICZ A., *Estimation of surface roughness parameter based on machined surface image*. W: Metrology and Measurement Systems, nr 17/3, 2010, 493-504.
- [7] PONIATOWSKA M., WERNER A., *Fitting spatial models of geometric deviations of free-form surfaces determined in coordinate measurements*. W: Metrology and Measurement Systems, nr 12/4, 2010, 599-610.
- [8] STĘPIEŃ K., *Statistical testing of the measurement accuracy of mobile roughness measuring instruments*. XX IMEKO World Congress, , September 9 – 14, 2012, Busan, Korea Pld.

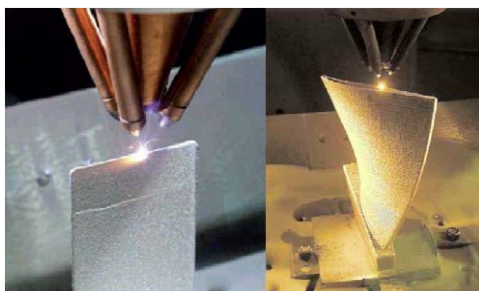
# OCENA DOKŁADNOŚCI GEOMETRYCZNEJ MODELU ŁOPATKI WYTWORZONEGO LASEROWĄ TECHNIKĄ PRZYROSTOWĄ

Zbigniew ZARAŃSKI<sup>1</sup>, Stanisław SULEJ<sup>1</sup>

## 1. WSTĘP

Rozwijane od niemal dwudziestu lat rapid technologie, dotyczące szybkiego, warstwowego wytwarzania fizycznych prototypów, modeli czy wzorców z wirtualnych modeli 3D-CAD umożliwiają generowanie gotowych wyrobów o pożądanym cechach geometrycznych z materiałów o znanych właściwościach [1].

Urządzenie LENS MR-7 [2] umożliwia budowanie fizycznego obiektu (modelu) w procesie spiekania warstwowego proszków metali w oparciu o jego wirtualny kształt (3D-CAD), co zostało zobrazowane na rysunku 1. Natomiast w tabeli 1 zamieszczono podstawowe dane techniczne tego urządzenia. Zgodnie z zaleceniami producenta systemu LENS w czasie laserowego kształtowania przyrostowego proszku używane w procesie powinny być kształtu sferycznego oraz bez widocznych defektów typu porowatość, czy pęknięcia. Ponadto wielkość cząstek proszku powinna mieścić się w przedziale od 44 do 150  $\mu\text{m}$  a same cząstki powinny być jednorodne chemicznie.



Rys. 1. Widok łopatkę turbosprężarki w czasie wytwarzania za pomocą systemu LENS MR-7

---

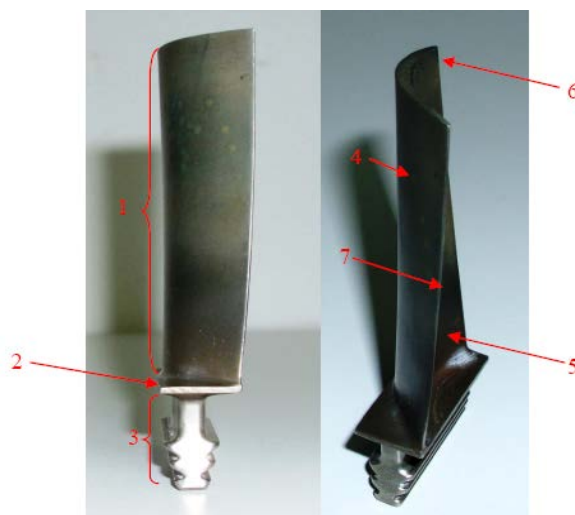
<sup>1</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii, Katedra Zaawansowanych Materiałów i Technologii, 00-908 Warszawa, ul. Kaliskiego 2.

Tabela 1. Podstawowe dane techniczne urządzenia LENS MR-7

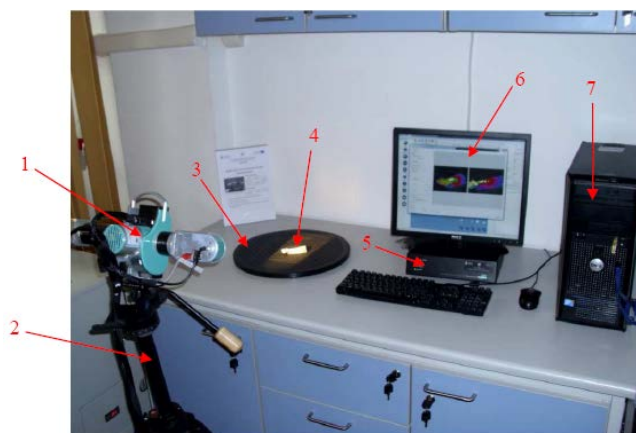
Laser / moc [W]	IPG YLR / 500
Obszar roboczy [mm]	300x300x300
Liczba podajników proszku	4
Atmosfera ochronna	Argon (O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O<10ppm)
Dokładność pozycjonowania [mm]	±0,25
Rozdzielczość liniowa [mm]	±0,025
Maksymalna szybkość skanowania [mm/s]	60
Wydajność [kg/h]	0,5
Oprogramowanie	Work Station, Materialise Magics, PartPrep Slicing
Dodatkowe oprzyrządowanie	Melt Pool Sensor, Thermal Imager

## 2. ODWZOROWANIE FIZYCZNEGO OBIEKTU

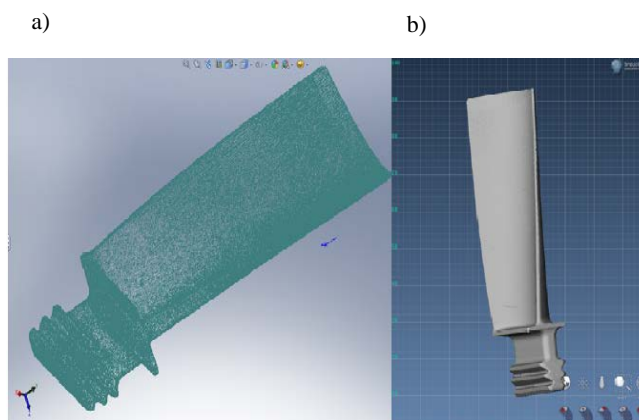
Łopatkę wirnika turbiny (ŁO), której widok ogólny przedstawiono na rysunku 2, skanowano za pomocą skanera optycznego smart Scan 3D duo firmy Breuckmann [3]. Widok ogólny stanowiska do digitalizacji zamieszczono na rysunku 3. Otrzymaną chmurę punktów obrobiono wstępnie za pomocą oprogramowania OPTOCAT 2009, będącego wyposażeniem skanera. Etapem końcowym było zapisanie kształtu łopatki (rys. 4a) w postaci pliku STL (rys. 4b). W celu uzupełnienia nieciągłości powierzchni łopatki skorzystano dodatkowo z programu Magics. Następnie model 3D wczytano do programu *PartPrep Slicing*, podzielono go na warstwy i zapisano do pliku o rozszerzeniu *.sli*.



Rys. 2. Widok ogólny łopatki wirnika turbiny gazowej silnika SO-3: 1-pióro, 2-platforma, 3-zamek, 4-powierzchnia naciśnieniowa, 5-powierzchnia podciśnieniowa, 6-krawędź natarcia, 7-krawędź splotu



Rys. 3. Widok ogólny stanowiska do digitalizacji obiektów ze skanerem optycznym smartScan 3D duo:  
1-skaner, 2-statyw, 3-stolik obrotowy, 4- element skanowany, 5-jednostka sterująca, 6-okno oprogramowania OPTOCAT 2009, 7-jednostka centralna komputera

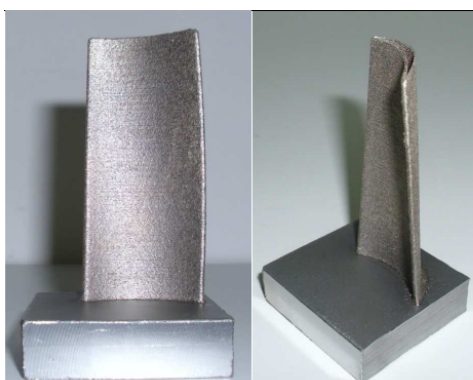


Rys. 4. Widok ogólny łopatkę turbiny: a) w postaci chmury punktów zaimportowanej do programu PartPrep Slicing, b) w postaci modelu opracowanego w programie OPTOCAT 2009

### 3. WYTWORZENIE ŁOPATKI

Tak przygotowany model zaimportowano do oprogramowania wykonawczego systemu *LENS MR-7*. Dobrano parametry technologiczne i wytworzono łopatkę (ŁW) z proszku na podstawie fazy międzymetalicznej Fe<sub>28</sub>Al. Widok ogólny wytworzonej łopatkę przedstawiono na rysunku 5.

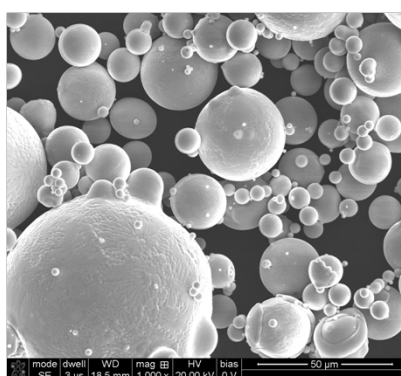




Rys. 5. Widok ogólny pióra łopatki turbiny wytworzonej z stopu Fe28Al

Stopy intermetaliczne z układu Fe-Al są zaliczane do grupy materiałów przydatnych do zastosowania w wysokiej temperaturze. Niski koszt wytwarzania, wysoki moduł sprężystości postaciowej oraz wysoka wytrzymałość właściwa, powodują, iż te stopy są atrakcyjnym materiałem do zastosowania w wysokiej temperaturze jako materiał odporny na ścieranie, erozję i korozję [4]. Do wytworzenia łopatki wirnika silnika SO-3 użyto proszku stopu międzymetalicznego na bazie fazy Fe<sub>28</sub>Al. Przeprowadzając badania na analizatorze *IPS U firmy Kamika* określono średnią wielkość cząstek proszku, która wynosiła  $D_v=32,3 \mu\text{m}$ . Liczba cząstek o wielkości 40-150  $\mu\text{m}$  stanowiła około 60% populacji. Wykorzystując skaningowy mikroskop elektronowy metodą EDS określono skład chemiczny. Zawartość podstawowych pierwiastków była następująca: Al – 15,51 % wag., Fe – 79,05 % wag., Cr – 5,44 % wag.

Morfologię cząstek proszku Fe<sub>28</sub>Al przedstawiono na rysunku 6. Można zaobserwować, że cząstki proszku charakteryzują się sferyczną budową oraz gładką powierzchnią a tym samym mogą być stosowane w technologii LENS.

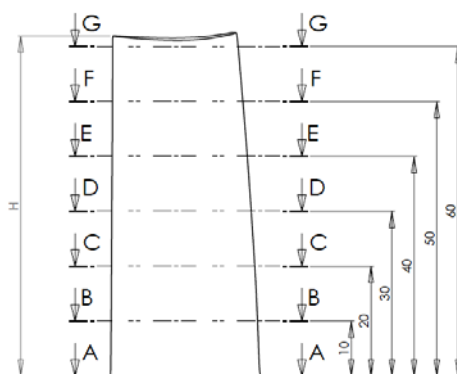


Rys. 6. Morfologia cząstek proszków Fe<sub>28</sub>Al, SEM pow. 1000x

#### 4. WYNIKI OCENY DOKŁADNOŚCI GEOMETRYCZNEJ

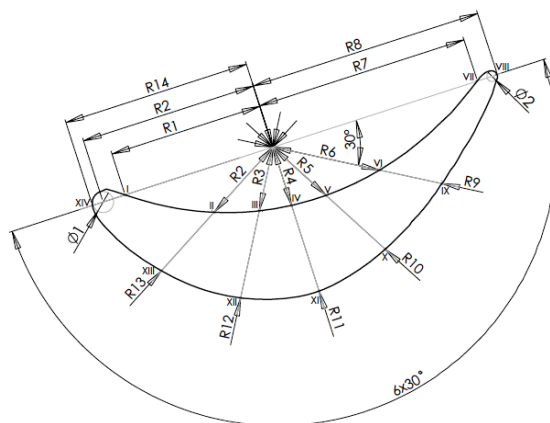
Ocenę dokładności geometrycznej wytworzonej łopatki dokonano za pomocą pomiarów stykowych przeprowadzonych za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej typu *Scope Check 3D CNC* firmy *Werth Messtechnik GmbH* [5-7].

W tym celu pióro łopatki podzielono siedmioma przekrojami poprzecznymi oznaczonymi zgodnie z widokiem zamieszczonym na rysunku 7.

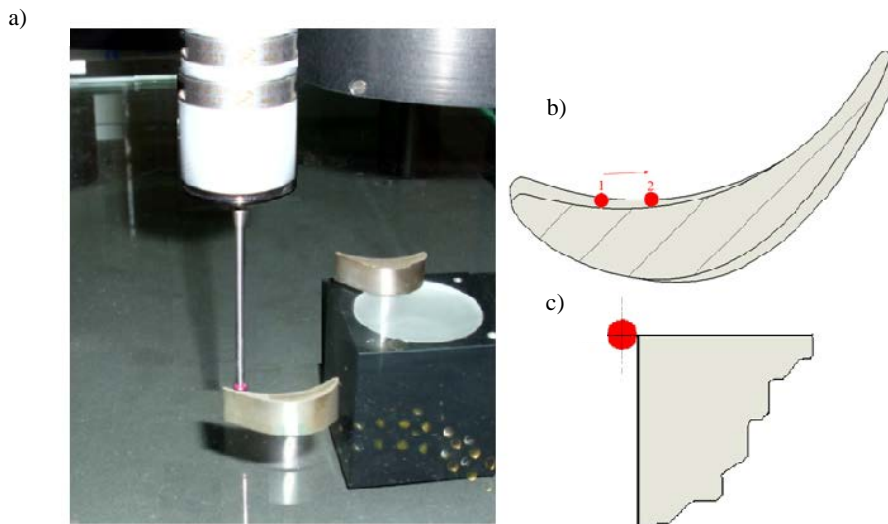


Rys. 7. Widok pióra łopatki z zaznaczonymi przekrojami poprzecznymi

Pomiary współrzędnościowe opierały się na wymiarowaniu uzyskanych przekrojów pióra łopatek ŁO i ŁW według przyjętej strategii, która polegała na wyznaczaniu współrzędnych biegunowych czternastu jednoznacznie określonych punktów konturu przekroju, tak jak to pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Widok uogólnionego przekroju pióra łopatki z wybranymi charakterystycznymi punktami pomiarowymi w przyjętym biegunowym układzie współrzędnych



Rys. 9. Pomiar geometrii analizowanego przekroju pióra łopatek: a) widok sondy skanującej, b) położenie sondy w kontakcie stykowym, 1-punkt początkowy i jednocześnie końcowy skanowania, 2-punkt kierunku skanowania, c) położenie sondy w stosunku do powierzchni wyznaczonej kształtem konturu pióra w płaszczyźnie przekroju

Ustalone wartości stałe (średnice  $\varnothing 1$ ,  $\varnothing 2$  okręgów wpisanych w kontur oraz odległość punktu początku układu biegunowego od środka wpisanego okręgu o większej średnicy) stały się wartościami obowiązującymi w pomiarach geometrii piór łopatek. Sposób realizacji pomiarów współrzędnościowych zobrazowano na rysunku 9.

Wyniki pomiarów współrzędnościowych geometrii piór łopatek zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 3. Zestawienie wyników pomiarów geometrii pióra łopatek ŁO i ŁW

Punkt		Przekrój						
		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G
		Promień wodzący $R_n$ [mm]; gdzie $n = (I, II, \dots, XIV)$						
I	ŁO	10,1538	10,7877	10,9575	11,1304	11,1829	11,1668	11,2656
	ŁW	9,8632	10,1231	10,3471	10,3471	10,7687	10,8481	10,7116
II	ŁO	5,7668	6,2901	6,3960	6,4778	6,3948	6,3299	6,2875
	ŁW	5,0585	5,5311	5,7932	5,8283	5,8029	5,8122	5,6330
III	ŁO	4,2786	4,7242	4,8638	4,8684	4,7718	4,6318	4,5370
	ŁW	3,6678	4,1120	4,2865	4,2657	4,2798	4,0743	4,0004
IV	ŁO	4,011	4,4804	4,6369	4,6333	4,4838	4,3152	4,1581
	ŁW	3,4406	3,8437	4,0402	4,0246	3,9471	3,7183	3,6588
V	ŁO	4,7044	5,2944	5,4815	5,4527	5,2122	4,9649	4,7465
	ŁW	4,1518	4,6173	4,7942	4,7591	4,5842	4,3226	4,2005

VI	ŁO	7,2473	7,9314	8,2155	8,0982	7,7191	7,3698	6,9344
	ŁW	6,4745	7,1899	7,4423	7,1395	6,9159	6,4939	6,2409
VII	ŁO	14,1784	14,8837	15,2871	15,3430	15,4279	15,1331	14,9684
	ŁW	13,8961	14,4374	14,7961	14,6201	14,4789	14,5814	14,0604
VIII	ŁO	15,8783	15,8717	16,2934	16,4240	16,4679	16,4073	16,1440
	ŁW	16,0982	16,1864	16,5152	16,3165	16,5261	16,5184	16,2963
IX	ŁO	11,9034	10,9475	10,8489	10,5418	10,0660	9,6356	9,2338
	ŁW	11,8734	11,3340	11,1917	10,8159	10,4002	9,8764	9,5463
X	ŁO	10,4328	9,4151	8,9805	8,5461	8,0523	7,6483	7,3820
	ŁW	10,4991	9,6604	9,2100	8,7457	8,2765	7,9251	7,6305
XI	ŁO	10,3427	9,3565	8,6993	8,1416	7,6735	7,3226	7,0963
	ŁW	10,5867	9,5489	8,8752	8,4102	7,9240	7,4931	7,3111
XII	ŁO	10,6181	9,9672	9,4103	8,8259	8,3634	8,0317	7,8934
	ŁW	10,8280	10,1060	9,5505	9,0535	8,6185	8,2466	7,9859
XIII	ŁO	11,7649	11,1105	10,8407	10,5188	10,2114	9,9457	9,8031
	ŁW	11,6371	11,1331	10,9391	10,6658	10,4154	10,1375	9,9096
XIV	ŁO	13,2303	12,7173	12,5229	12,5026	12,5008	12,4498	12,3492
	ŁW	13,2794	12,7915	12,6048	12,6122	12,5828	12,5161	12,4229

Na podstawie przedstawionych w tabeli 3 wyników pomiarów określono dla wszystkich punktów pomiarowych i przekrojów (7 przekrojów w każdym 14 punktów pomiarowych) wartość średnią różnicy (ŁW - ŁO) równą 0,3974 mm oraz odchylenie standardowe od tej wartości średniej równe 0,2510 mm charakteryzujące różnicę między geometrią pióra łopatki turbiny i wytworzonej łopatki. Uśrednione wartości miary dopasowania geometrii wytworzonej łopatki wskazują, iż przekroje elementu (ŁW) wykonanego laserową techniką przyrostową (LENS) są większe niż elementu odwzorowywanego (ŁO). To niedopasowanie należy wyeliminować poprzez obróbkę wykańczającą powierzchni pióra. Na taką konieczność wskazuje również stan struktury geometrycznej powierzchni. Chropowatość powierzchni łopatki wytworzonej (ŁW) odpowiada stanowi po obróbce kształtującej skrawaniem ( $Ra=7,5\mu m$ ). Natomiast powierzchnia łopatki oryginalnej (ŁO) charakteryzuje się chropowatością po procesie szlifowania zgrubnego ( $Ra=0,9\mu m$ ).

## 5. WNIOSKI

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

1. Technika LENS umożliwia uzyskanie części o złożonej geometrii z szerokiej gamy tworzyw konstrukcyjnych.
2. Średnia dokładność odwzorowania geometrii części w systemie LENS jest 1,5 razy większa od dokładności pozycjonowania głowicy.

3. Dokładności wymiarowe elementów wytwarzanych technologią LENS odpowiadają dokładnościom dla technik formujących (np. odlewania) i kształtowania plastycznego (np. kucia).

#### LITERATURA

- [1] CHLEBUS E., *Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji*, Warszawa, WNT, 2000.
- [2] <http://www.lapromaw.pl>
- [3] *Breuckmann precision in 3D, Brief Instruction Manual stereoScan<sup>3D</sup>, smartScan<sup>3D</sup>, optoTop, naviScan*, OPTOCAT, 2009.
- [4] BOJAR Z., PRZETAKIEWICZ W. (red.), *Materiały metalowe z udziałem faz międzymetalicznych*, Warszawa, Bel Studio, 2006.
- [5] Instrukcja obsługi, *WinWerth<sup>®</sup> Program pomiarowy*. Werth Messtechnik GmbH.
- [6] KOSMOL J., *Laboratorium z inżynierii odwrotnej*. Gliwice, Wyd. Politechniki Śląskiej, 2010.
- [7] OCZOŚ K., *Rapid Inspection – metody pomiarowo-kontrolne adekwatne do rapid technologii*. Mechanik, 3, 2008.

# WPLYW CHARAKTERYSTYKI TORU POMIAROWEGO NA BEZPOŚREDNI POMIAR SIŁY SKRAWANIA W CZASIE WYSTĘPOWANIA DRGAŃ

Mirosław NEJMAN<sup>1</sup>, Dominika ŚNIEGULSKA-GRĄDZKA<sup>1</sup>, Krzysztof  
JEMIELNIAK<sup>1</sup>,

## 1. WSTĘP

W celu zapewnienia wysokiej jakości obróbki skrawaniem należy nie dopuścić do jakichkolwiek zakłóceń, które mogłyby mieć wpływ, na jakość powierzchni obrobionej lub dokładność geometryczną przedmiotu obrabianego. Jednym z istotnych czynników zakłócających obróbkę są drgania samowzbudne, dlatego też tak ważne jest ich prognozowanie i eliminowanie. Przewidywanie wystąpienia drgań polega na określeniu granicy stabilności [3]. Zależy ona od funkcji przejścia układu obrabiarka-uchwyt-przedmiot obrabiany-narzędzie, w większości przypadków wyznaczonej z analizy modalnej oraz znajomości dynamicznej charakterystyki procesu skrawania (DCPS), która jest zależnością zmiennych składowych sił skrawania od drgań narzędzia względem przedmiotu obrabianego [1]. Zaproponowana metoda bezpośredniego pomiaru sił skrawania w czasie drgań narzędzia względem przedmiotu obrabianego [4] umożliwia badanie DCPS i zbieranie informacji, w jaki sposób wartości chwilowe sił skrawania zależą od obrabianego materiału, geometrii ostrza oraz parametrów skrawania.

W niniejszym artykule przedstawiono istotność wpływu charakterystyki toru pomiarowego na wyniki pomiarów wielkości dynamicznych. Zagadnienia te omówiono na przykładzie zbudowanego, innowacyjnego stanowiska do pomiarów chwilowych wartości sił skrawania w czasie drgań narzędzia względem przedmiotu obrabianego [2]. Istotę pomiaru oparto o zamocowany na elementach podatnych siłomierz, drgający wraz z zamocowanym w nim narzędziem w czasie występowania drgań samowzbudnych lub drgań swobodnych powstałych w skutek uderzenia

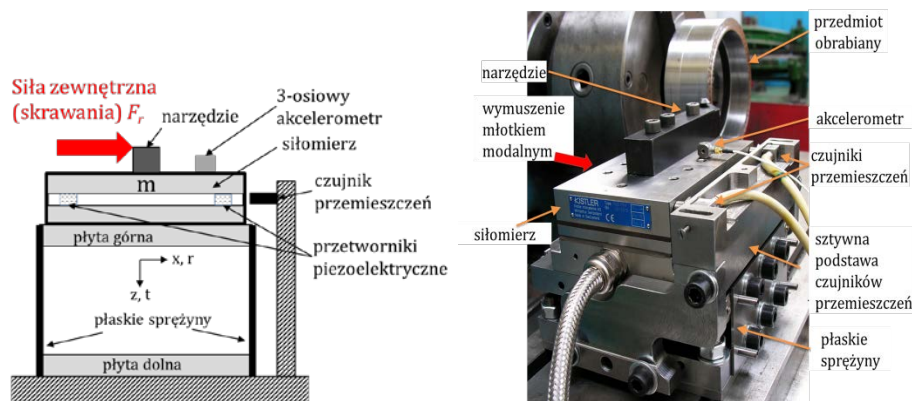
---

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Zakład Automatykacji, Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem, 02-562  
Warszawa, ul. Narbutta 86

młotkiem modalnym. Jednoczesny pomiar siły działającej na narzędzie zamocowane do siłomierza, przyspieszeń oraz przemieszczeń siłomierza pozwala na minimalizację wpływu od sił bezwładności oddziałujących na przetworniki siłomierza i pomiar jedynie sił zewnętrznych.

## 2. STANOWISKO ORAZ METODYKA BEZPOŚREDNICH POMIARÓW SIŁ SKRAWANIA W CZASIE DRGAŃ

Przedstawione na rys. 1 (po prawej) stanowisko badawcze zostało zaprojektowane i wykonane w oparciu o koncepcję zaprezentowaną po lewej stronie. Nowatorska koncepcja badania dynamicznej charakterystyki procesu skrawania oparta została na bezpośrednim pomiarze sił skrawania w czasie drgań. Realizacja tego zadania była możliwa dzięki umieszczeniu w strefie skrawania siłomierza na elementach podatnych, których ugięcie pozwala na dynamiczne zmiany grubości warstwy skrawania. Szczegółowy opis metodyki wyznaczania DCPS opisano w artykule [4].

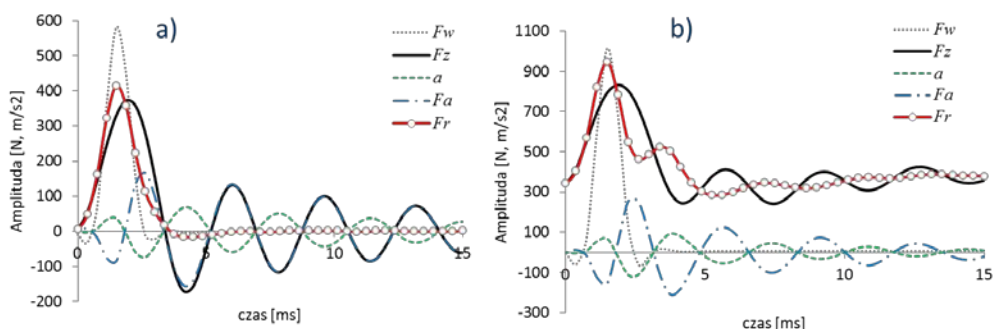


Rys. 1. Koncepcja (po lewej) i urządzenie (po prawej) stanowiska badawczego do pomiaru dynamicznych współczynników sił skrawania [8]

Początkowo stanowisko badawcze zbudowane zostało w oparciu o dynamometr Kistler 9257BA, umieszczony na górnej płycie urządzenia połączonej z dolną poprzez płaskie sprężyny (rys.1), do którego zamocowano 3-osiowy akcelerometr Kistler 8763A50, mierzący jego przyspieszenie. Dodatkowo mierzone są przemieszczenia siłomierza wraz z zamocowanym do niego narzędziem za pomocą bezstykowych czujników OT-18 sztywno zamocowanych do dolnej płyty urządzenia. Sygnały z siłomierza i akcelerometru trójosiowego są niezbędne do wyznaczenia siły zewnętrznej (skrawania), ponieważ w czasie drgań siłomierza siła zmierzona stanowi sumę siły rzeczywistej działającej na siłomierz i siły bezwładności górnej części siłomierza. Urządzenie zamontowano na konwencjonalnej tokarce TUD 100

wyposażonej w przetwornik obrotowo-impulsowy E2/CPPC (150imp/obr) zamontowany na wrzecionie. Aby zmierzyć charakterystykę urządzenia, pobudzano go do drgań za pomocą młotka modalnego Brüel & Kjær 8207 z końcówką gumową. Wszystkie sygnały rejestrowano przy użyciu karty pomiarowej NI USB-6259 z częstotliwością próbkowania 40kS/s (Sample/second).

Na rys. 2a przedstawiono efekt usuwania siły bezwładności  $F_a$  z sygnału z dynamometru  $F_z$ . Aby otrzymać przebieg siły rzeczywistej  $F_r$  uderzano w urządzenie młotkiem modalnym (sygnał  $F_w$ ), w ten sposób pobudzając go do drgań swobodnych. Następnie wycinano fragment sygnałów (od 5-tej do 15-tej milisekundy) i na podstawie sygnału z siłomierza  $F_z$  oraz z akcelerometru  $a$  wyznaczano współczynnik masy modalnej  $m$  działającej na przetworniki dynamometru. Znając współczynnik  $m$  oraz mierząc sygnał z akcelerometru  $a$  można zamodelować przebieg siły bezwładności  $F_a$  i odjąć od sygnału z dynamometru  $F_z$  uzyskując przebieg siły rzeczywistej  $F_r$  (rys. 1), tym samym odtwarza się przebieg siły wymuszenia (zewnętrznej)  $F_w$ . Znając powyższą zasadę można również odtworzyć siłę zewnętrzną w czasie skrawania, co przedstawiono na rys. 2b. Całą metodę bardziej szczegółowo opisano w artykule [4].



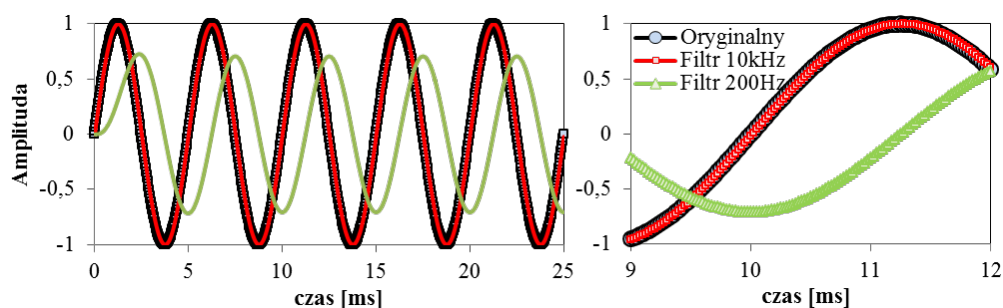
Rys. 2. Wyznaczanie rzeczywistej zewnętrznej siły  $F_r$  działającej na drgający dynamometr: a) przed skrawaniem, b) w czasie skrawania [4]

### 3. POMIAR I ANALIZA PRZEBIEGÓW SYGNAŁÓW Z CZUJNIKÓW

Urządzenie do badania dynamicznych współczynników sił skrawania zawiera pięć niezależnych torów sygnałów. Każdy z nich podłączony jest do dedykowanego przez producenta układu wstępnego przygotowania sygnału. Eliminacja wpływu siły bezwładności na wyniki pomiarów wymaga precyzyjnej synchronizacji wszystkich sygnałów, a w szczególności z siłomierza oraz akcelerometru, ponieważ to na podstawie ich przebiegu szacuje się wartość masy bezwładnej działającej na



przetworniki dynamometru. Po wstępnym przebadaniu okazało się, że sygnały po rejestracji nie są zsynchronizowane w czasie. Źródłem takich przesunięć pomiędzy sygnałami może być zastosowanie różnej długości kabli lub inne cechy toru pomiarowego. O ile długość przewodów pomiarowych pomiędzy wzmacniaczem a kartą pomiarową łatwo dobrać równą, o tyle przewody łączące czujniki ze wzmacniaczami, dostarczane przez producentów nie są już identycznej długości. Drugi czynnik, mający duży wpływ na synchronizację sygnałów, to filtry dolnoprzepustowe wbudowane w układy wstępnego przygotowania sygnałów. Dla młotka modalnego wybrano filtr 100kHz, aby nie zakłócić kształtu wymuszenia impulsowego. Dla toru czujnika indukcyjnego brakowało w dokumentacji informacji o wbudowanych filtrach. Wzmacniacz akcelerometru nie zawiera żadnych filtrów. Najbardziej problematyczny okazał się siłomierz, którego dedykowany wzmacniacz miał wbudowany filtr 200Hz, ponieważ częstotliwość drgań własnych siłomierza wynosi  $\sim 1,7\text{kHz}$ . O ile dla pomiarów statycznych i o niewielkich częstotliwościach problem jest pomijalny, to dla zbudowanego urządzenia zniekształcenie sygnału poprzez filtr było już znaczące, ponieważ częstotliwość drgań własnych urządzenia wynosiła prawie 200Hz. Na rys. 3 przedstawiono wpływ filtrowania filtrem dolnoprzepustowym 10kHz oraz 200Hz. Na potrzebę sporządzenia ilustracji w środowisku programowania LabVIEW cyfrowo wygenerowano sinusoidę o amplitudzie 1 i częstotliwości 200Hz, przy częstotliwości generowania 40kS/s, a następnie przefiltrowano cyfrowym filtrem Butterwortha 1-go rzędu.

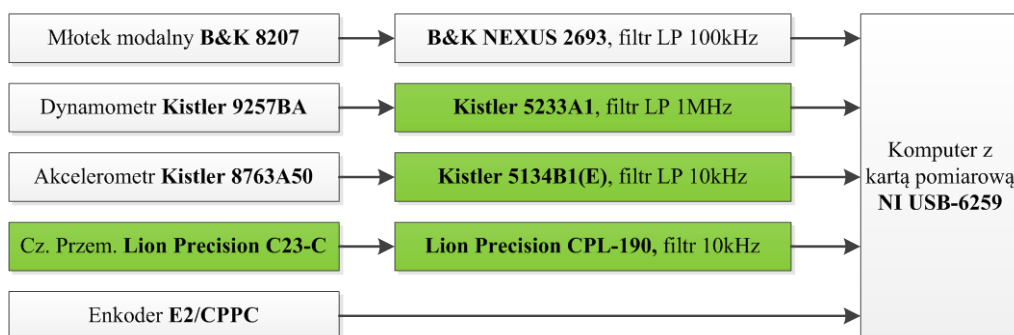


Rys. 3. Wpływ filtrowania na przebieg sygnału

Rejestracja sygnałów z czujników była prowadzona z częstotliwością próbkowania 40kS/s. Z przedstawionych wykresów wynika, że dla filtrowania 200Hz sygnały przesunięte są między sobą o 46 próbek, a więc błąd synchronizacji sygnałów wynosi ponad 1ms, co jest nie do przyjęcia w prowadzonej analizie czasowej sygnałów. Dodatkowo amplituda sygnału zmniejszyła się o 27%. Filtrowanie 10kHz powoduje przesunięcie o 1 próbkę, co jest dopuszczalnym błędem pomiaru, amplituda prawie nie ulega zniekształceniu. Z pomiarów rzeczywistych sygnałów wynikało przesunięcie sygnału przemieszczeń o 19 próbek, za pomocą wspomnianej wcześniej aplikacji

zamodelowano takie samo przesunięcie sygnałów dla filtra dolnoprzepustowego 500Hz.

Po zidentyfikowaniu powyższych problemów pomiarowych zdecydowano się na modyfikację torów pomiarowych. Po konsultacjach z firmą Kistler ustalono, iż w dedykowanym wzmacniaczu do dynamometru istnieje możliwość zamówienia filtrów o innych parametrach, należy jednak pamiętać o możliwych zakłóceniach pochodzących od częstotliwości rezonansowych zastosowanych w nim przetworników piezoelektrycznych. W zastępstwie za filtry 200Hz zastosowane zostały filtry dolnoprzepustowe 1MHz identyczne jak dla torów pomiarowych emisji akustycznej. Poprzedni wzmacniacz akcelerometru został zastąpiony wzmacniaczem Kistler 5134B1(E), w którym jest możliwość elektronicznej nastawy filtrów oraz wzmocnienia. Czujnik indukcyjny został zastąpiony czujnikiem pojemnościowym Lion Precision C23-C o prędkości pomiarów do 15 kHz (-3dB) wraz z modulem pomiarowym CPL 190, który również ma możliwość nastawianej przepustowości filtrów w tym 10 kHz. Na rys. 4 przedstawiono schemat nowej konfiguracji torów pomiarowych, dodatkowo zmienione elementy toru pomiarowego zaznaczono kolorem zielonym.



Rys. 4. Schemat toru pomiarowego po modyfikacji

Przy takiej konfiguracji filtrów należało dobrać jeszcze odpowiednią częstotliwość próbkowania, aby uniknąć zjawiska aliasingu. Ostatecznie zdecydowano, że sygnały będą rejestrowane z częstotliwością 100kHz na kanał, potem będą cyfrowo filtrowane dolnoprzepustowo filtrem 10kHz, a następnie częstotliwość próbkowania będzie obniżana do 40kHz. Filtrowaniu nie był poddawany sygnał z młotka modalnego, w którym widmo sygnału nie wskazywało na niebezpieczeństwo aliasingu oraz cyfrowy sygnał z przetwornika obrotowo impulsowego.

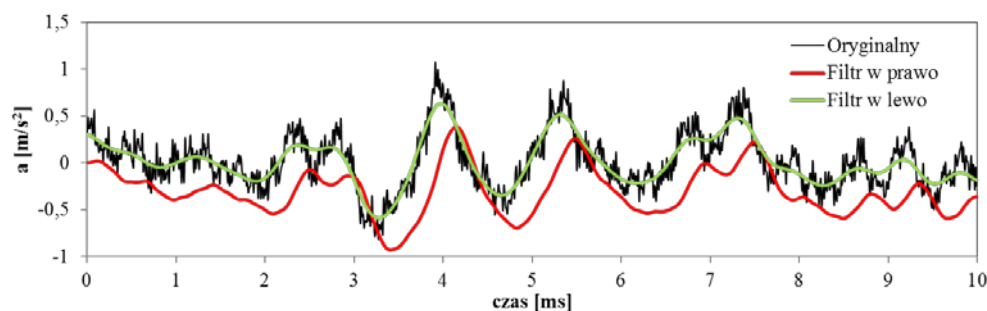
#### 4. AUTOMATYZACJA PRZETWARZANIA PRZEBIEGÓW SYGNAŁÓW Z CZUJNIKÓW ORAZ ICH WERYFIKACJA

Zjawiska braku synchronizacji nie udało się całkowicie wyeliminować wymieniając wspomniane wcześniej filtry i czujnik. Nadal występowało przesunięcie sygnałów o 1-2 próbki pomiarowe. W algorytmie przetwarzania sygnałów uwzględniono więc automatyczną identyfikację przesunięć i synchronizację sygnałów (rys. 5).



Rys. 5. Algorytm przetwarzania danych pomiarowych

Ponieważ za pomocą karty pomiarowej mierzy się i zapisuje do plików napięcie, pierwszym krokiem przetwarzania sygnałów jest przeliczenie napięcia na jednostki fizyczne. Dodatkowym zadaniem w pierwszej konfiguracji stanowiska było zmierzenie charakterystyki czujnika indukcyjnego, gdyż była nieliniowa i uwzględnianie tej charakterystyki podczas skalowania sygnałów. Doświadczalnie sprawdzono również częstotliwość drgań własnych urządzenia i ponieważ nie przekraczała ona 200Hz zdecydowano, że należy pozbyć się wysokoczęstotliwościowych zakłóceń z przebiegów sygnałów. Ustalono przy tym, że akcelerometr był bardziej podatny na zakłócenia, dlatego dla filtrowania tego sygnału dobrano cyfrowy filtr Butterwotha dolnoprzepustowy 1,4kHz oraz 3kHz dla sygnału z dynamometru i pojemnościowego czujnika przemieszczeń. Nie filtrowano sygnału z młotka modalnego oraz z przetwornika obrotowo-impulsowego.

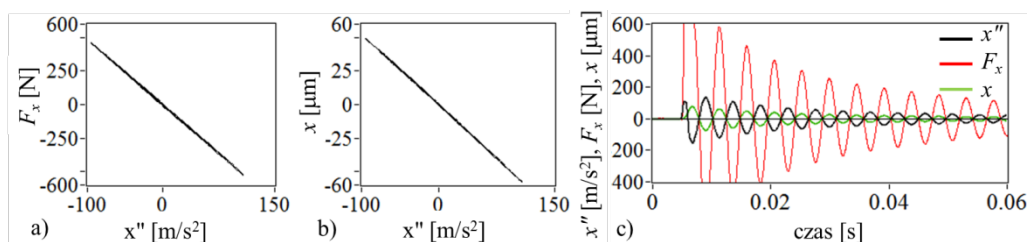


Rys. 6. Przebieg sygnału z akcelerometru poddany dwukrotnemu filtrowaniu

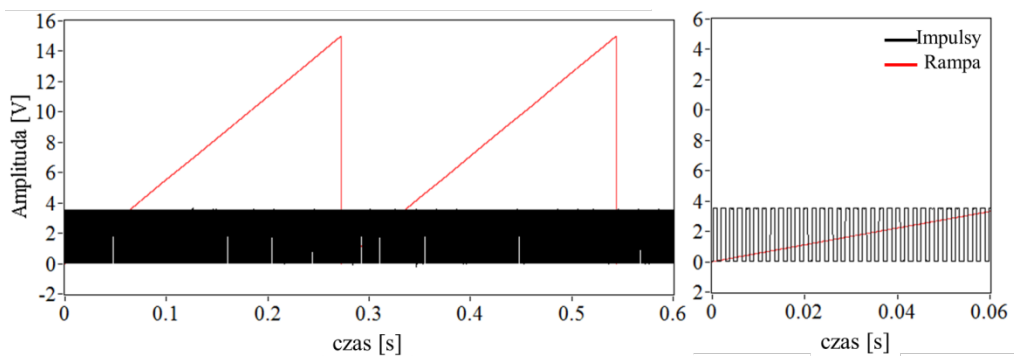
Aby uniknąć przesunięć fazowych spowodowanych użyciem filtrów o różnych częstotliwościach odcięcia, każdy sygnał filtrowano dwukrotnie. Efekt takiego filtrowania na przykładzie sygnału z akcelerometru przedstawiono na rys. 6,

zaznaczając kolorem czarnym oryginalny przebieg sygnału przed filtrowaniem, potem kolorem czerwonym dane filtrowane od pomiaru pierwszego do ostatniego („w prawo”), a następnie kolorem zielonym dane filtrowane od pomiaru ostatniego do pierwszego („w lewo”).

Po przeskalowaniu sygnałów na jednostki fizyczne i przefiltrowaniu, po uwzględnieniu offsetu sygnałów oscylujących wokół zera (z akcelerometru i czujnika przemieszczeń), w zautomatyzowany sposób przeszukiwano sygnał z młotka modalnego w poszukiwaniu przekroczeń przyjętego progu. Przekroczenie progu jest identyfikowane jako uderzenie młotkiem modalnym w urządzenie. Automat odrzuca uderzenia zbyt słabe oraz jeśli wykryje podwójne uderzenie. Wokół lokalizacji poprawnych uderzeń wycinane są pozostałe sygnały. Następnie odrzucany jest pierwszy okres oscylacji, gdyż jest on jeszcze pod wpływem kontaktu końcówki młotka z uderzanym siłomierzem. Dla pozostałego fragmentu sygnału wyznaczane są przecięcia sygnałów z osią  $x$  i w zautomatyzowany sposób obliczane jest przesunięcie między sygnałami, a następnie sygnały są synchronizowane. Efekt działania synchronizacji jest możliwy za pomocą wyrysowania funkcji przebiegu siły od przyspieszenia  $F_x(x'')$  i przemieszczenia od przyspieszenia  $x(x'')$ , co przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Zależność a)  $F_x(x'')$ ; b)  $x(x'')$ ; c) efekt synchronizacji sygnałów



Rys. 8. Przebieg z przetwornika obrotowo-impulsowego i generowanie rampy

W następnym kroku sygnał cyfrowy z przetwornika obrotowo-impulsowego

(zarejestrowany analogowo) zamieniany był na rampy. Każde 150 impulsów było zliczane i zamieniane na pojedynczą rampę (rys. 8), co w kolejnych krokach pozwoliło robić analizy nie tylko w dziedzinie czasu, ale i funkcji kąta obrotu przedmiotu obrabianego.

Dzięki opisanemu przetworzeniu sygnałów możliwa jest ich dalsza analiza. Sygnały są zsynchronizowane oraz bez wysokoczęstotliwościowych zakłóceń.

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono metodykę analizy zmierzonych sygnałów oraz przeprowadzono analizę doboru czujników, wzmacniaczy wraz z układami filtrującymi, a także cyfrowe przetwarzanie sygnałów mające na celu jak najdokładniejszy pomiar zjawiska fizycznego jakim są drgania swobodne. Nowatorska metodyka bezpośredniego pomiaru sił skrawania podczas skrawania wpadającego w drgania opisana w tym artykule umożliwia znacznie dokładniejszą ocenę zależności sił skrawania od chwilowych warunków skrawania. Może być stosowana do prostego eksperymentalnego wyznaczania liniowych współczynników sił skrawania do analitycznej analizy stabilności lub w celu weryfikacji każdego zaawansowanego modelu tłumienia procesu skrawania oraz do opracowywania wzorów jeszcze lepiej opisujących te współczynniki, które można stosować w numerycznych symulacjach drgań samowzbudnych.

## PODZIĘKOWANIA

*Badania realizowane w ramach Projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” Nr POIG.0101.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

## LITERATURA

- [1] ALTINTAS, Y., EYNIAN, M., ONOZUKA, H., *Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping*. W: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57, 2008, 371–374.
- [2] JEMIELNIAK K., NEJMAN M., ŚNIEGULSKA GRĄDZKA D., WYPYSIŃSKI R., *Urządzenie do pomiaru dynamicznych składowych sił skrawania*. W: Zgłoszenie z dnia 15.04.2012 pod nr P-398818.
- [3] JEMIELNIAK K., NEJMAN M., ŚNIEGULSKA-GRĄDZKA D., *Analityczne i numeryczne wyznaczanie granicy stabilności przy toczeniu*. W: Inżynieria maszyn, vol. 17, no. 1, 2012, 81-92.
- [4] JEMIELNIAK K., NEJMAN M., ŚNIEGULSKA-GRĄDZKA D., WYPYSIŃSKI R., *Wyznaczanie dynamicznych współczynników sił skrawania metodą doświadczalną*. W: Mechanik, ISSN 0025-6552, pp. 708, 2013, 563-570.

# **WIARYGODNOŚĆ I UŻYTECZNOŚĆ WYBRANYCH METOD POMIARÓW MIKROGEOMETRII POWIERZCHNI DO OCENY POWIERZCHNI Z TEKSTURĄ WYKONANĄ LASEREM PIKOSEKUNDOWYM**

Stanisław ADAMCZAK<sup>1</sup>, Jacek ŚWIDERSKI<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

Przez geometryczną teksturę powierzchniową należy rozumieć regularnie powtarzające się twory geometryczne w postaci rowków, mikropor, wgłębień, występów będące wynikiem zastosowania specjalnych technologii inżynierii powierzchni. Do metod teksturowania powierzchni zaliczamy między innymi mikroobróbkę elektroerozyjną oraz teksturowanie laserowe. Teksturowanie laserowe polega na lokalnym oddziaływaniu impulsu laserowego, powodującego odparowanie usuwanego materiału. Mikroobróbka laserowa jest metodą, z powodzeniem stosowaną wówczas, gdy wymagana jest wysoka dokładność wymiarowa i w przypadku materiałów kłopotliwych dla technologii mechanicznych[1]. Laser TruMicro z serii 5000, który posłużył do wykonania próbek tekstury o zróżnicowanej geometrii to laser pikosekundowy do mikroobróbki o mocy do 5 W i energii impulsu do 25  $\mu$ J. Mikrowgłębienie tekstury jest charakteryzowane przez średnicę otworu, jego głębokość oraz kształt, który determinuje jego objętość – parametr istotny ze względu na właściwości powierzchni teksturowanej w poszczególnych zastosowaniach.

Ocenę geometrii tekstury należy zaliczyć do obszaru metrologii zajmującego się pomiarami elementów w mikroskali [2]. Zgodnie z klasyfikacją nieregularności rysunku rzeczywistego na odchyłki kształtu, falistość i chropowatość powierzchni na podstawie proporcji między głębokością a okresem nierówności wg VDI/VDE 2601 mikrootwory w większości przypadków możemy zaklasyfikować do pęknięć [3]. Do pomiaru tego rodzaju nierówności mogą być wykorzystane przyrządy do pomiaru

---

<sup>1</sup> Politechnika Świętokrzyska, Al.1000-lecia P.P. 7, 25-314 Kielce

topografii powierzchni. Ocena wiarygodności i użyteczności takich pomiarów jest jednym z obszarów zainteresowań projektu realizowanego przez Politechnikę Świętokrzyską, Politechnikę Poznańską i Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania współfinansowanego przez NCBiR „Badania i ocena wiarygodności nowoczesnych metod pomiaru topografii powierzchni w skali mikro i nano” [4].

## 2. WYBRANE METODY POMIARU STEREOMETRII POWIERZCHNI

W literaturze można spotkać specjalizowane przyrządy przeznaczone do pomiarów geometrii mikrootworów. W pracy [5] przedstawiono system do pomiarów mikrootworów składający się z sondy w formie trzpienia o średnicy 3  $\mu\text{m}$  lub 30  $\mu\text{m}$ , który zakończony jest kulką o średnicy odpowiednio 5  $\mu\text{m}$  lub 50  $\mu\text{m}$ . Trzpień pomiarowy podczas kontaktu z powierzchnią otworu podlega ugięciu, które jest mierzone na drodze optycznej. Wykorzystanie interferometrii światła białego (WLI) do pomiarów powierzchni kształtowanej z zastosowaniem napyłania jonowego, w której występują otwory o przekroju kwadratowym o boku około 500  $\mu\text{m}$  i głębokości 2  $\mu\text{m}$  przedstawiają autorzy pracy [6]. Zastosowanie koherentnej interferometrii korelacyjnej (CCI) do pomiarów otworów wykonanych metodą obróbki elektroerozyjnej zajmowali się autorzy pracy [7].

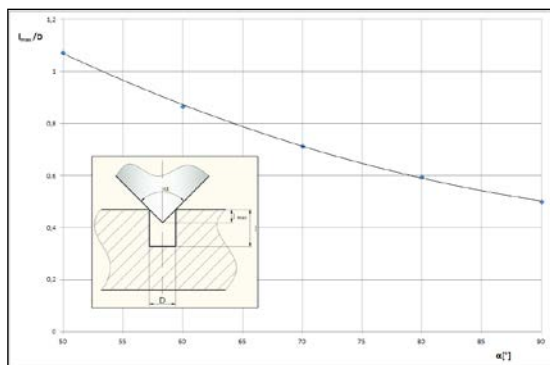
Spośród wielu metod pomiarów stereometrii powierzchni do oceny tekstury powierzchni wykonanej laserem pikosekundowym zastosowano następujące metody: profilometrię stykową, koherentną interferometrię korelacyjną, mikroskopię sił atomowych oraz profilometryczne głowice konfokalne.

**Profilometria stykowa** jest metodą najczęściej stosowaną w pomiarach nierówności powierzchni, wykorzystującą przetwornik pomiarowy zaopatrzone w końcówkę pomiarową z ostrzem odwzorowującym, której ruch pionowy wynikający

z nierówności powierzchni zamieniany jest na sygnał pomiarowy. Podstawowym ograniczeniem w stosowaniu profilometrii stykowej do pomiarów mikrootworów jest geometria ostrza odwzorowującego. Typowe ostrza odwzorowujące mają postać stożka o kącie wierzchołkowym  $\alpha = 60^\circ$  lub  $90^\circ$  i promieniu zaokrągleniu wierzchołka  $r_{ip} = 2 \mu\text{m}$ . Podczas pomiarów mikrootworów decydujące znaczenie ma kąt wierzchołkowy stożka, który limituje głębokość penetracji otworu a tym samym pomiar głębokości oraz odwzorowanie powierzchni bocznych otworu w przypadku gdy nachylenie zboczy jest większe od połowy kąta wierzchołkowego ostrza. Maksymalna głębokość mikrootworu możliwa do zmierzenia za pomocą ostrza o kącie wierzchołkowym  $\alpha$  dana jest zależnością:

$$L_{max} = \frac{D}{2 \tan \frac{\alpha}{2}} \quad (1)$$

gdzie:  $l_{max}$  – maksymalna głębokość mierzonego mikrootworu [ $\mu\text{m}$ ],  $D$  – średnica mikrootworu [ $\mu\text{m}$ ],  $\alpha$  [ $^\circ$ ] - kąt wierzchołkowy ostrza odwzorowującego.



Możliwości pomiaru głębokości mikrootworów przy zastosowaniu ostrzy odwzorowujących o kącie wierzchołkowym w zakresie od  $\alpha = 50^\circ$  do  $90^\circ$  przedstawiono na rys 1. Najczęściej wykorzystywane w profilometrach stykowych ostrze o kącie wierzchołkowym  $\alpha = 90^\circ$  umożliwia pomiar otworu o głębokości nie większej niż promień otworu.

Rys. 1. Możliwości pomiaru głębokości mikrootworu w zależności od kąta wierzchołkowego stożka ostrza odwzorowującego

**Koherentna interferometria korelacyjna (CCI)** oparta na zbieraniu obrazów prążków interferencyjnych i ich lokalizacji podczas skanowania pionowego łączy technikę skanowania pionowego z interferometrią optyczną. Ograniczeniem tej metody przy pomiarach mikrootworów jest apertura numeryczna zastosowanego obiektywu, która limituje możliwość pomiaru na zboczach o dużym nachyleniu. Zastosowanie do pomiaru powierzchni ze stromymi zboczami obiektywu ze zbyt małą aperturą spowoduje, że w wyniku pomiaru otrzymamy obszary z punktami niezmiernymi oznaczone w postaci białych plam na obrazie topografii powierzchni[8,9].

**Mikroskopia sił atomowych (AFM)** do oceny nierówności powierzchni wykorzystuje oddziaływania mechaniczne zachodzące pomiędzy wierzchołkiem końcówki pomiarowej a powierzchnią mierzoną. Do najczęściej wykorzystywanych trybów pracy mikroskopów sił atomowych należą: tryb kontaktowy, bezkontaktowy i tryb przerywanego kontaktu. Podstawowym ograniczeniem w zastosowaniu tej metody podczas pomiarów mikrootworów jest pionowy zakres pomiarowy wynoszący  $10\mu\text{m}$  i możliwość skanowania powierzchni o maksymalnych wymiarach  $90\mu\text{m} \times 90\mu\text{m}$ .

**Profilometryczne głowice konfokalne** pracujące w układzie profilometrycznym oparte na układzie chromatycznym stosowane są do pomiarów topografii powierzchni w skali mikro i nano a także częściowo w skali makro. Zakresy pionowe głowic konfokalnych znajdują się w przedziale od  $100\mu\text{m}$  do głowic pracujących w skali makro o zakresie do  $10\text{mm}$ . Od zakresu pionowego głowicy uzależniona jest jej rozdzielczość od kilku nanometrów dla głowic o najmniejszym zakresie pionowym do  $300$  nanometrów dla głowic o zakresie największym.



### 3. ZASTOSOWANE PRZYRZĄDY DO POMIARU STEREOMETRII MIKROOTWORÓW

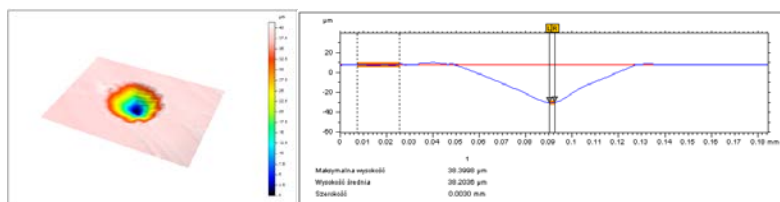
Do pomiarów stereometrii mikrootworów wykonanych laserem pikosekundowym wykorzystano przyrządy pomiarowe wykorzystujące poszczególne metody.

1. Profilometr stykowy z ostrzem odwzorowującym Talysurf PGI 1200 firmy Taylor Hobson wyposażony w głowicę z przetwornikiem interferometrycznym o zakresie 12,5 mm i rozdzielczości 0,8 nm. W pomiarach wykorzystano końcówkę pomiarową w postaci igły diamentowej o promieniu 2  $\mu\text{m}$  i kącie stożka 90°.
2. Profilometr optyczny Talysurf CCI firmy Taylor Hobson wykorzystujący metodę koherentnej interferometrii korelacyjnej o zakresie 2,2mm i rozdzielczości 0,01nm wyposażony w obiektyw o powiększeniu x50 umożliwiający pomiar obszaru 330  $\mu\text{m}$  x 330  $\mu\text{m}$  i zbocza o kącie nachylenia do 27,7°.
3. Mikroskop sił atomowych Dimension Icon jest przyrządem do pomiaru struktury geometrycznej powierzchni o wysokości nierówności do 10 $\mu\text{m}$  na obszarze 90 $\mu\text{m}$  x 90  $\mu\text{m}$  z szumem w osi pionowej poniżej 30pm. Umożliwia on pomiary z wykorzystaniem następujących trybów pracy: Scan Asyst, Tapping Mode oraz Contact Mode
4. Multisensorowy system do pomiaru chropowatości powierzchni 2D i 3D AltiSurf 500 wyposażony w głowice konfokalne: CL1 - Zakres: 130  $\mu\text{m}$  - rozdzielczość z = 8 nm, CL2 - Zakres: 400  $\mu\text{m}$  - rozdzielczość z = 22 nm, Sensor konfokalny CL3 - Zakres: 1200  $\mu\text{m}$  - rozdzielczość z= 60 nm oraz sensor interferometryczny o zakresie pionowym : 0,5 do 90 $\mu\text{m}$  i rozdzielczości z = 0,5nm [4]

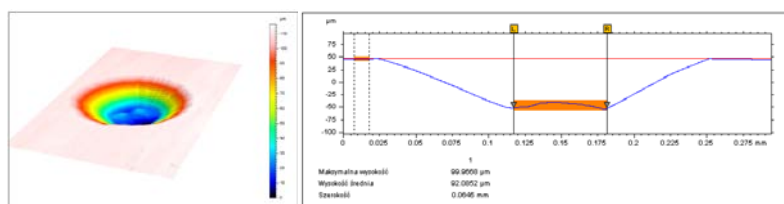
### 4. WYNIKI POMIARÓW

Badaniom zostały poddane na trzy rodzaje tekstury w postaci mikrootworów o średnicach: 80; 230 i 250  $\mu\text{m}$ .

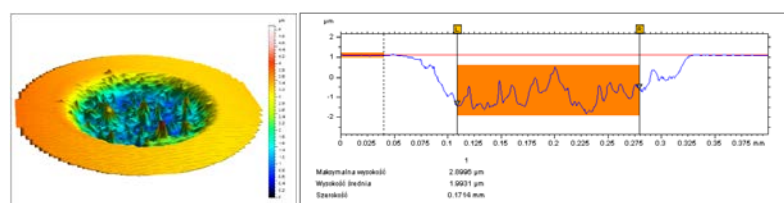
Wyniki pomiarów mikrootworów profilometrem stykowym z ostrzem odwzorowującym Talysurf PGI 1200 przedstawiono na rys.2-4. Na każdym z rysunków przedstawiono obraz izometryczny powierzchni i profil wykonany dla średnicy otworu.



Rys. 2. Mikrootwór tekstury 1



Rys. 3. Mikrootwór tekstury 2



Rys. 4. Mikrootwór tekstury 3

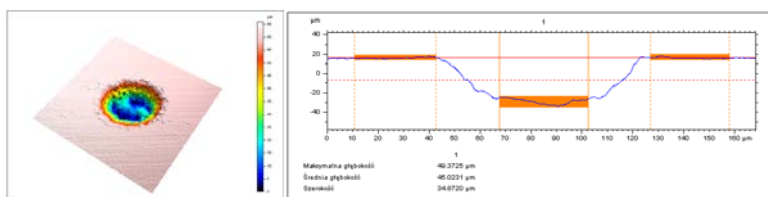
W tabeli 2 podano zmierzone wartości głębokości otworów  $l$  oraz uzyskane wartości stosunku  $l/D$ .

Tab. 2. Wyniki pomiarów za pomocą profilometru stykowego Talysurf PGI 1200

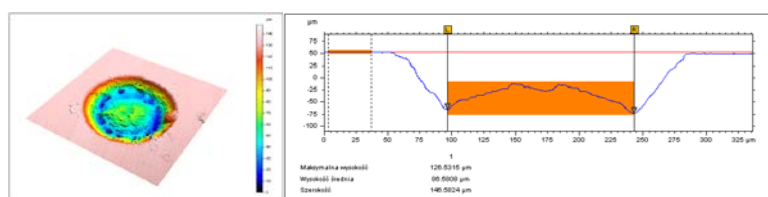
Parametr	Tekstura		
	1	2	3
$D[\mu\text{m}]$	80	230	250
$l[\mu\text{m}]$	38	100	2,9
$l/D$	0,48	0,43	0,01

Analiza otrzymanych wyników pomiarów prowadzi do wniosku, że w przypadku tekstury 1 i 2 ze względu na duży kąt nachylenia zboczy ostrze profilometru nie odwzorowuje ich geometrii ale na obrazie izometrycznym powierzchni i profilu odwzorowany jest kąt stożka ostrza. Otrzymana wartość  $l/D = 0,48$  jest dla tekstury 1 bliska  $l_{max}$  – maksymalnej głębokości mierzonego mikrootworu dla kąta stożka ostrza odwzorowującego  $\alpha = 90^\circ$  oraz kształt profilu świadczy o tym, że ostrze nie penetruje pełnej głębokości otworu.

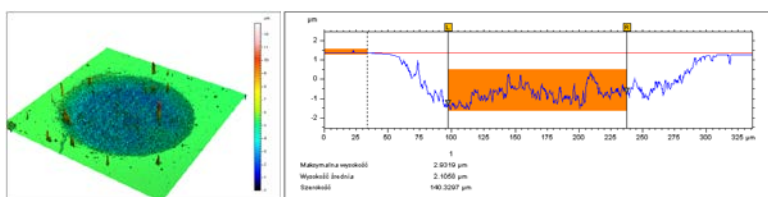
Wyniki pomiarów mikrootworów profilometrem optycznym Talysurf CCI przedstawiono na rys.5-7. Przedstawione obrazy izometryczne i profile zostały uzyskane po wypełnieniu punktów nie zmierzonych.



Rys. 5. Mikrootwór tekstury 1



Rys. 6. Mikrootwór tekstury 2



Rys. 7. Mikrootwór tekstury 3

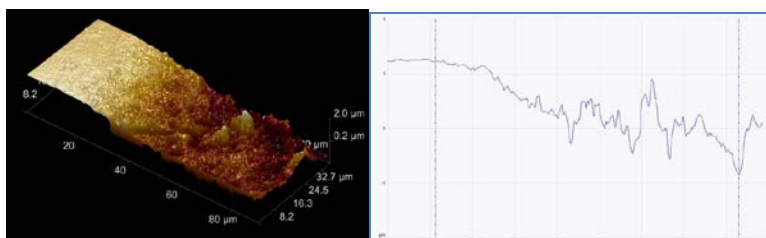
W tabeli 3 podano zmierzone wartości głębokości otworów  $l$ , uzyskane wartości stosunku  $l/D$  oraz ilość punktów niezmiernych.

Tab. 3. Wyniki pomiarów za pomocą profilometru optycznego Talysurf CCI

Parametr	Tekstura		
	1	2	3
$D[\mu\text{m}]$	80	230	250
$l[\mu\text{m}]$	49	126	2,9
$l/D$	0,61	0,54	0,01
<i>Ilość pkt. niezmiernych [%]</i>	94	72	21

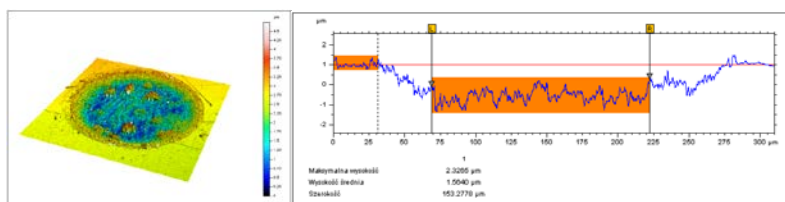
Na szczególną uwagę zasługuje gwałtowny wzrost ilości punktów niezmiernych w miarę wzrostu stosunku  $l/D$ . Uzyskane wartości pomiarowe głębokości otworów tekstury 1 i 2 są większe niż dla pomiarów stykowych. Dla tekstury 3 uzyskano porównywalną wartość.

Mikroskopem sił atomowych Dimension Icon wykonano pomiar jedynie fragmentu zbocza mikrootworu tekstury 3 ze względu na zakres poziomy wynoszący 90  $\mu\text{m}$ . Wyniki zostały przedstawione na rys. 9.



Rys. 8. Fragment zbocza mikrootworu tekstury 3

Multisensorowym system do pomiaru chropowatości powierzchni 2D i 3D AltiSurf 500 wyposażonym w głowicę konfokalną CL1 o zakresie 130  $\mu\text{m}$  wykonano pomiar mikrootworów tekstury 3. Wyniki zostały przedstawione na rys. 8. Otrzymana wartość głębokości otworu jest porównywalna z wynikami otrzymanymi za pomocą profilometru stykowego i optycznego wykorzystującego metodę koherentnej interferometrii korelacyjnej.



Rys. 9. Mikrootwór tekstury 3

## 5. WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły fakt, że w przypadku pomiarów mikrootworów o wysokiej wartości współczynnika  $l/D$ , z wykorzystaniem zaprezentowanych metod wymagane jest duże doświadczenie w ocenie otrzymanych wyników ze względu na to, że otrzymany obraz izometryczny otworu nie odpowiada stanowi rzeczywistemu dotyczącemu nachylenia zboczy otworu oraz jego głębokości.

Przeprowadzone pomiary mikrogeometrii otworów wykonane za pomocą lasera piko sekundowego wykazały możliwości i ograniczenia w stosowaniu poszczególnych metod. Najważniejszym parametrem, charakteryzującym możliwość pomiaru mikrootworów oprócz jego średnicy jest parametr  $l/D$ .

Zastosowanie profilometrów stykowych z ostrzem odwzorowującym o kącie

wierzchołkowym  $\alpha = 90^\circ$  do pomiaru głębokości mikrootworów jest możliwe w przypadku gdy  $l/D > 0,5$ . Jednocześnie otwory o stromych zboczach nie będą odwzorowywane, na obrazie izometrycznym powierzchni otworu zostanie odwzorowany kąt stożka ostrza końcówki pomiarowej.

Ograniczeniem wykorzystania koherentnej interferometrii korelacyjnej (CCI) jest duża ilość punktów niezmiernych występujących podczas pomiarów otworów o małej średnicy i wzrasta ona w miarę wzrostu stosunku  $l/D > 0,5$ .

Podstawowym ograniczeniem zastosowania mikroskopii sił atomowych do pomiarów topografii mikrootworów jest nie ich średnica, czy stosunek  $l/D$  ale ich bezwzględna głębokość wynosząca około  $10\mu\text{m}$  wynikająca z budowy i zasady działania tego typu przyrządów.

W celu przeprowadzenia dalszych badań umożliwiających sprawdzenie ograniczeń poszczególnych metod przewiduje się wykonanie wzorców w postaci otworów o różnych średnicach i wartościach stosunku  $l/D$  dla, których *a priori* znana będzie ich głębokość  $l$ .

*Publikacja w ramach projektu PBS2 finansowanego z NCBiR (Nr PBS2/A6/20/2013).*

#### LITERATURA

- [1] RADEK N., *Laserowe i elektroerozyjne teksturowanie par ślizgowych o powierzchniach płaskich*. W: Mechanik 11/2010.
- [2] ADAMCZAK S., *Pomiary geometryczne powierzchni*. Warszawa, 2008 WNT.
- [3] HUMIENNY Z., *Specyfikacje geometrii wyrobów. Podręcznik europejski*. Warszawa, 2004 WNT.
- [4] ADAMCZAK S., MILLER T., ŚWIDERSKI J., WIECZOROWSKI M., MAJCHROWSKI R., ŁĘTOCHA A., *Objectives of the project „Research and evaluation of reliability of modern methods of surface topography measurements in micro and nano scale*. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowa, Współrzędnościowa Technika Pomiarowa.
- [5] MURAKAMI H., KATSUKI A., ONIKURA H., SAJIMA T., KAWAGOISHI N., KONDO E., *Development of a System for Measuring Micro Hole Accuracy Using an Optical Fiber Probe*. W: Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing Vol.4, No.5, 2010.
- [6] BARYSHEV S.V., ZINOVEV A.V., TRIPA C.E., ERCK R.A., VERYOVKIN I.V., *White light interferometry for quantitative surface characterization in ion sputtering experiments*. 2012 Elsevier B.V.
- [7] BARMAN S., HANUMAIAH N., PURI A.B., *Investigation on shape, size, surface quality and elemental characterization of high-aspect-ratio blind micro holes in die sinking micro EDM* Springer –Verlag London 2013.
- [8] WIECZOROWSKI M., *Metrologia nierówności powierzchni, metody i systemy*. Szczecin 2013, Wydawnictwo ZAPOL.
- [9] KAPŁONEK W., ŁUKIANOWICZ CZ., *Coherence Correlation Interferometry in Surface Topography Measurements*, Recent Interferometry Applications in Topography and Astronomy, InTech, 2012.
- [10] JANECKI D., *Edge effect elimination in the recursive implementation of Gaussian filters*; W: Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology; 2012, vol. 36 issue 1, 128-136.

# **METODA PODWYŻSZENIA DOKŁADNOŚCI PROFILI KRZYWOLINIOWYCH WYTWARZANYCH NA ELEKTROEROZYJNYCH WYCINARKACH DRUTOWYCH**

Andrzej WERNER<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

Elektroerozyjne wycinanie drutowe jest jedną z najbardziej popularnych metod wytwarzania precyzyjnych części maszyn. Metoda ta stosowana jest w produkcji oprzyrządowania produkcyjnego (matryce do form wtryskowych, wykrojniki itp.) [1]. Osiągnięcie odpowiedniej precyzji obróbki uzależnione jest tu od szeregu parametrów, do których zaliczyć można np.: przebieg wyładowania elektrycznego, naciąg i prędkość przewijania drutu, posuw, przepływ dielektryka. Stosowane obecnie metody podwyższenia dokładności elementów wytwarzanych tą techniką skupiają się na bieżącej korekcie położenia drutu lub na opracowaniu modelu analitycznego procesu i wykorzystaniu go na etapie przygotowania obróbki. W artykule [2] zaprezentowany został system bazujący na śledzeniu i sterowaniu położenia drutu. W systemie tym mierzone są odchyłki drutu względem zaprogramowanej pozycji i przeprowadzana jest bieżąca korekta położenia. Metoda ta pozwala na wycinanie złożonych kształtów i prostych konturów z większą prędkością w stosunku do tradycyjnego cięcia. Ważnym zjawiskiem mającym kluczowe znaczenie na dokładność obróbki jest zjawisko ugięcia drutu w szczelinie międzyelektrodowej opisane w artykule [3]. Zaproponowana została w nim nowa metoda pomiaru siły i ugięcia drutu w zależności od zadanych parametrów cięcia. Na tej podstawie opracowany został model analityczny procesu, który skutecznie eliminuje niekorzystne zjawiska i podnosi dokładność cięcia. Osobnym zagadnieniem jest osiągnięcie odpowiedniej dokładności kątowej w przypadku cięcia powierzchni prostokreślnych. W badaniach opisanych w artykule [4] podjęto zadanie opracowania modelu analitycznego opisującego zależność błędu kąta cięcia od zadanych

---

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok

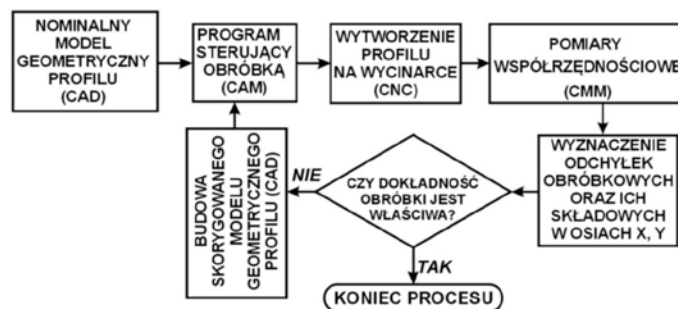
parametrów obróbkowych. Wykorzystanie tego modelu na etapie przygotowania procesu cięcia powoduje znaczne zmniejszenie odchyłki kąta wycinanej powierzchni.

Inną, uniwersalną metodą podwyższenia dokładności elementów wytwarzanych na obrabiarkach CNC jest metoda wykorzystująca pomiary współrzędnościowe. Metoda ta stosowana jest przede wszystkim w przypadku obróbki na frezarskich centrach obróbkowych. Korekta procesu obróbkowego odbywa się na podstawie pomiarów współrzędnościowych wykonanych na obrabiarce [5] lub na współrzędnościowej maszynie pomiarowej [6]. W obu przypadkach wyniki pomiarów współrzędnościowych wykorzystywane są do przebudowy nominalnego modelu geometrycznego wytwarzanego obiektu i powtórnym utworzeniu programów sterujących. W prezentowanym artykule podjęto próbę aplikacji tej metody w obróbce przedmiotów na elektroerozyjnych wycinarkach drutowych sterowanych komputerowo.

## 2. METODA KOREKCJI BŁĘDÓW OBRÓBKOWYCH

### 2.1. SCHEMAT POSTĘPOWANIA

Jak wspomniano wcześniej prezentowana w artykule metoda korekcji błędów obróbkowych (rys. 1) bazuje na wynikach pomiarów współrzędnościowych. Wymaga ona w pierwszej kolejności utworzenia nominalnego modelu geometrycznego obrabianego przedmiotu. W przypadku wytwarzania części płaskich na elektroerozyjnej wycinarce drutowej w zupełności wystarczy w tym przypadku płaski model krawędziowy.



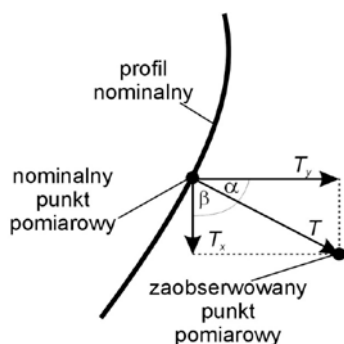
Rys. 1. Metoda korekcji błędów obróbkowych.

Model ten stanowi podstawę do utworzenia w systemie CAD/CAM programu sterującego obróbką obiektu. Po wytworzeniu elementu przystępuje się do pomiarów współrzędnościowych. Z uwagi na to, że na wycinarce drutowej nie można zamontować obrabiarkowej sondy pomiarowej, pomiary przeprowadzane są na

współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Dalsze decyzje podejmowane są na podstawie informacji o zaobserwowanych odchyłkach obróbkowych. W przypadku uzyskania założonej dokładności proces korekcji nie jest wymagany. W przypadku gdy nie została osiągnięta wymagana dokładność wytwarzanego profilu przeprowadza się korekcję błędów obróbkowych, która wymaga budowy skorygowanego modelu geometrycznego wytwarzanego obiektu. Model ten powstaje po przebudowie modelu nominalnego na podstawie wyników pomiarów współrzędnościowych. Na bazie informacji zawartych w programie pomiarowym wyznacza się składowe odchyłki zaobserwowanych w osiach X i Y. Składowe te wykorzystywane są w tworzeniu skorygowanego modelu geometrycznego obiektu. Sposób wyznaczania składowych odchyłków i przebudowa nominalnego modelu geometrycznego opisany został w dalszej części artykułu. Skorygowany model geometryczny jest podstawą do utworzenia nowych programów obróbkowych. Po powtórnej obróbce detalu przeprowadzane są ponowne pomiary współrzędnościowe. Określa się dzięki nim skuteczność przeprowadzonej korekcji. W przypadku osiągnięcia wymaganej dokładności wytwarzania proces można zakończyć lub gdy odchyłki są zbyt duże procedurę można powtórzyć ponownie.

## 2.2. WYZNACZANIE SKŁADOWYCH ODCHYLEK I PRZEBUDOWA MODELU GEOMETRYCZNEGO OBIEKTU

Z uwagi na naturę procesu objekty wytworzone na elektroerozyjnych wycinarkach drutowych opisane są zawsze za pomocą powierzchni prostokreślnych. Pomiary współrzędnościowe polegają na zmierzeniu pojedynczego konturu jaki znajduje się na powierzchni opisującej ścianki wyciętego profilu. Wykorzystać można w tym celu procedurę skanowania powierzchni typu *UVScan* (system PC-DMIS). Procedura ta



Rys. 2. Graficzna reprezentacja odchyłki obróbkowej.

korzysta z faktu, że powierzchnie parametryczne stosowane w systemach CAD są obiektami opisanymi z wykorzystaniem dwóch parametrów  $u$  i  $v$  [7]. W przypadku powierzchni prostokreślnych w kierunku parametryzacji  $u$  określenia się liczbę punktów pomiarowych, natomiast kierunek parametryzacji  $v$  ustala wysokość, na której mierzony będzie wycięty profil.

W celu oszacowania dokładności wykonania profilu krzywoliniowego opisującego wytwarzany obiekt należy wyznaczyć odchyłki obróbkowe w punktach pomiarowych. Miarą wyznaczanych odchyłków (rys. 2) są odległości pomiędzy punktami znajdującymi się na profilu nominalnym modelu CAD, a odpowiadającymi im punktami zaobserwowanymi w wyniku pomiarów na



współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Odchyłki wyznaczone są w kierunku normalnym do obrabianego profilu w płaszczyźnie obróbkowej (płaszczyzna XY w wycinarkach drutowych). Danymi wyjściowymi do określenia odchyłek zaobserwowanych oraz ich składowych są wyniki pomiarów współrzędnościowych zawierające informacje o: współrzędnych punktów nominalnych i zaobserwowanych w trakcie pomiaru, zaobserwowanych sumarycznych odchyłkach obróbkowych oraz cosinusach kierunkowych ustalających kierunek odchyłki.

Dysponując tymi informacjami przystępuje się do realizacji korekcji profilu krzywoliniowego opisującego kształt obiektu. W pierwszej kolejności wyznacza się (dla każdego punktu pomiarowego) składowe zaobserwowanych odchyłek obróbkowych w poszczególnych osiach układu współrzędnych obrabiarki. Do obliczeń wykorzystuje się następujące zależności:

$$\begin{aligned} T_{ix} &= T_i * \cos \beta_i \\ T_{iy} &= T_i * \cos \alpha_i \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

$i$  – numer punktu pomiarowego,

$T_i$  – odchyłka zaobserwowana w punkcie pomiarowym,

$T_{ix}, T_{iy}$  – składowe odchyłki zaobserwowanej,

$\cos \alpha_i, \cos \beta_i$  – cosinusy kierunkowe w kolejnych punktach pomiarowych.

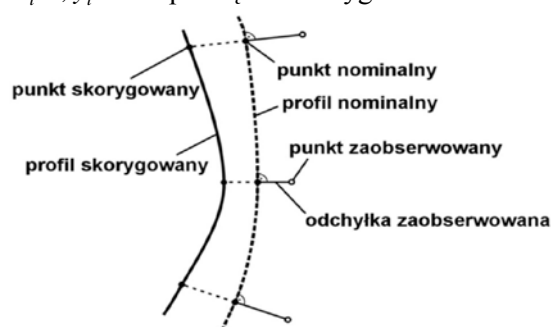
Po wyznaczeniu składowych odchyłek zaobserwowanych przystępuje się do korygowania nominalnego modelu geometrycznego obiektu. W pierwszej kolejności powinny być wyznaczone nowe skorygowane współrzędne punktów wg zależności:

$$\begin{aligned} x_i^{kor} &= x_i^{nom} - T_{ix} \\ y_i^{kor} &= y_i^{nom} - T_{iy} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

$x_i^{nom}, y_i^{nom}$  - współrzędne nominalne obrabianego profilu krzywoliniowego,

$x_i^{kor}, y_i^{kor}$  - współrzędne skorygowane obrabianego profilu krzywoliniowego.

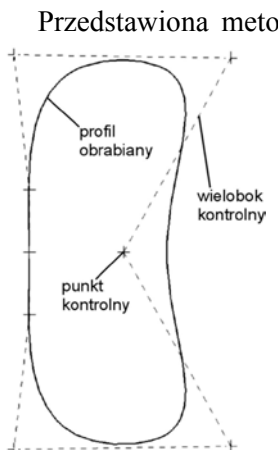


Rys. 3. Tworzenie profilu skorygowanego

Wyznaczone nowe współrzędne punktów służą do utworzenia skorygowanego profilu obrabianego. Zawiera on informacje o występujących błędach wytwarzania elementu. W tworzeniu profilu krzywoliniowego wykorzystuje się techniki interpolacji. Po wyznaczeniu współrzędnych punktów skorygowanych interpoluje się przez

nie krzywą opisującą profil skorygowany (rys. 3). W tworzeniu profilu skorygowanego wykorzystuje się technikę NURBS.

### 3. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA



Rys. 4. Krzywa opisująca wycinany profil.

Przedstawiona metodyka zweryfikowana została na przykładzie obróbki profilu krzywoliniowego (rys. 4) opisanego za pomocą krzywej NURBS. Krzywa zbudowana została na wieloboku kontrolnym składającym się z 9 wierzchołków. Stopień funkcji bazowych B-sklejanych  $n=3$ . Jak widać na załączonym rysunku krzywa w gładki sposób odwzorowuje kształt wieloboku kontrolnego. Program sterujący obróbką profilu utworzony został w systemie MASTERCAM. Założenia technologiczne były następujące:

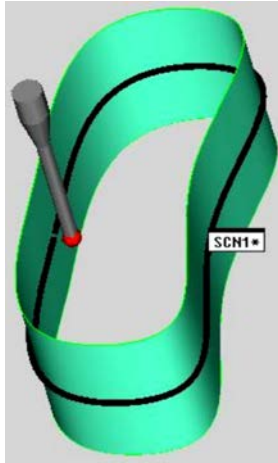
- wycinany był otwór w płaskowniku wykonanym z aluminium PA6,
- zaprogramowano 3 przejścia drutu (cięcie zgrubne i dwa przejścia wykończeniowe) – celem uzyskania jak największej dokładności obróbki,
- wraz z wycinanym otworem kształtowym wycinane

były również powierzchnie bazowe, które posłużyły do zdefiniowania pomiarowego układu współrzędnych – miało to na celu zminimalizowanie błędów ustawienia wynikających z przeniesienia obrabianego obiektu z obrabiarki na współrzędnościową maszynę pomiarową,

- operacja cięcia wykonana została drutem mosiężnym o średnicy 0,25 mm.

Przed przeprowadzeniem obróbki dokładnie skontrolowano stan elektroerozyjnej wycinarki drutowej. Skontrolowano górny i dolny prowadnik drutu, styczniki mocy oraz przeprowadzono procedurę pionowania drutu. Po przeprowadzeniu obróbki przedmiot został zdemontowany i przeniesiony na współrzędnościową maszynę pomiarową.

Pomiary kontrolne przeprowadzone zostały na maszynie pomiarowej Global Performance firmy Hexagon Metrology (oprogramowanie PC-DMIS,  $MPE_E = 1.5 + L/333$ , głowica pomiarowa Renishaw SP25M, trzpień pomiarowy o długości 20 mm z kulistą końcówką o średnicy 2 mm). W programowaniu pomiarów wykorzystano model geometryczny powierzchni prostokreślnej opisujący nominalny kształt wykonanego otworu. Pozwoliło to na zastosowanie polecenia *UVScan* do automatycznego pomiaru obiektów powierzchniowych. Kierunek  $u$  posłużył w tym przypadku do określenia liczby punktów pomiarowych. Przyjęto 200 punktów pomiarowych co przy uwzględnieniu długości profilu odpowiada 1 mm odległości między punktami. Kierunek  $v$  skanowania wykorzystano do określenia wysokości, na



Rys. 5. Rozkład punktów pomiarowych.

której obrobiony profil był mierzony. Przy przyjęciu  $v=0,5$  pomiar przeprowadzony został w połowie wysokości wykonanego otworu. Uzyskany rozkład punktów pomiarowych przedstawiony został na rys. 5.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów uzyskano informacje dotyczące 200 odchyłek zaobserwowanych, których rozkład przedstawiony został na rys. 6. Wszystkie wyznaczone odchyłki zawierały się w przedziale  $(-0,0114; 0,0081)$  mm. Uwzględniając uzyskane wartości odchyłek obróbkowych podjęto decyzję o przeprowadzeniu procesu korekcji błędów obróbkowych.

Zgodnie z procedurą opisaną w poprzednim rozdziale artykułu, przystąpiono do budowy skorygowanego modelu geometrycznego części. W pierwszej kolejności z programu pomiarowego wydzielono współrzędne nominalne, cosinusy kierunkowe oraz odchyłki zaobserwowane 200 punktów pomiarowych. Posługując się równaniami (1) i (2) wyznaczono dla każdego punktu współrzędne skorygowane. Na ich podstawie w systemie MASTERCAM utworzony został skorygowany model geometryczny wytwarzanego profilu – interpolowano krzywą NURBS przez 200 punktów skorygowanych.

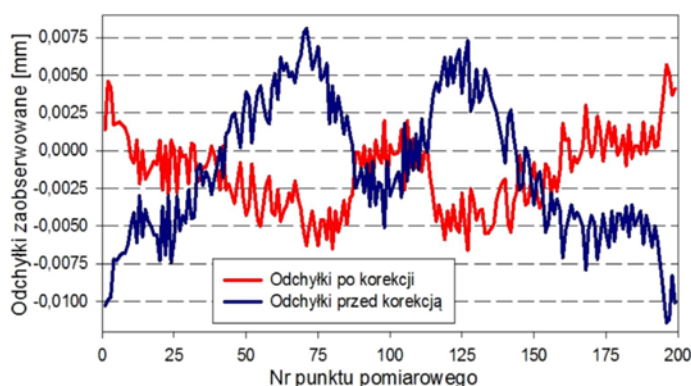


Rys. 6. Rozkład odchyłek zaobserwowanych po wstępnych pomiarach współrzędnościowych.

Bazując na skorygowanym modelu geometrycznym części powtórnie utworzono programy sterujące wytwarzaniem. Wykorzystano przy tym te same parametry, jakie przyjęto przy poprzedniej obróbce obiektu. Wygenerowane poprawione programy obróbkowe posłużyły do wykonania nowego otworu kształtowego. Powtórnie przeprowadzono pomiary współrzędnościowe - posłużono się przy tym utworzonym wcześniej programem pomiarowym. Wykres prezentujący wyniki pomiarów przed

i po przeprowadzonej korekcji przedstawiony został na rys. 7. W pierwszej kolejności należy zwrócić uwagę na jego bardziej „spłaszczoną” charakterystykę wykresu przedstawiającego odchyłki zaobserwowane po korekcji.

Po analizie uzyskanych wyników pomiarów współrzędnościowych okazało się, że odchyłki zaobserwowane po przeprowadzeniu korekcji błędów obróbkowych zawierały się w przedziale (-0,0066; 0,0057) mm. W porównaniu z poprzednio uzyskanymi wynikami nastąpił znaczący wzrost dokładności profilu krzywoliniowego.



Rys. 6. Rozkład odchyłek zaobserwowanych przed i po przeprowadzeniu korekcji błędów obróbkowych

## PODSUMOWANIE

Realizacja zaprezentowanej w artykule metody korekcji błędów profili krzywoliniowych umożliwiła znaczące podniesienie dokładności wytwarzania. W tabeli 1 przedstawione zostały wyniki zaobserwowane przed i po przeprowadzeniu procesu korekcji. Wykazują one wyraźny spadek maksymalnych zaobserwowanych odchyłek obróbkowych. Średnie bezwzględne wartości odchyłek wyznaczone dla wszystkich punktów pomiarowych przed i po korekcją wyraźnie zmniejszyły swoje wartości. Uzyskany został więc mniejszy rozrzut występujących odchyłek obróbkowych.

Tab. 1. Zaobserwowane odchyłki obróbkowe.

Odchyłki zaobserwowane	Przed korekcją	Po korekcji
Max. ujemna	-0,0114	-0,0066
Max. dodatnia	0,0081	0,0057
Średnia bezwzględnych wartości odchyłek dla 200 punktów pomiarowych.	0,0046	0,0023

Realizacja prezentowanej metody korekcji błędów wytwarzania jest stosunkowo prosta. Nie wymaga dodatkowych inwestycji, ponieważ bazuje na typowym wyposażeniu działów produkcyjnych firm (systemy CAD/CAM, obrabiarki CNC, współrzędnościowe maszyny pomiarowe). Dodatkową zaletą jest tu fakt, że nowoczesne systemy CAD/CAM wiążą parametrycznie generowaną ścieżkę narzędzia z geometrią wytwarzanego obiektu. Oznacza to, że raz opracowane dane technologiczne nie wymagają powtórnego wprowadzania do systemu. W konsekwencji po przebudowie modelu geometrycznego przedmiotu następuje automatyczna przebudowa ścieżki narzędzia. Nadmienić należy, że w przypadku przeprowadzania całego procesu korekcji błędów obróbkowych na tym samym przedmiocie, konieczne jest przeprowadzenie dokładnej obróbki wstępnej (przed korekcją) z zachowaniem równomiernie rozłożonego naddatku obróbkowego. Naddatek ten umożliwia kontynuowanie korekcji błędów obróbkowych w przypadku gdy podczas obróbki wstępnej usunięta zostanie zbyt duża ilość materiału.

#### LITERATURA

- [1] NEWMAN K.H. HO, S.T., RAHIMIFARD S., ALLEN R.D., *State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM)*. W: International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 44, 2004, 1247–1259
- [2] DAUW D.F., BELTRAMI I., *High-Precision Wire-EDM by Online Wire Positioning Control*. W: CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 43, issue 1, 1994, 193–197
- [3] SARKARA S., SEKHB M., MITRAA S., BHATTACHARYYAA B., *A novel method of determination of wire lag for enhanced profile accuracy in WEDM*. W: Precision Engineering, vol. 35, 2011, 339–347
- [4] SANCHEZ J.A., PLAZA S., ORTEGA N., MARCOS M., ALBIZURI J., *Experimental and numerical study of angular error in wire-EDM taper-cutting*. W: International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 48, 2008, 1420–1428
- [5] YUEPING CHEN, JIAN GAO, HAIXIANG DENG, DETAO ZHENG, XIN CHENA, ROBERT KELLY, *Spatial statistical analysis and compensation of machining errors for complex surfaces*. W: Precision Engineering, vol. 37, 2013, pp. 203–212
- [6] LO C.C., HSIAO C.Y., *CNC machine tool interpolator with path compensation for repeated contour machining*. W: Computer-Aided Design, vol. 30 (1), 1998, pp. 55–62.
- [7] PIEGL L., TILLER W., *The NURBS book*. Springer-Verlag, New York 1997.

# METODA KOREKCJI PROMIENIA KOŃCÓWKI W POMIARACH SKANINGOWYCH WMP

Adam WOŹNIAK<sup>1</sup>, J.R.R. MAYER<sup>2</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Kontrola jakości oraz niezawodności masowo produkowanych części urządzeń technicznych wymusza ciągły rozwój metod pomiarowych. Obecnie jedną z głównych technik pomiarowych stosowanych w przemyśle, zwłaszcza motoryzacyjnym i lotniczym, jest współrzędnościowa technika pomiarowa.

W procesie pomiarowym maszyna współrzędnościowa rejestruje współrzędne tzw. punktów pomiarowych zaobserwowanych [3], wskazane w chwili wykonania próbkowania. Punktem zaobserwowanym jest zwykle środek lub punkt położony blisko środka kulistej końcówki trzpienia pomiarowego, jak na rys. 1. Natomiast współrzędne punktu pomiarowego skorygowanego [3], który najlepiej przybliży punkt na powierzchni mierzonego przedmiotu, obliczane na podstawie współrzędnych punktu pomiarowego zaobserwowanego oraz wektora korekcji promienia końcówki trzpienia pomiarowego. Długość tego wektora jest znana. Jest to promień końcówki obliczony w czasie procedury kalibracji głowicy pomiarowej wraz z zespołem trzpienia. Trudniej wyznaczyć jego kierunek. Powinien to być kierunek normalny do powierzchni mierzonego przedmiotu w punkcie styku z końcówką pomiarową.

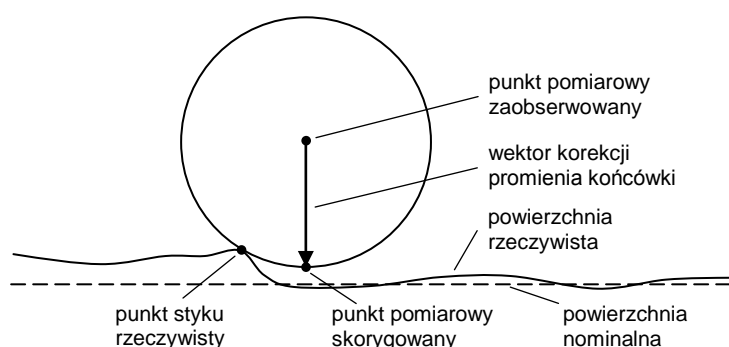
Procedura służąca do obliczania współrzędnych punktu, który najlepiej przybliży punkt na powierzchni mierzonego na podstawie punktu zaobserwowanego oraz wektora korekcji nazywana jest najczęściej korekcją promienia końcówki (ang. *probe radius correction*). Taka terminologia stosowana jest np. w pracach Adamczaka [1], i Poniatowskiej [2] oraz sugerowana przez normę PN-EN ISO 10360-1 [3]. Korekcja promienia końcówki pomiarowej mimo tego, że realizowana jest przez

---

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, ul. św. A. Boboli 8 02-525 Warszawa

<sup>2</sup> Ecole Polytechnique de Montreal C.P. 6079, succ. Centre-ville Montréal (Qc) CANADA H3C 3A7

oprogramowanie maszyny WMP na drodze obliczeniowej, ma ścisły związek z stykową głowicą pomiarową. Może być częścią składową procesu lokalizacji punktów pomiarowych (punktów mierzonego przedmiotu) w przestrzeni pomiarowej WMP. Zatem uwzględnienie błędów wprowadzanych przez procedurę korekcji w szeroko rozumianym rachunku błędów lokalizacji punktów pomiarowych za pomocą stykowej głowicy WMP wydaje się być uzasadnione.



Rys. 1. Punkt pomiarowy skorygowany, jako przesunięcie punktu pomiarowego zaobserwowanego o wektor o długości promienia końcówki, wg PN-EN ISO 10360-1 [3]

Z literatury znanych jest wiele różnych sposobów wyznaczania kierunku wektora korekcji promienia końcówki pomiarowej. Opisywane metody można podzielić na trzy grupy: i) wykorzystujące informację o wzajemnym położeniu sąsiednich punktów pomiarowych zaobserwowanych, ii) wykorzystujące informację z przetworników siły w głowicach skaningowych aktywnych oraz iii) bazujące na modelu CAD powierzchni mierzonej.

Najbardziej rozpowszechnione metody korekcji promienia końcówki polegają na analizie wzajemnego położenia punktów zaobserwowanych. Jednak i w tym przypadku, ponieważ punkty zaobserwowane obarczone są błędami wynikającymi z błędów geometrycznych maszyny współrzędnościowej i głowicy pomiarowej, precyzyjne wyliczenie kierunku wektora korekcji promienia końcówki nie jest w pełni możliwe. Aby zminimalizować błędy wynikające ze złego kierunku wektora korekcji, stosuje się matematyczne krzywe (najczęściej typu NURBS), które jednak prowadzą do uśredniania położenia punktów pomiarowych skorygowanych. W wyniku tego niedokładność odtwarzania rzeczywistego profilu mierzonego przedmiotu w procesie skanowania przez nawet najdokładniejszą maszynę pomiarową może sięgać kilkaset mikrometrów, z czego niejednokrotnie użytkownik współrzędnościowej maszyny pomiarowej nie zdaje sobie sprawy, mając w pamięci wyniki badań skaningu przeprowadzone na kuli badawczej zgodnie z [3].

Przedstawione problemy wynikające z nieprawidłowej korekcji promienia końcówki są motywacją dla wielu ośrodków do poszukiwań nowych algorytmów

wyznaczania punktów pomiarowych skorygowanych. Ma to szczególne znaczenie podczas pomiarów precyzyjnych części maszyn i urządzeń zarówno o zdefiniowanej, jak i niezdefiniowanej powierzchni nominalnej. W artykule zaprezentowano nowy algorytm, różniący się tym od pozostałych, że nie jest obliczany wektor korekcji, lecz bezpośrednio wyznaczane jest najbardziej wiarygodne położenie punktu pomiarowego skorygowanego. Opracowany algorytm przeznaczony jest do korekcji wyników pomiaru przekrojów dwuwymiarowych (krzywych płaskich).

## 2. NOWA METODA WYZNACZANIA PUNKTÓW SKORYGOWANYCH W POMIARACH SKANINGOWYCH

Działanie nowego algorytmu wyznaczania punktów pomiarowych skorygowanych przedstawiono w uproszczeniu na rys. 2. Kulista końcówka pomiarowa przemieszcza się po powierzchni mierzonego elementu. W tym czasie z określoną częstością rejestrowane jest położenie środka końcówki pomiarowej w przestrzeni XYZ maszyny. Są to tzw. punkty pomiarowe zaobserwowane  $O_i$ . Pozostawmy płaski ślad końcówki w każdym punkcie pomiarowym w postaci okręgu. Rozważmy kolejne łuki o promieniu końcówki pomiarowej, powstałe na skutek przecinania się kolejnych okręgów w punktach  $A_i$ . Punkty  $A_i$  wyznaczające końce łuków o promieniu równym promieniowi końcówki pomiarowej  $R$  i powstałych na skutek przecinania się kolejnych okręgów o środku w punktach  $O_i$  oraz  $O_{i-1}$ , można wyznaczyć z zależności:

$$A_i = \begin{bmatrix} -|O_i O_{i-1}|/2 \\ \sqrt{R^2 - (|O_i O_{i-1}|/2)^2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Poszukiwane punkty pomiarowe skorygowane  $C_i$ , leżą tylko i wyłącznie na powstałych łukach  $A_i A_{i+1}$ , odpowiadających danym punktom pomiarowym zaobserwowanym. Pierwszym przybliżeniem położenia punktu pomiarowego skorygowanego może być punkt  $T_i$ , będący środkiem odpowiadającego łuku, obliczony wg wzoru:

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -|O_i O_{i-1}|/2 \\ \sqrt{R^2 - (|O_i O_{i-1}|/2)^2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

gdzie maksymalny półkął środkowy  $\alpha_i$ , odpowiadający połowie łuku  $A_i A_{i+1}$ , zdefiniowany jest następująco:

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \arccos \left( \frac{|\overrightarrow{O_i A_i} \circ \overrightarrow{O_i A_{i+1}}|}{|\overrightarrow{O_i A_i}| |\overrightarrow{O_i A_{i+1}}|} \right). \quad (3)$$

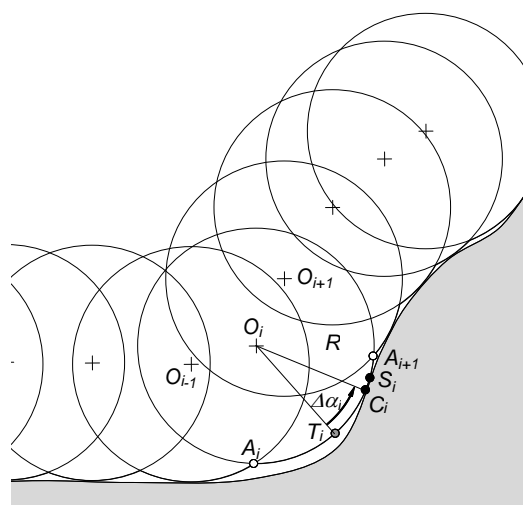
Dalsze doprecyzowanie położenia szukanego punktu skorygowanego  $C_i$  na łuku wymaga obliczenia kąta korekcji  $\Delta \alpha_i$ . Do tego celu zastosowano dwie metody: logikę



rozmytą [4] oraz metodę geometryczną [5].

Mając obliczone wartości kątowej korekcji można obliczyć współrzędne punktu pomiarowego skorygowanego z zależności:

$$C_i = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i + \Delta\alpha_i) & -\sin(\alpha_i + \Delta\alpha_i) \\ \sin(\alpha_i + \Delta\alpha_i) & \cos(\alpha_i + \Delta\alpha_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -|O_i O_{i-1}|/2 \\ \sqrt{R^2 - (|O_i O_{i-1}|/2)^2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$



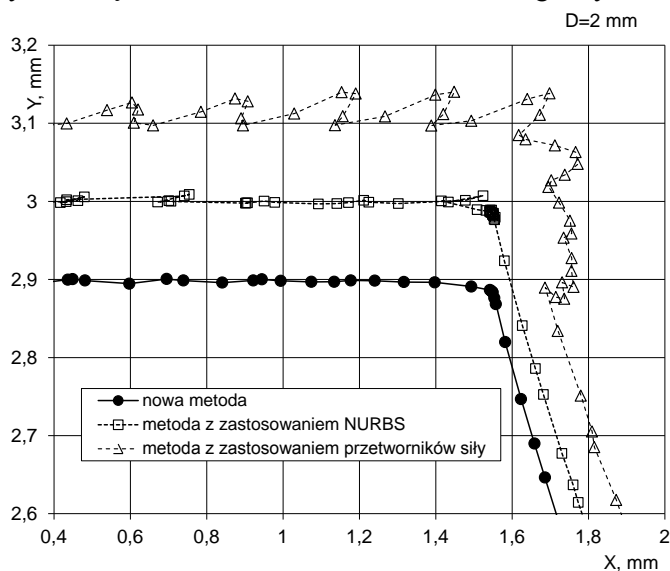
Rys. 2. Ogólna ilustracja metody wyznaczenia punktów pomiarowych skorygowanych

### 3. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA NOWEGO ALGORYTMU KOREKCJI PROMIENIA KOŃCÓWKI POMIAROWEJ

Aby zilustrować działanie nowego algorytmu korekcji promienia końcówki pomiarowej w odniesieniu do korekcji przeprowadzonej przez istniejące algorytmy dotychczas stosowane przez producentów maszyn współrzędnościowych wykonano pomiary skaningowe fragmentu przekroju specjalnie ukształtowanej bieżni wewnątrz tulei. Pomiaru dokonano maszyną współrzędnościową Zeiss ACCURA. Błąd graniczny dopuszczalny maszyny ACCURA przy pomiarze wymiaru wynosi  $MPE_E = 1,7 + L/333 \mu\text{m}$  ( $L$  - mierzona długość w milimetrach), a błąd graniczny dopuszczalny głowicy pomiarowej skaningowej  $MPE_{Tij} = 2,7 \mu\text{m}$ . Element mierzono końcówką pomiarową o średnicy 2 mm, z prędkością pomiarową 1 mm/s.

Na rys. 4 przedstawiono zestawione wyniki korekcji promienia końcówki pomiarowej otrzymane trzema różnymi metodami: obliczone na podstawie nowego algorytmu korekcji (oznaczone pełnymi punktami), obliczone z zastosowaniem NURBS przez oprogramowanie maszyny Calypso (oznaczone kwadratowymi znacznikami) oraz uzyskane na podstawie pomiaru siły z przetworników głowicy

pomiarowej aktywnej VAST (oznaczone trójkątami). Dla poprawienia czytelności wykresy zostały odsunięte od siebie o 0,1 mm w kierunku zgodnym z osią Y.

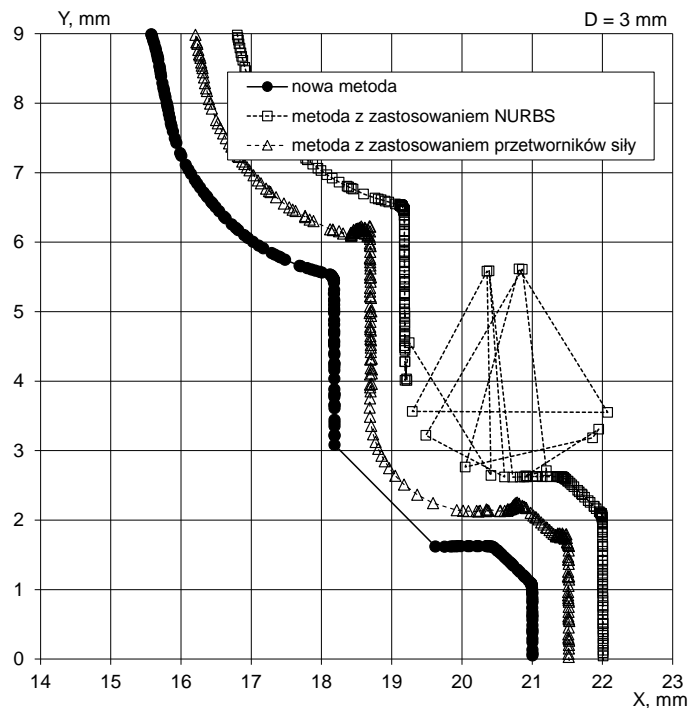


Rys. 4. Wyniki pomiarów przekroju bieżni wewnątrz tulei z zastosowaniem oprogramowania maszyny Zeiss oraz nowego algorytmu korekcji promienia końcówki

Przedstawiony na rys. 4 zmierzony zarys krawędzi potwierdza, że jest to dość kłopotliwy przypadek pomiarów skaningowych, znany dobrze użytkownikom współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Podczas pomiaru tego typu kształtów małe błędy położenia punktów pomiarowych zaobserwowanych, wynikające np. z niedoskonałości przetworników pomiarowych głowicy lub samej maszyny współrzędnościowej, przekładają się w widoczny sposób na błędne obliczenie kierunku wektora korekcji. Zjawisko to spotęgowane jest tym, że w przypadku pomiarów precyzyjnych elementów z dużą gęstością punktów pomiarowych odległość między kolejnymi zaobserwowanymi punktami pomiarowymi jest znacznie mniejsza od promienia końcówki pomiarowej. W konsekwencji dostajemy błędnie obliczone punkty pomiarowe skorygowane, niekiedy w zmienionej kolejności. W przedstawionym na rys. 4 przypadku widać, że nowy algorytm korekcji poprawnie wyliczył punkty skorygowane. W przeciwieństwie do pozostałych dwóch metod korekcji nowy algorytm nie powoduje widocznych zniekształceń zmierzonego profilu.

Analizując inne, przedstawione na rys. 5, wyniki pomiaru z zastosowaniem komercyjnych algorytmów potwierdzają, że i w tym przypadku odwzorowanie kształtu mierzonego elementu nie jest prawidłowe. Dotyczy to w szczególności pomiaru części wklęsłej przedmiotu. W tym przypadku następuje geometryczna filtracja wynikająca z tego, że fizyczna końcówka pomiarowa (kulka) nie jest w stanie zagłębić się wystarczająco, aby zmierzyć pewne niedostępne dla niej obszary

mierzonego przedmiotu. Nowy algorytm nie uśrednia otrzymanych wyników, dzięki czemu obszary niedostępne dla końcówki pomiarowej nie są błędnie zobrazowane przez maszynę w procesie pomiarowym.



Rys. 5. Wyniki pomiarów przekroju bieżni wewnątrz tulei z zastosowaniem oprogramowania maszyny Zeiss oraz nowego algorytmu korekcji promienia końcówki

#### LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., JURAS B., *Pomiary elementów maszyn o złożonym kształcie z wykorzystaniem współrzędnościowej maszyny pomiarowej*. W: Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1/23, 1999, 5-15
- [2] PONIATOWSKA M., *Charakterystyka przestrzenna odchylek geometrycznych wyznaczanych w pomiarach współrzędnościowych powierzchni swobodnych*. W: Acta mechanica et automatica, nr 2/3, 2009, 68-73.
- [3] PN-EN ISO 10360 – Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM).
- [4] WOŹNIAK A., MAYER R., BAŁAZIŃSKI M., W: *Stylus tip envelop method: corrected measured point determination in high definition coordinate metrology*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 42, Issue 5, 2009, 505–514.
- [5] WOŹNIAK A., MAYER R.: *Robust method for probe tip radius correction in coordinate metrology*. W: Measurement Science and Technology, Vol. 23, No. 2, 2012.

## **POMIARY STEREOMETRII STREFY DEFORMACJI W PROCESIE NAGNIATANIA**

Ireneusz Piotr CHMIELIK<sup>1</sup>, Henryk CZARNECKI<sup>2</sup>, Andrzej ZABORSKI<sup>3</sup>,

### 1. WSTĘP

W charakterystyce warstw wierzchnich uzyskanych w wyniku obróbek powierzchniowych duże znaczenie ma opis struktury geometrycznej powierzchni [1, 3, 4]. Szczególną uwagę w badaniach realizowanych od szeregu już lat w Instytucie Technologii Mechanicznych Politechniki Częstochowskiej nakierowano na obróbkę powierzchniową nagniataniem. Pozwala ona na poprawę zarówno parametrów stereometrii powierzchni, jak również właściwości mechanicznych warstwy wierzchniej. Analizy dotyczące realizacji tej obróbki wymagają wykonania szczegółowych analiz dotyczących zarówno zmian kształtu, jak i zmian stanu stereometrii otrzymanych walcowych przedmiotów. W opracowaniu wykorzystano możliwości laboratorium pomiarowego ITM PCz. Na jego wyposażeniu znajduje się między innymi zintegrowane stanowisko pomiarowe złożone z profilografometru New Form Talysurf 2D/3D 120 i przyrządu do pomiaru okrągłości Talyrond 365.

### 2. BADANIA NA STANOWISKU POMIAROWYM

#### 2.1. POMIAR BŁĘDÓW KSZTAŁTU I ODWZOROWANIE POWIERZCHNI WALCOWYCH

Wykorzystanie stanowiska pomiarowego Talyrond 365 (z oprogramowaniem „Ultra Roundness 5.17”) umożliwia kompleksową ocenę błędów kształtu powierzchni

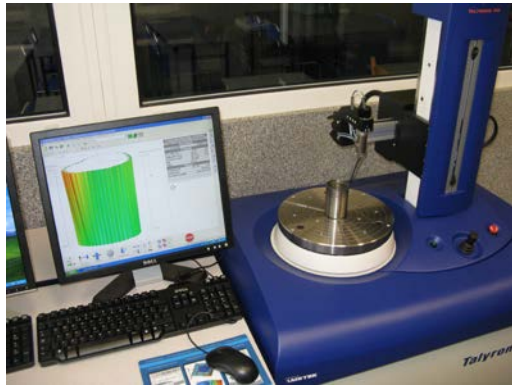
---

<sup>1</sup> Taylor Hobson Polska, 04 – 761 Warszawa, ul Zwoleńska 46h

<sup>2</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Zarządzania, Instytut Marketingu, 42-201 Częstochowa, ul. Armii Krajowej 36B

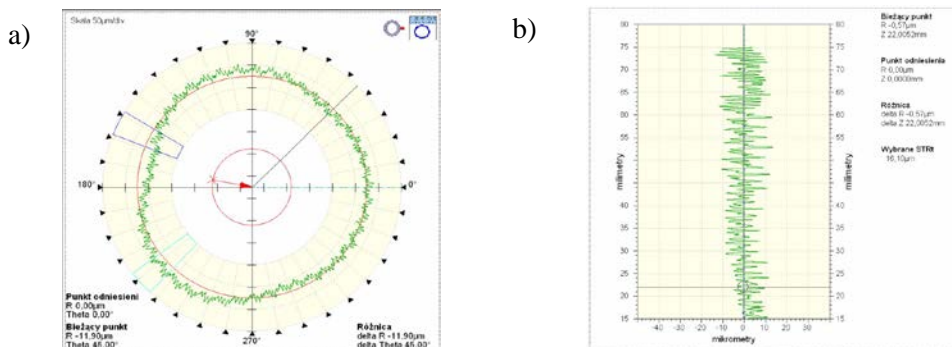
<sup>3</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Instytut Technologii Mechanicznych, 42-201 Częstochowa, ul. Armii Krajowej 21

walcowych (rys.1). Stanowisko to wyposażone jest w stół, który umożliwia precyzyjny obrót analizowanego przedmiotu o dowolny kąt, oraz przemieszczające



Rys. 1. Talyrond 365

się na pionowej kolumnie ramię pomiarowe przesuwane w osi poziomej, umożliwiające dosunięcie do powierzchni badanej wybranej końcówki pomiarowej i pomiar z rozdzielczością od 1,3 nm (zależną od przyjętego zakresu pracy głowicy pomiarowej). Opisywane stanowisko pomiarowe umożliwia przeprowadzenie przed rozpoczęciem właściwego pomiaru automatycznego skoordynowania położenia osi obrotu stolika i osi analizowanej powierzchni walcowej.

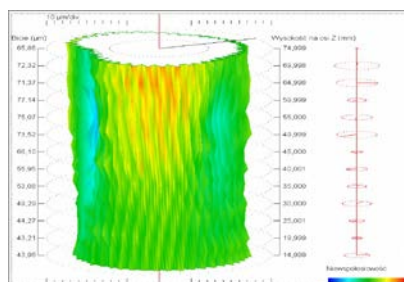


Rys. 2. Wyznaczenie kompleksowej charakterystyki błędów okrągłości (a) i prostoliniowości tworzącej (b) powierzchni walcowej

W wyniku pomiarów rzeczywista powierzchnia wyrobu (zbiór elementów, które istnieją fizycznie i oddzielają cały wyrób od otaczającego ośrodka) zostaje przekształcona w linię obwodową zaobserwowaną (okrągłości) będącą przybliżonym przedstawieniem przecięcia powierzchni rzeczywistej i płaszczyzny okrągłości. Linia ta zostaje wyznaczona z pewnym przybliżeniem wynikającym z dokładności sprzętu pomiarowego, promienia końcówki pomiarowej i innych czynników wpływających na dokładność zrealizowanego pomiaru. Dzięki jej wyznaczeniu możliwym staje się wyznaczenie błędów kołowości analizowanych powierzchni walcowych (rys.2a). Możliwym staje się wyznaczenie odchyłek okrągłości  $RON_t$  ( $RON_t = RON_p + RON_v$ ) ustalonych względem dowolnego okręgu odniesienia (MZC, LSC, MIC, MCC), jak również wyznaczenie szeregu innych parametrów stosowanych do oceny rysów okrągłości. W trakcie wykonywania tego pomiaru punkty zbierane są w postaci

cyfrowej w ilości (opcjonalnie) 3600 lub 18000 na 1 obrót wrzeciona. Rozdzielczość pozycjonowania stołu pomiarowego wynosi 0,02 stopnia. Rozdzielczość głowicy pomiarowej wynosi 1,3 nm (przy zakresie 0,08 mm), 6,3 nm (przy zakresie 0,41 mm) i 31,4 nm (przy zakresie 2,06 mm). Stanowisko pomiarowe umożliwia również precyzyjne zatrzymanie i zablokowanie badanej próbki w dowolnym położeniu kątowym i nadanie końcówce pomiarowej ruchu pionowego. Pozwala to na wyznaczenie prostoliniowości pionowej wybranej tworzącej analizowanego walca (rys.2b). Możliwym jest również wyznaczenie wybranych parametrów stosowanych do oceny zarysów prostoliniowości wyznaczonych względem wybranej linii odniesienia. Bicie osiowe i promieniowe wrzeciona pneumatycznego wynosi do 15nm. Błędy prostoliniowości kolumny na całej długości 300mm wynosi do 100nm. Rozdzielczość głowicy pomiarowej odniesiona do przesunięcia pionowego wynosi 0,25  $\mu\text{m}$  (to znaczy podczas pomiaru zbieranych jest 4000 punktów/mm). Stanowisko umożliwia również pomiary płaskości powierzchni czołowych i pomiary współosiowości powierzchni. Pomiary zilustrowano (rys.2) na przykładzie próbki cylindrycznej nagniatanej oscylacyjnie (kulka  $R_k=8$  mm,  $F = 0,5$  kN, kąt przecięcia śladów  $\varphi = 45^\circ$ ).

Zrealizowanie szeregu skorelowanych ze sobą zarysów okrągłości w równoległych, przesuniętych względem siebie o zadany krok płaszczyznach pomiarowych jest jedną z najpopularniejszych strategii pomiarów umożliwiających dokonanie oceny zarysu walcowości wraz z wyznaczeniem odchyłki walcowości  $CYL_t=CYL_p+CYL_v$  i innych jej parametrów. W trakcie pomiarów odchyłek walcowości najczęściej stosowanym jest walec odniesienia wyznaczony metodą najmniejszych kwadratów [1]. Możliwym jest też wyznaczenie walców odniesienia przy zastosowaniu innej metody. Ważnym wydaje się również analiza przestrzennego ukształtowania odchyłek kształtu (stożkowość, siodłowość, baryłkowość), zależnych



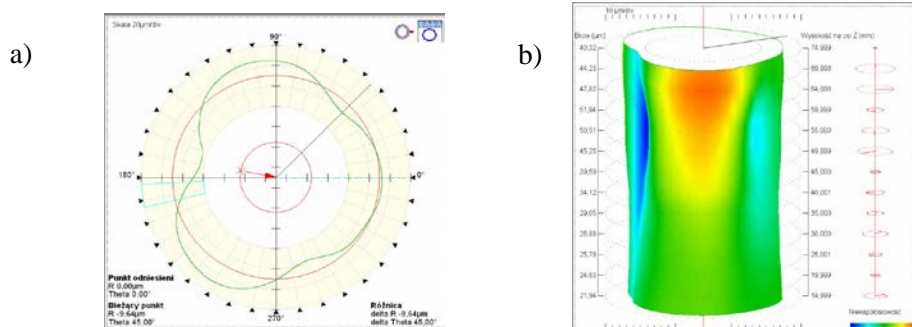
Rys. 3. Wizualizacja kształtu nagniatanej powierzchni walcowej

od zniekształcenia linii środkowej przedmiotu (pojedyncze, podwójne wygięcie), grupa zarysów o zniekształconej powierzchni (przedmioty o regularnych i nieregularnych zarysach kilkugraniastych), oraz nałożenie na siebie zarysów walcowości z poszczególnych grup. Do przeprowadzenia tego typu analiz niezbędna wydaje się możliwość uzyskania w trakcie pomiarów trójwymiarowego obrazu kształtu analizowanego walca. W trakcie tego pomiaru wykonuje się nie pojedynczy pomiar kołowości, ale kilka lub kilkanaście takich pomiarów, przy

czym pomiary te zostaną przeprowadzone tak, by były one skorelowane ze sobą pod względem położenia kąтового, będąc przesunięte względem siebie w pionie

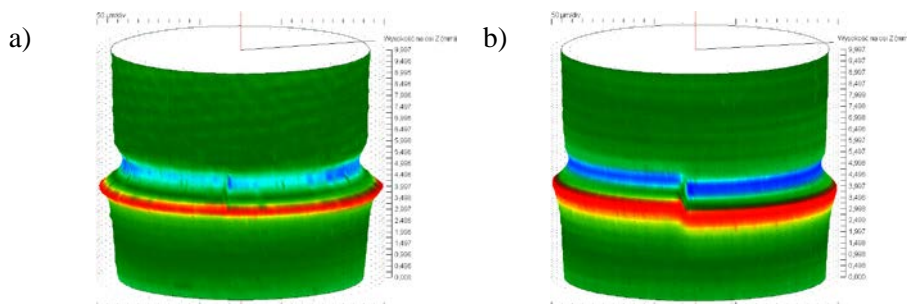
o założony skok, to na podstawie tak wykonanych analiz możliwą staje się wizualizacja trójwymiarowego kształtu analizowanej powierzchni walcowej (rys.3).

Analizując otrzymany trójwymiarowy wykres można stwierdzić, że odpowiada on ogólnemu obrazowi kształtu analizowanego przedmiotu. Odwzorowuje on również (w pewnym przybliżeniu wynikającym z zastosowania końcówki pomiarowej o znacznym promieniu) przebieg falistości i chropowatości analizowanej powierzchni walcowej. W praktyce pomiarowej do wyznaczenia przekształconych zarysów okrągłości i walcowości można stosować filtry oferowane przez oprogramowanie pomiarowe. Filtry te przenoszą określony zakres fal sinusoidalnych o określonym stosunku amplitudy wejściowej do wyjściowej i redukują fale, dla których ten stosunek leży poza tym zakresem. Przy ich zastosowaniu można liczyć się z tym, że otrzymane wartości odchyłek okrągłości mogą się od siebie różnić z uwagi na różne charakterystyki przenoszenia poszczególnych filtrów. Uzyskiwana w trakcie pomiarów znaczna liczba punktów pomiarowych umożliwia zastosowanie wybranych filtrów (rys.4a). Należy również pamiętać, że wykorzystanie w trakcie pomiarów odchyłek kształtu końcówki pomiarowej o promieniu 1 mm również będzie działało jak filtr dolnoprzepustowy, eliminujący z wyznaczonego zarysu fale o najmniejszej obwodowej długości. Eliminowane długości fal odpowiadające funkcjonalnie chropowatości i (lub) falistości powierzchni dla których odstęp nierówności w stosunku do głębokości wynosi 5-50 dla chropowatości i 50 - 1000 dla falistości [4] (z uwzględnieniem wspomnianego już znacznego promienia zaokrąglenia końcówki pomiarowej znacznie przekraczającego promienie igieł pomiarowych stosowanych podczas pomiaru chropowatości i stereometrii powierzchni). Oczywiście również przy analizie walcowości możliwym jest zastosowanie filtrów tłumiących określone długości fal (rys.4b).



Rys. 4. Wykorzystanie filtrów podczas analizy okrągłości (a) i walcowości (b)

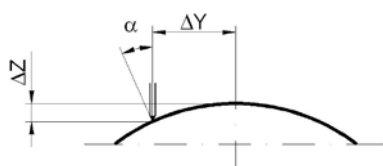
Zrealizowanie szeregu zarysów okrągłości w równoległych, przesuniętych względem siebie o zadany krok płaszczyznach pomiarowych pozwala na odtworzenie trójwymiarowego kształtu strefy nagniatania dla pełnego obwodu analizowanych powierzchni walcowych (rys.5).



Rys. 5. Trójwymiarowy obraz strefy nagniatania powierzchni nagniatanych tocznie: a) kulka ( $R = 5 \text{ mm}$ ,  $F = 2,75 \text{ kN}$ ,  $f = 0,068 \text{ mm/obr}$ ), b) krążek ( $R_k = 5 \text{ mm}$ ,  $F = 2,75 \text{ kN}$ ,  $f = 0,41 \text{ mm/obr}$ ),

Wykonane analizy pozwalają na trójwymiarową analizę kształtu stref nagniatania uzyskanych przy różnych parametrach prowadzonej obróbki (rodzaj i wymiary narzędzia, siła nagniatania, posuw) i obróbki poprzedzającej (geometria narzędzia, posuw toczenia) [5, 6]. Możliwym staje się animacja pełnego obrotu i położenia analizowanej powierzchni. Możliwym staje się również wyznaczenie wykresów odchyłek okrągłości dla wybranego przekroju położonego na wybranej wysokości wyznaczonej wirtualnie powierzchni. Umożliwia to analizę kształtu strefy formowania nierówności w wybranych przekrojach prostopadłych do osi nagniatanej powierzchni walcowej.

## 2.2. POMIAR CHROPOWATOŚCI I STEREOMETRII POWIERZCHNI WALCOWEJ



Rys. 6. Schemat pomiaru powierzchni cylindrycznej na profilografometrze (opis w tekście)

Pomiary chropowatości i stereometrii wykonuje się z reguły na profilografometrach wyposażonych w stolik pozwalający na przesunięcie próbki o określoną wartość w kierunku poprzecznym do ruchu podstawowego. Takie pomiary pozwalają na zobrazowanie specyficznych cech topografii mierzonej powierzchni. Szczególne problemy mogą pojawić się jednak podczas pomiarów stereometrii realizowanych na powierzchniach cylindrycznych.

zwłaszcza tych o niewielkich średnicach. Pomiar taki najwygodniej jest wykonać przyjmując kierunek przesuwu igły pomiarowej równoległy do osi mierzonej powierzchni cylindrycznej – wzdłuż tworzących walca. Oczywistym jest jednak, że wraz z przesunięciem toru pomiaru (i pionowej płaszczyzny pomiaru) względem płaszczyzny pionowej przechodzącej przez oś badanej powierzchni o wielkość  $\Delta Y$  (rys.6), zmienia się wysokość położenia toru pomiaru. Może to (szczególnie przy powierzchniach o małych średnicach) uniemożliwić przeprowadzenie pomiaru, gdyż zmiana wysokości  $\Delta Z$  może przekroczyć zakres pomiarowy końcówki pomiarowej. Warto również zwrócić uwagę na to, że podczas kolejnych przejść pomiar odbywa się



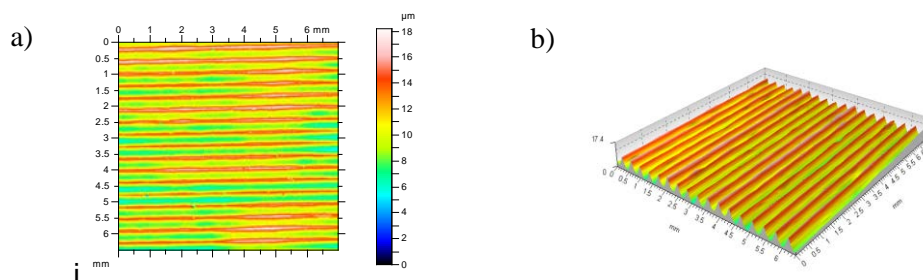
nie w płaszczyźnie normalnej do powierzchni cylindrycznej o promieniu  $R$ , ale w płaszczyźnie pionowej pochylonej względem tej normalnej o kąt  $\alpha$ . Kąt ten jest różny dla każdego wykonanego przejścia pomiarowego -  $\alpha = \arcsin(\Delta Y/R)$ . Jest on zależny od przesunięcia toru pomiaru względem płaszczyzny pionowej przechodzącej przez oś badanej powierzchni walcowej  $\Delta Y$ . Przekrój obszaru mierzonego płaszczyzną prostopadłą do kierunku przesuwu igły pomiarowej przedstawia rys.6.

Biorąc to pod uwagę, można stwierdzić iż pojawia się potrzeba wykorzystania podczas pomiarów stereometrii nagniatanych powierzchni walcowych innych metod pomiarowych. Taką metodą może być wyznaczenie stereometrii powierzchni walcowych na podstawie kolejnych pomiarów prostoliniowości realizowanych w regularnych odstępach kątowych na przyrządzie pomiarowym do pomiaru okrągłości [2]. W metodzie tej wszystkie pomiary wykonywane są w płaszczyznach normalnych do powierzchni walca. Nie zmienia się również położenie promieniowe toru pomiarowego (wszystkie pomiary są realizowane na promieniu



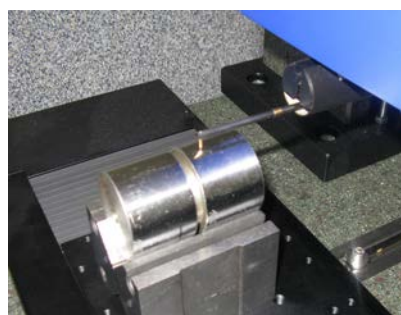
Rys. 7. Pomiar stereometrii powierzchni na przyrządzie do pomiaru okrągłości

o tej samej wartości). Tak więc ramie pomiarowe przyrządu nie przemieszcza się promieniowo podczas pomiaru. Do wykonania pomiarów chropowatości i stereometrii na przyrządzie pomiarowym Talyrond 365 wykorzystano końcówkę pomiarową w postaci igły diamentowej o promieniu  $5 \mu\text{m}$  (rys.7). Pomiar chropowatości realizowany jest przy sile nacisku końcówki  $3,5 \text{ mN}$  i rozdzielczości głowicy  $2 \text{ nm}$ . Całkowity szum własny urządzenia we wszystkich osiach określony parametrem  $R_q$  nie jest większy od  $20 \text{ nm}$ . W wyniku pomiaru uzyskuje się obraz wybranego fragmentu powierzchni bocznej walca. Na jednej z osi przedstawiono przebieg kolejnych pomiarów odmierzany wzdłuż kolejnych tworzących walca (w mm), na drugiej z osi można przedstawić położenie kątowe (w stopniach) na którym wyznaczono kolejne tworzące. Uwzględniając rzeczywisty promień walca w badanym obszarze możliwe jest przeliczenie tego położenia kątowego na odległość od pierwszej wyznaczonej tworzącej wyrażony w mm. Możliwości pomiarowe przyrządu zobrazowano na przykładzie pomiaru fragmentu powierzchni walcowej nagniatanej naporowo tocznie kulką ( $R_k = 5 \text{ mm}$ ,  $F = 3 \text{ kN}$ ,  $f = 0,35 \text{ mm/obr}$ ). Obróbkę wyników wykonano przy użyciu programu „TalyMap Platinum 5.1.1”. Otrzymany obraz rozwinięcia bocznej powierzchni walcowej przedstawiono na rys.8. Cyfrowe przetwarzanie otrzymanego pomiaru pozwala na dokonanie filtracji analizowanego obszaru prowadzące do oddzielenia falistości oraz wyznaczenie parametrów stereometrii i chropowatości powierzchni.

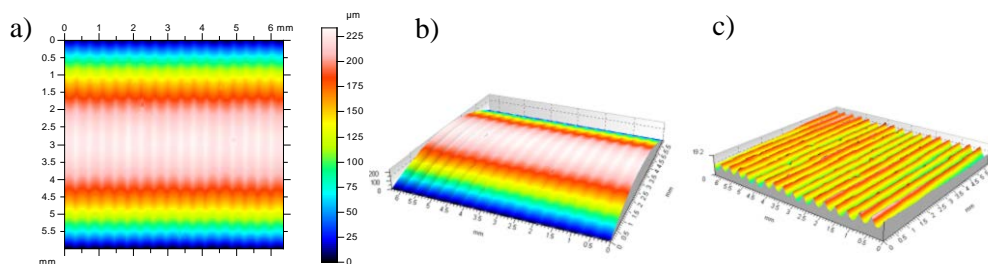


Rys. 8. Stereometria rozwinięcia powierzchni bocznej walca: a) mapa warstwicowa obszaru mierzonego, b) stereometryczny obraz strefy pomiaru

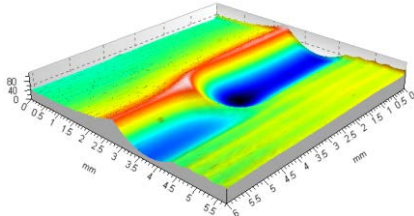
Pomiary porównawcze przedstawionego na rys.8 fragmentu powierzchni walcowej nagniatanej naporowo tocznie kulką wykonano wykorzystując profilografometr New Form Talysurf 2D/3D 120 z oprogramowaniem „Ultra Surface 5.21” i „TalyMap Platinum 5.1.1” (rys.9). Profilografometr ten umożliwia kompleksowy pomiar parametrów chropowatości i stereometrii warstwy wierzchniej w układzie 2D i 3D z rozdzielczością głowicy pomiarowej od 3,2 nm. Całkowity szum własny urządzenia Rq 8nm. W pomiarach wykorzystano końcówkę pomiarową w postaci igły diamentowej o promieniu 2  $\mu\text{m}$ . Nacisk końcówki 1 mN. Prostoliniowość bazy odniesienia X 250nm na 120mm. Obróbka cyfrowa analizowanego obszaru pozwala usunąć z obrazu składową kształtu (cylinder). Możliwym jest także wyznaczenie trójwymiarowego widoku stereometrii analizowanego fragmentu powierzchni (rys.10) oraz wyznaczenie wybranych parametrów jego stereometrii. Otrzymane wyniki pomiarów wykonanych przy wykorzystaniu obu prezentowanych metod dla najczęściej stosowanych parametrów stereometrii i chropowatości nie różnią się od siebie w sposób istotny (różnice nie przekraczają kilku %).



Rys. 9. Pomiar stereometrii zrealizowany na profilografometrze



Rys. 10. Stereometria wybranego obszaru powierzchni walcowej: a) mapa warstwicowa, b) widok 3D, c) trójwymiarowy widok stereometrii wybranego obszaru



Rys. 11. Stereometryczny obraz strefy deformacji

W trakcie realizacji procesu obróbki nagniataniem przed narzędziem przesuwają się fale zdeformowanego materiału (rys.11). Wykorzystanie opisanego profilografometru New Form Talysurf 2D/3D 120 umożliwia odtworzenie pełnego, trójwymiarowego kształtu analizowanej strefy kontaktu narzędzia nagniatającego z powierzchnią nagniataną kulką ( $R_k = 5\text{mm}$ ,  $F = 5\text{kN}$ ,  $f = 0,41\text{ mm/obr}$ ).

### 3 PODSUMOWANIE

Wykorzystanie do kompleksowych analiz błędów kształtu i jednoczesnych pomiarów parametrów stereometrii nagniatanych powierzchni walcowych skomputeryzowanych stanowisk pomiarowych zbudowanych na bazie profilografometrów i przyrządów do pomiaru okrągłości pozwala na znaczne zwiększenie ilości i podniesienie przejrzystości informacji możliwych do uzyskania w wyniku przeprowadzonych pomiarów. Możliwym staje się wykonanie szeregu różnych pomiarów na jednym stanowisku. Jest to przydatne, gdy zachodzi potrzeba równoczesnego wyznaczenia kształtu analizowanej powierzchni walcowej, jak również określenia błędów okrągłości, walcowości, czy też prostoliniowości wybranych tworzących tejże powierzchni. Ten sposób pomiaru może być szczególnie przydatny do wyznaczania stereometrii obszarów o znacznych szerokościach, mierzonych na powierzchniach cylindrycznych o niewielkich średnicach, a więc w sytuacjach, gdy tradycyjny pomiar na profilografometrze nie zdaje egzaminu z uwagi na przekroczenie zakresu pomiaru.

### LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S.: *Pomiary geometryczne powierzchni, zarysy kształtu, falistości i chropowatości*. WNT. Warszawa 2008.
- [2] CZARNECKI H., CHMIELIK I.P., ZABORSKI A.: *Analiza możliwości pomiarów stereometrii powierzchni walcowych przy zastosowaniu przyrządów pomiarowych do pomiarów okrągłości i chropowatości*. Monografia „Postępy w metrologii współrzędnościowej” pod redakcją Jerzego Składka i Władysława Jakubca. Wyd. ATH w Bielsku – Białej. Bielsko – Biała 2010, str.195 – 205.
- [3] OCZOŚ K., LIUBIMOV V.: *Struktura geometryczna powierzchni*. Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2003.
- [4] WIECZOROWSKI M., CELLARY A., CHAJDA J.: *Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni, czyli o chropowatości i nie tylko*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2003.
- [5] ZABORSKI A.: *Analiza formowania strefy deformacji w procesie nagniatania*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej Seria Monografie nr 260. Częstochowa 2013.
- [6] ZABORSKI A.: *Komputerowa analiza procesu formowania strefy deformacji w trakcie nagniatania*. Mechanik 7/2012, str.607 (streszczenie – pełny tekst na CD).

# **WYKORZYSTANIE LASEROWEGO SKANERA 3D ORAZ WSPÓLRZĘDNOŚCIOWEJ MASZYNY POMIAROWEJ DO BUDOWY I OCENY MODELU KOŁA ZĘBATEGO**

Piotr ZGÓRNIAK<sup>1</sup>, Wojciech STACHURSKI<sup>1</sup>,

## **1. WPROWADZENIE**

Ze względu na szeroki rozwój przemysłu lotniczego, motoryzacyjnego, rolniczego, obserwuje się ciągle rosnące zapotrzebowanie na wytwarzanie kół zębatach. Ich niezawodna praca jest uwarunkowana wieloma czynnikami związanymi z technologią wykonania, obróbką cieplną, doбором materiału konstrukcyjnego. Efekty tych działań można zweryfikować jedynie poprzez sprawdzenie czy nasz produkt finalny spełnia określone wymagania. W tym właśnie zadaniu szczególną rolę odgrywa kontrola jakości. Jak wiadomo, aby przekładnia zębata charakteryzowała się niezawodnością, cichobieżnością oraz pełną zamiennością części składowych niezbędna jest ocena dokładności geometrycznej kół zębatach. W dziedzinie metrologii również obserwuje się coraz częściej wykorzystanie technik inżynierii odwrotnej a w szczególności wykorzystywanie danych uzyskanych ze skanerów 3D do oceny dokładności geometrycznej elementów maszyn i urządzeń. Coraz częściej można zaobserwować wykorzystanie różnego rodzaju urządzeń skanujących ręcznych, mocowanych na przenośnych ramionach pomiarowych bądź droższych rozwiązań bazujących na skanerach światła strukturalnego.

## **2. WARUNKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH**

Do analizy modelu koła zębatego oraz do wykonania modelu CAD, będącego plikiem referencyjnym w dalszych pomiarach współrzędnościowych, wykorzystano ramię pomiarowe Infinity 2 firmy CimCore z zamontowaną laserową przystawką skanującą firmy Perceptron V4i. Widok ogólny stanowiska do skanowania 3D został

---

<sup>1</sup> Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i TBM, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

przedstawiony na rys. 1, a podstawowe dane techniczne ramienia pomiarowego zestawiono w tabeli 1.



Tabela 1. Parametry techniczne ramienia pomiarowego CIMCORE Infinity 2.0 [1]

Zakres pomiarowy:	2.4 m
Dokładność wg testu A [mm] – Test pojedynczego punktu na kulce kalibracyjnej	$\pm 0,013$ mm
Dokładność wg testu A [mm] – Test powtarzalności punktu	$\pm 0,020$ mm
Dokładność wg testu C [mm] – Test przestrzennej dokładności liniowej	$\pm 0,029$ mm
Metody określania dokładności (wszystkie dla $\pm 2\sigma$ )	

Rys. 1. Ramię pomiarowe CimCore Infinity 2.0 wraz z przystawką Perceptron v4i

W celu wykonania skanowania przestrzennego na końcowym przegubie ramienia pomiarowego zamontowano przystawkę laserową firmy Perceptron V4i.

Na podstawie danych technicznych przystawki laserowej dostarczonych przez producenta [1] w linii skaner rejestruje 768 punktów. Przy największej częstotliwości wyświetlania linii wynoszącej 30 Hz, prędkość skanowania wynosi 23040 punktów/sekundę. Rozdzielczość dla przystawki Perceptron v4i określona na kuli wzorcowej wynosi  $4.5 \mu\text{m}$  w przedziale ufności  $2\sigma$ . Powtarzalność według danych producenta wynosi  $5 \mu\text{m}$  natomiast dokładność w przedziale ufności 2 sigma wynosi  $24 \mu\text{m}$ .

Uwzględniając fakt, iż parametry techniczne ramienia pomiarowego oraz przystawki skanującej są błędami niezależnymi od siebie, całkowity błąd pomiarowy oszacowano jako sumę arytmetyczną błędów składowych. Niniejszy sposób oszacowania całkowitego błędu miał jedynie służyć stwierdzeniu, czy wykorzystanie tego typu sprzętu jest w ogóle uzasadnione do oceny tak dokładnych komponentów maszyn jakimi są koła zębate. Oznaczając błąd całkowity zestawu pomiarowego jako  $\Delta z_1$  określono jego wartość jako sumę algebraiczną błędu ramienia  $\Delta p_r = \pm 0,029$  mm oraz błędu przystawki laserowej  $\Delta p_{pl} = \pm 0,024$  mm. Oszacowana wartość całkowitego błędu zestawu wyniosła  $\Delta z_1 = 0.058 + 0.048 = 0,106$  mm w przedziale poziomu ufności  $2\sigma$ .

Autorzy artykułu zdają sobie sprawę, że ten sposób określenia błędu pomiarowego

zastawu może być krzywdzący dla wykorzystywanego sprzętu i powinien być on określony choćby na podstawie wykonania opracowania wyniku pomiaru wielokrotnego znanej wartości nominalnej np. płytek wzorcowych, kulek wałeczków. Ze względu na fakt, iż artykuł nie dotyczy określania błędu pomiaru zestawu pomiarowego zagadnienie to w dalszej części artykułu nie będzie poruszane, natomiast autorzy planują zająć się tym ciekawym zagadnieniem w kolejnych publikacjach naukowych.

Analizując oszacowaną wartość całkowitego błędu pomiarowego można mieć uzasadnione obawy, iż zastosowanie skanowania laserowego do oceny dokładności geometrycznej kół zębatach jest nieuzasadnione do oceny dokładnych kół zębatach klas 5-8. Jednak dla kół mniej dokładnych stosowanych na przykład w maszynach rolniczych oraz dla kół o większych gabarytach, gdzie pola tolerancji mają większą wartość może okazać się wystarczające. Pomimo faktu relatywnie małej dokładność zestawu do skanowania 3D postanowiono wykorzystać dane uzyskane ze skanera do porównania dokładności skanu 3D w stosunku do koła wygenerowanego w sposób automatyczny za pomocą modułu Engineering Reference w programie Solid Edge. Ten zabieg miał na celu stwierdzenie, czy i w jaki sposób można oceniać dokładność wymiarową koła zębatego. Parametry mierzonego koła podano w tabeli 2.

Tabela 2. Podstawowe parametry koła zębatego określone na podstawie rysunku konstrukcyjnego koła zębatego

Liczba zębów	$z$	26
Moduł normalny	$m$	5
Luz wierzchołkowy	$c$	1.0
Kąt zarysu	$\alpha$	20°
Kąt pochylenia linii zęba	$\beta$	-
Kierunek pochylenia linii zęba		-
Współczynnik przesunięcia zarysu	$x$	0
Dokładność wykonania	$IT$	8
Długość wzdłuż wspólnej normalnej przez 4 zęby		
Średnica podziałowa	$d_p$	130 mm
Wysokość zęba		5

Do finalnego określenia dokładności geometrycznej koła zębatego posłużono się maszyną współrzędnościową firmy DEA Global Performance. Widok ogólny maszyny współrzędnościowej przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2 Widok ogólny maszyny współrzędnościowej DEA Global Performance

Tabela 3. Parametry techniczne maszyny współrzędnościowej DEA Global Performance [10]

Zakres pomiarowy:	500x500x500
Specyfikacja dokładności [ $\mu\text{m}$ ]	ISO 10360
$MPE_E = \text{od } 1.5 + 3.0 * L/1000$	
$MPE_{THP/T} = \text{od } 2.9 \mu\text{m} / 45 \text{ s}$	

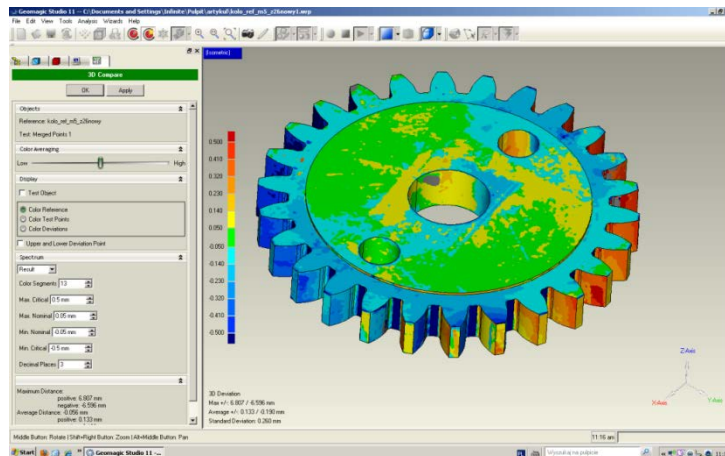
### 3. METODYKA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia zaplanowanych pomiarów dotyczących określenia dokładności koła zębatego wykonanego metodą dłutowania Fellowsa, konieczne było podjęcie następujących działań.

W pierwszym etapie dokonano wstępnej oceny koła zębatego za pomocą konwencjonalnych technik pomiarowych. Następnie na ich podstawie za pomocą programu Solid Edge stworzono model koła zębatego wykorzystując moduł Engineering Reference. Następnie wykonano skanowanie rzeczywistego koła zębatego. Na podstawie porównania uzyskanej chmury punktów ze skanera stwierdzono znaczne różnice szczególnie w obszarze linii przejściowej w pobliżu średnicy den wrębów. Przykład analizy wykonanej w programie Geomagic Studio wskazuje, że geometria koła zęba w pobliżu średnicy den wrębów znacznie odbiega od geometrii uzyskanej w programie CAD. Nie jest tajemnicą, że promień przejściowy różni się w zależności od zastosowanej technologii wykonywania kół zębatych. Koło zębate wykorzystane do celów niniejszego artykułu zostało wykonane poprzez dłutowanie Fellowsa, które charakteryzuje się inną geometrią niż ma to miejsce podczas frezowania obwiedniowego. Przykład analizy porównującej geometrię modelu CAD z modułu Engineering Reference, z chmurą punktów



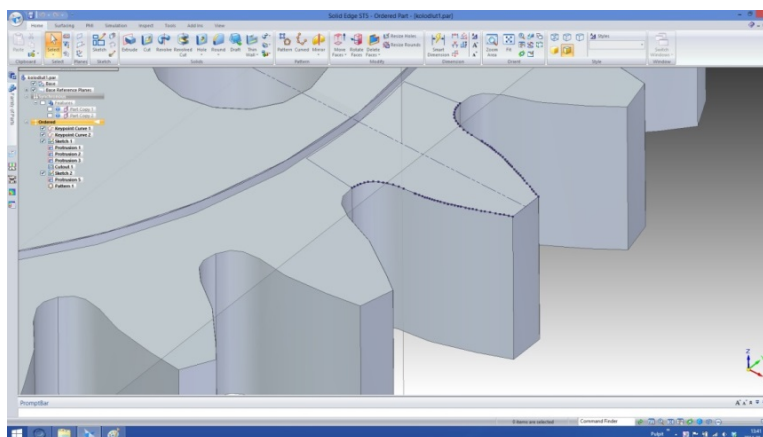
uzyskaną podczas skanowania rzeczywistego obiektu zaprezentowano na rys. 3.



Rys. 3. Analiza 3D geometrii koła oraz chmury punktów uzyskanej podczas skanowania

Na podstawie przeprowadzonej analizy autorzy doszli do wniosku, iż przyjmowanie automatycznie uzyskanej geometrii zębów kół zębatych nie daje jednoznacznych wyników oceny dokładności koła zębatego.

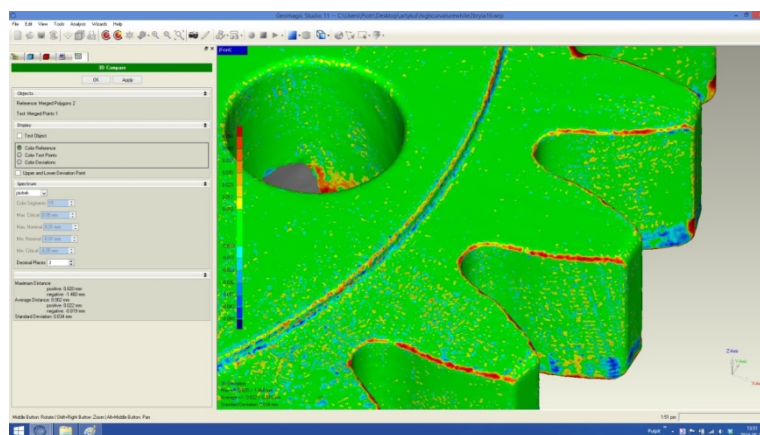
W drugim etapie postanowiono wykonać model CAD koła zębatego na bazie uzyskanej chmury punktów ze skanera 3D. Ponieważ obiekt rzeczywisty charakteryzuje się nierównomierną podziałką postanowiono przyjąć jako ząb bazowy ząb o numerze 1, którego środek pokrywa się z osią x przyjętego układu współrzędnych. Widok koła zaprojektowanego na bazie danych uzyskanych ze skanera laserowego przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Model 3D koła zębatego zaprojektowany na podstawie danych ze skanera laserowego



Kolejnym krokiem było przeprowadzenie ponownej analizy 3D modelu koła zębatego stworzonego na bazie skanowania w programie Solid Edge oraz chmury punktów uzyskanej podczas skanowania zestawem zaprezentowanym na rys. 1. Wyniki tej analizy przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Analiza 3D dotycząca sprawdzenia poprawności wykonania modelu CAD koła zębatego w porównaniu z chmurą punktów uzyskaną ze skanera

Na podstawie wyników uzyskanych z analizy 3D stwierdzono dobrą zgodność modelu CAD w stosunku do pierwszego zęba bazowego. W tej analizie jako wartości nominalne określono zakres  $\pm 0.01$  mm a jako wartości krytyczne  $\pm 0.1$  mm. W przypadku wyników zaprezentowanych na rys. 3 zakres wartości nominalnych wynosił  $\pm 0.05$  mm a zakres wartości krytycznych  $\pm 0.5$  mm. Pomimo zawężenie obszaru analizy 3D uzyskano zadowalające według autorów wyniki. Dane dotyczące bocznych powierzchni roboczych zęba mieszczą się w zakresie nominalnym. Jedynie w miejscach fazowań, które nie zostały uwzględnione w modelu CAD obserwuje się większe różnice. Jest to spowodowane trudnościami skanera 3D w akwizycji punktów z ostrych obszarów, jakimi są krawędzie oraz faktem niezamodelowania sfazowań w programie Solid Edge. Ponieważ inspekcja rzeczywistego koła zębatego na maszynie współrzędnościowej nie obejmowała obszarów sfazowań, uznano za bezzasadne poprawianie modelu CAD koła zębatego w tych obszarach.

Ocena dokładności geometrycznej koła zębatego na maszynie współrzędnościowej został podzielona na dwa etapy. W pierwszym przypadku wykorzystano specjalistyczny program PC-DMIS Gear v. 2.3, którego głównym zadaniem jest inspekcja typowych kół zębatych. Podstawową jego zaletą jest brak konieczności wykonywania modelu CAD jako referencji do pomiarów. Ten fakt znacznie ułatwia i przyspiesza proces inspekcji kół zębatych. Na podstawie danych geometrycznych, tj. liczby zębów, modułu, kąta przyporu, kąta linii zęba, szerokości wieńca, współczynnika korekcji, typu koła zębatego (koło o zębach prostych o użębieniu

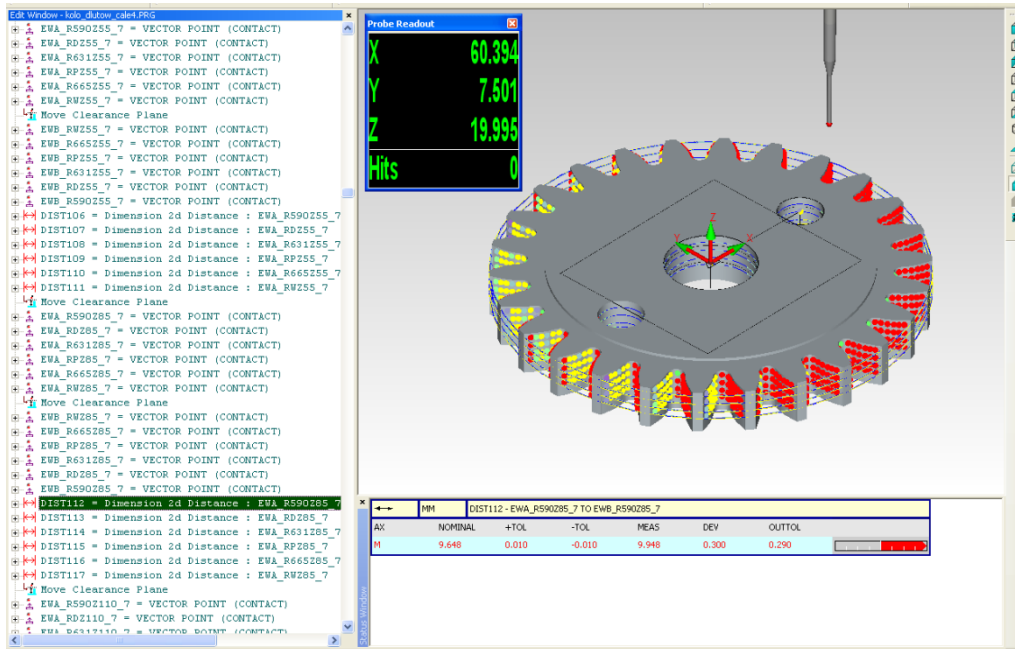
zewnątrznym) program w procedurze półautomatycznej dokonuje bazowania koła zębatego oraz przyjmuje lokalny układ współrzędnych. Następnie po wyborze interesujących parametrów program automatycznie dokonuje inspekcji koła zębatego.

Na podstawie danych dotyczących geometrii koła zębatego oraz rodzajów pomiarów jakie są nam potrzebne do ewaluacji koła zębatego, program generuje automatycznie raport z wynikami pomiarów. Na jego podstawie jesteśmy w stanie stwierdzić do jakiej klasy IT należy sprawdzane koło i jaki parametr ją determinuje.

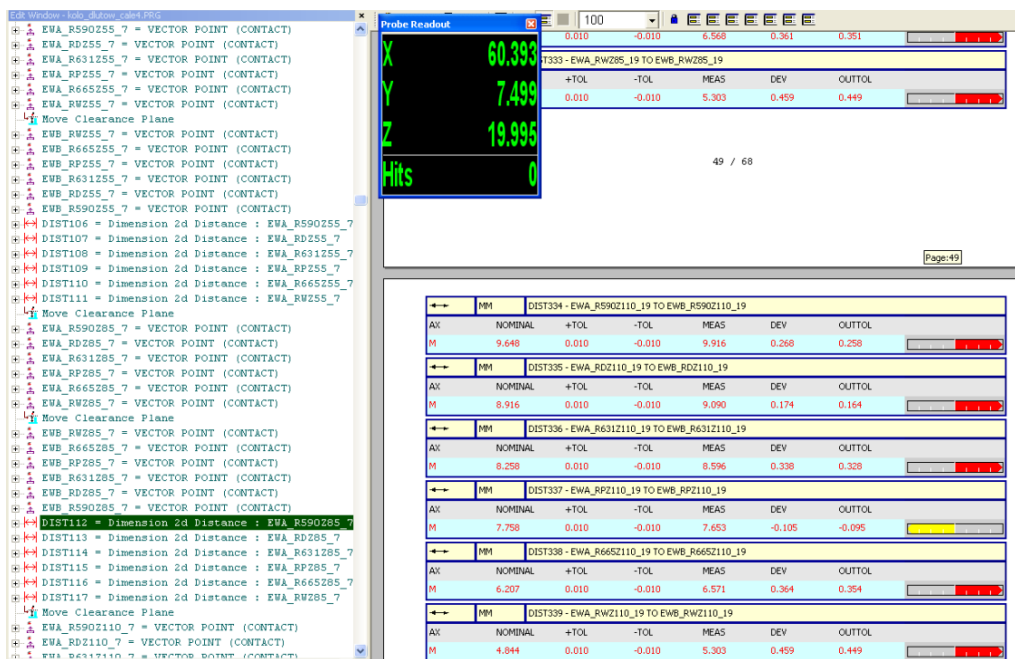
Wyniki uzyskane za pomocą programu PC- DMIS Gear są w większości przypadków wystarczające, natomiast sam program nie umożliwia dostępu do „surowych” danych pomiarowych, a tym samym może okazać się niewystarczający do bardziej zaawansowanych analiz. Jest on swego rodzaju nakładką programu PC-DMIS. Jeżeli mamy dostęp do tego specjalistycznego programu to w większości przypadków bezcelowe jest wykonywanie pomiarów z wykorzystaniem modelu referencyjnego. Natomiast, gdy jesteśmy zainteresowani konkretnymi danymi, których nie możemy uzyskać z programu PC-DMIS Gear albo po prostu nie mamy do niego dostępu konieczne jest wykorzystanie pliku CAD jako referencji i napisania własnego programu pomiarowego. Autorzy postanowili sprawdzić, czy da się uzyskać interesujące ich dane w standardowej wersji programu PC- DMIS. W tym celu do przestrzeni roboczej programu PC-DMIS wczytano model CAD zbudowany na bazie danych ze skanera 3D. Do budowy lokalnego układu współrzędnych wykorzystano górną płaszczyznę koła jako poziom zero odpowiadający kierunkowi Z. Oś X zbudowano na bazie punktów środka otworu osadczego oraz prawego otworu indeksującego. Początek układu współrzędnych znajduje się w środku otworu osadczego. Następnie postanowiono zmierzyć interesujące średnice, a w szczególności średnice otworu osadczego, średnicy wierzchołkowej oraz średnicy stóp. W celu sprawdzenia geometrii części ewolwentowej zębów oraz promieni przejściowych zastosowano punkty wektorowe, których współrzędne nominalne odpowiadały geometrii koła uzyskanego ze skanowania 3D. Na każdym boku zęba umieszczono 6 punktów pomiarowych rozmieszczonych na czterech poziomach w kierunku Z.

Miejsce przyjętego układu współrzędnych zostało zaprezentowane na przykładowym widoku interfejsu graficznego programu PCDMIS (rys. 6). Ponadto różne kolory punktów wektorowych reprezentują odchyłki od modelu zbudowanego na bazie skanowania 3D.

Przykładowy raport przedstawiono na rys. 7. Wyniki dotyczą grubości zębów. Wartości pól tolerancji zostały przyjęte dla 8 klasy dokładności. Wartości umieszczone w kolumnie NOMINAL dotyczą koła zbudowanego na bazie skanowania 3D natomiast wartości w kolumnie MEAS dotyczą wyników uzyskanych na podstawie pomiarów maszyną współrzędnościową. Zakładając, że pomiar dotykowy jest dokładniejszy sugeruje się ponowne wykonanie modelu CAD koła zębatego na bazie pomiarów dotykowych. Wczytanie modelu do przestrzeni roboczej programu PCDMIS oraz przeprowadzenie procedury pomiarowej.



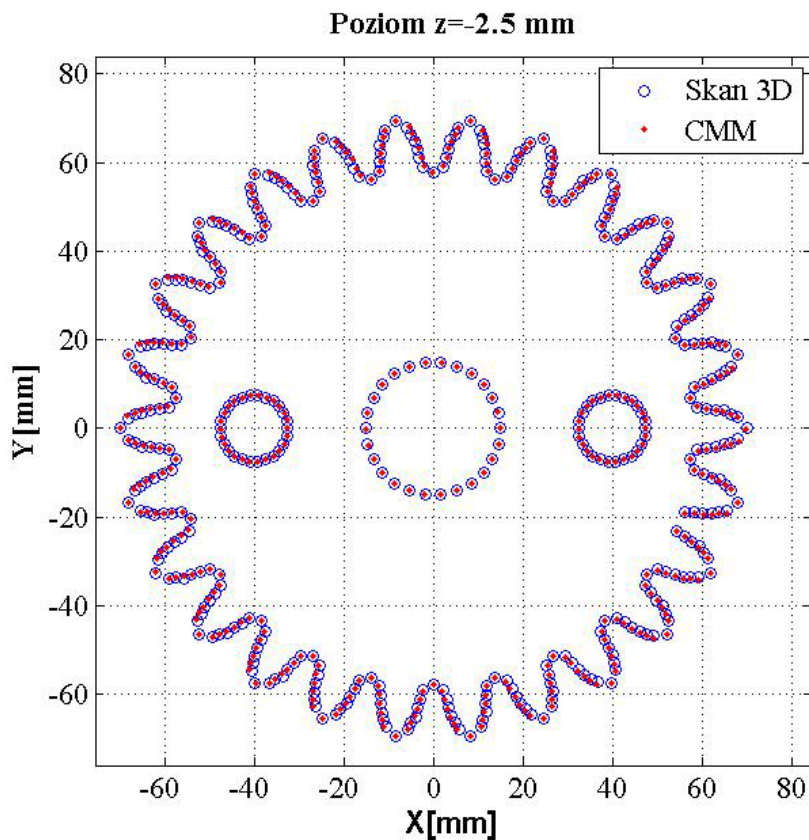
Rys. 6. Interfejs graficzny programu sterującego maszyny współrzędnościowej PCDMIS



Rys. 7. Widok okna raportu programu PCDMIS

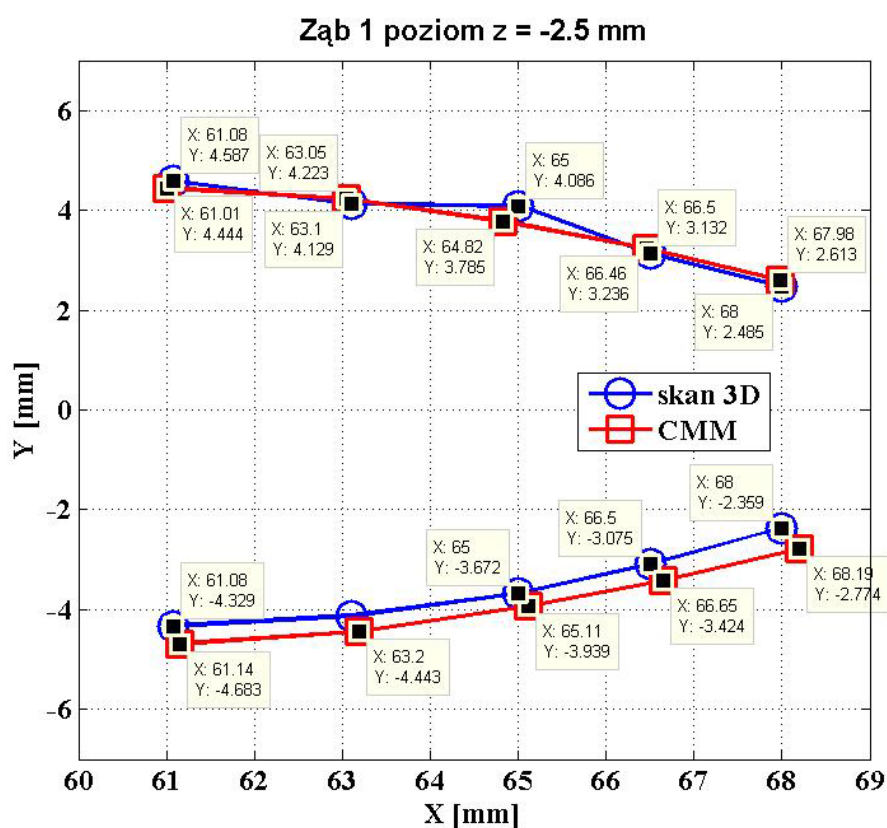
#### 4. WYNIKI POMIARÓW

Plan badań obejmował wykonanie pomiarów na czterech poziomach w kierunku osi  $z = (-2.5, -5.5, -8.5$  oraz  $-11$  mm). Ze względu na ograniczenia długości końcówki pomiarowej postanowiono ostatni poziom  $z = -11$  mm dla otworu osadczego oraz dwóch otworów indeksujących zastąpić poziomem  $z = -10$  mm. W przypadku punktów na ewolwentach zębów kół zębatach, punktów odpowiadających średnicom den wrębów i wierzchołkowej oraz punktów na promieniach przejściowych w pobliżu koła zasadniczego ostatni poziom w kierunku  $z$  wynosił  $-11$  mm. Wartości ujemne są związane ze sposobem przyjęcia lokalnego układu współrzędnych na maszynie współrzędnościowej. Po zapisaniu danych w formacie Microsoft Excel dokonano analizy uzyskanych wyników. Przykład wyników dotyczących jednego poziomu ( $z = -2.5$  mm) punktów zarejestrowanych na podstawie pomiarów współrzędnościowych zaprezentowano na rys. 8.



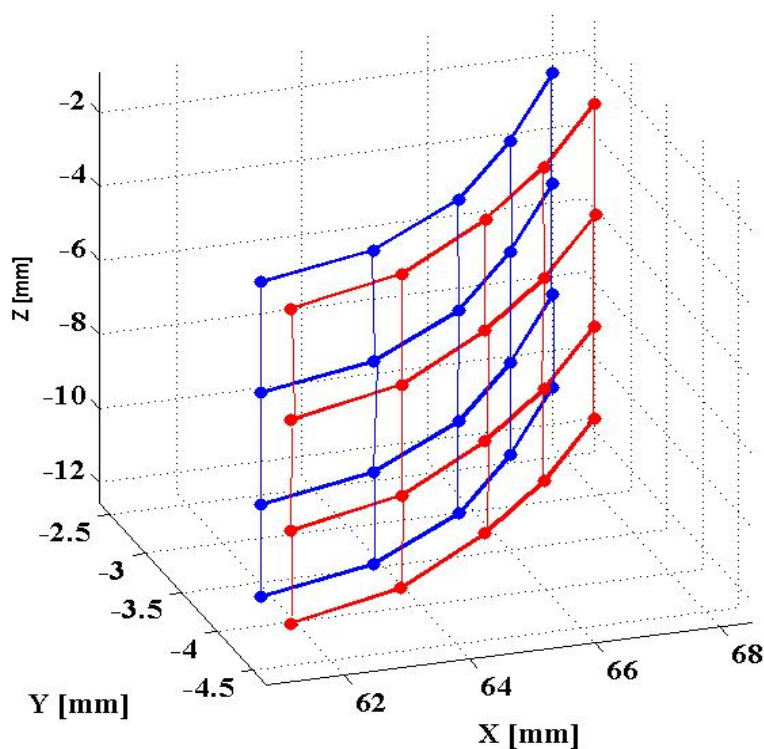
Rys. 8. Porównanie współrzędnych punktów uzyskanych poprzez skanowanie laserowe oraz pomiar za pomocą maszyny współrzędnościowej

W celu określenia takich parametrów koła zębatego jak grubość zęba, kąt pochylenia linii zęba czy podziałkę można do tego celu wykorzystać współrzędne punktów uzyskanych z pomiarów współrzędnościowych. Na rys. 9 podano wyniki dotyczące pierwszego zęba bazowego na poziomie  $z=-2.5$  mm. W celu wyznaczenia błędów profilu ewolwentowego powinno się przyjąć większą liczbę punktów kontrolnych na powierzchni bocznych zębów. Liczba 5 punktów na powierzchni ewolwentowej zęba została przyjęta arbitralnie w celu przedstawienia metody. Podobna sytuacja dotycząca liczby 4 poziomów wyznaczanych w kierunku osi Z w celu wyznaczenia linii zębów (rys. 10).



Rys. 9. Wyniki dotyczące współrzędnych punktów kontrolnych uzyskanych za pomocą skanowania 3D oraz pomiaru maszyną współrzędnościową

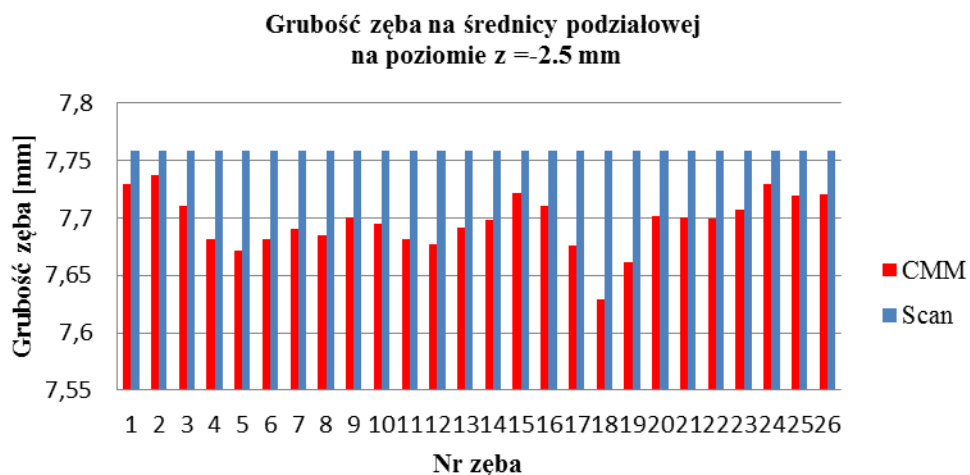
### Wyniki dotyczące prawej flanki zęba nr 1



Rys. 10. Wyniki dotyczące jednej powierzchni roboczej zęba na wszystkich mierzonych poziomach w kierunku osi z

Analizując wyniki zaprezentowane na rys. 9 i rys. 10 zauważono, że dolna strona zęba 1 w przypadku pomiaru maszyną współrzędnościową charakteryzuje się zewnętrznym ułożeniem względem odpowiadającej jej powierzchni zęba uzyskanej ze skanu 3D. Jednak analizując rys. 9 widać, że górna strona powierzchni bocznej zęba uzyskana ze skanowania przecina się z powierzchnią uzyskaną na maszynie współrzędnościowej. W celu klarownego zaprezentowania wyników postanowiono przedstawić wyniki grubości wszystkich zębów na średnicy koła podziałowego. Dla przykładu, na rys. 11, przedstawiono wyniki dotyczące zmienności grubości zęba na średnicy podziałowej mierzonych na poziomie  $z = -2.5$  mm. Wyniki dotyczące grubości zęba uzyskane z modelu referencyjnego zbudowanego na bazie jednego zęba skanowanego mają tę samą wartość. Ten fakt wynika z przyjętej metodyki badań eksperymentalnych.





Rysunek 11. Zmienność grubości zęba na średnicy podziałowej na poziomie z = -2.5 mm

Na jego podstawie możemy stwierdzić, że zęby koła uzyskane w technologii skanowania 3D mają większy wymiar w porównaniu do grubości zębów uzyskanych na podstawie pomiarów współrzędnościowych.

## 5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie technik inżynierii odwrotnej daje bardzo duże możliwości oceny dokładności kształtowo-wymiarowej od strony specjalistycznego oprogramowania. Wykorzystanie skanerów trójwymiarowych do inspekcji dokładnych części typu koła zębate może być obarczone dużymi błędami. Na ten fakt składają się trudności akwizycji punktów pomiarowych z obszaru krawędzi, głębokich otworów szczególnie o małej średnicy. Dodatkowym czynnikiem zakłócającym są trudności w skanowaniu powierzchni odbłaskowych, polerowanych, transparentnych itp. Stosowanie substancji antyrefleksyjnych poprawia jakość uzyskiwanych skanów natomiast zmienia wymiary skanowanych obiektów. Ponadto proces nakładania warstwy antyrefleksyjnej nie jest powtarzalny i wiąże się z koniecznością mycia elementów sprawdzanych. W celu przyspieszenia procesu inżynierii odwrotnej mającej na celu tworzenie modeli referencyjnych sugeruje się dokładne skanowanie mniejszej ilości elementów powtarzalnych i tworzenie modeli na bazie wyselekcjonowanej pod względem dokładności chmurze punktów. Kluczowym zagadnieniem jest odpowiedni wybór sprzętu pomiarowego do realizowanych celów. W skanerach obsługiwanych ręcznie istnieje konieczność dopasowywania do siebie chmur punktów z wielu skanów co również nie jest obojętne na uzyskiwaną dokładność skanowania. Nowoczesne rozwiązania skanerów działających na zasadzie światła strukturalnego [8, 9] znacznie

polepszają jakość oraz skracają czas potrzebny do uzyskania skanów natomiast nadal nie dają dokładności pomiarowej rzędu mikrometrów.

#### LITERATURA

- [1] OBERON 3D – Specyfikacja techniczna – oferta nr MK/CC/331c/9 rok 2009.
- [2] WRÓBEL I., *Inżynieria odwrotna jako metoda tworzenia cyfrowych modeli przedmiotów o skomplikowanych kształtach*. W: Mechanik 3, 2010, 212-214.
- [3] KOWALSKI M., KOWALSKI M., PASZKIEWICZ R., KUCZKO W., WICHNIAREK R., ZAWADZKI P., *Automatyzacja procesu skanowania na podstawie danych pozyskanych z pomiarów fotogrametrycznych*. W: Postępy nauki i techniki 7, 2011, 109-119.
- [4] GAO J., CHEN X., ZHENG D., YILMAZ O., GINDY N., *Adaptive restoration of complex geometry parts through reverse engineering application*. W: Advances in Engineering Software 37, 2006, 592-600.
- [5] ZEXIAO X., JIANGUO W., QIUMEI Z., *Complete 3D measurement in reverse engineering using a multi-probe system*. W: International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, 2005, 1474-1486.
- [6] SANSONI G., DOCCHIO F., *Three-dimensional optical measurements and reverse engineering for automotive applications*. W: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 20, 2004, 359-367.
- [7] STĘPIEŃ K., MAKIEŁA W., *An analysis of deviations of cylindrical surfaces with the use of wavelet transform*, W: Metrology and Measurement Systems, No. 1, Vol. XX, 2013, 139-158.
- [8] [www.smarttech3d.com](http://www.smarttech3d.com).
- [9] [www.gom.com/metrology-systems/3d-scanner.html](http://www.gom.com/metrology-systems/3d-scanner.html).
- [10] [www.hexagonmetrology.pl/DEA-GLOBAL-Silver-Performance\\_120.htm#.U5a73xa0Pgg](http://www.hexagonmetrology.pl/DEA-GLOBAL-Silver-Performance_120.htm#.U5a73xa0Pgg).



# **ANALIZA KSZTAŁTU ELEMENTÓW WALCOWYCH MIERZONYCH METODĄ ODNIESIENIOWĄ W CELU WYZNACZENIA ODCHYLEK FALISTOŚCI**

Paweł ZMARZŁY<sup>1</sup>, Stanisław ADAMCZAK<sup>1</sup>, Krzysztof STĘPIEŃ<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

W wielu przypadkach zarówno w warunkach przemysłowych, jak i laboratoryjnych ocena struktury powierzchni cylindrycznych ogranicza się jedynie do pomiaru odchyłki okrągłości w zakresie 1–15 fal/obrót. Natomiast dokonując oceny zarysów elementów okrągłych powinno się badać kompleksowo strukturę geometryczną powierzchni w tym także falistość. Jak wykazały badania falistość powierzchni cylindrycznych odgrywa znaczącą rolę w budowie i eksploatacji maszyn [6], ponieważ nadmierna wartość odchyłki falistości może powodować powstawanie drgań oraz szumów obrotowych części maszyn, co obniża komfort użytkowania oraz żywotność mechanizmów.

Zarówno w polskiej jak i zagranicznej literaturze rzadko spotyka się prace związane z oceną zarysów falistości powierzchni okrągłych, szczególnie dużych elementów walcowych.

Powszechnie stosowanymi metodami pomiarowymi służącymi do oceny okrągłości powierzchni cylindrycznych są metody bezodniesieniowe zwane również metodami pomiaru zmian promienia. Najprostszym sposobem realizacji metody bezodniesieniowej jest pomiar w urządzeniu kłowym. Pomimo tego, że pomiar taki jest stosunkowo prosty i powszechnie stosowany w warunkach przemysłowych wymaga, aby przedmiot mierzony posiadał precyzyjnie wykonane nakielki, ponieważ dokładność ich wykonania wpływa na wynik pomiarowy. Kolejną grupą przyrządów pomiarowych bazujących na pomiarze zmian promienia są przyrządy oparte na metodzie z obrotowym stołem lub czujnikiem, cechujące się wysoką dokładnością

---

<sup>1</sup> Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce.

pomiarową. Pewną niedogodnością ich stosowania jest czasochłonność oraz pewna trudność związana z centrowaniem przedmiotu mierzonego na stoliku pomiarowym, wymagająca od operatora opanowania oraz doświadczenia. Przyrządy takie, również są bardzo wrażliwe na zanieczyszczenia oraz drgania, dlatego mają zastosowanie głównie laboratoryjne. Należy dodatkowo wspomnieć, że zastosowanie metody bezodniesieniowej z obrotowym stołem lub czujnikiem do pomiaru odchyłki okrągłości oraz falistości elementów okrągłych o dużych wymiarach oraz dużym ciężarze jest znacznie utrudnione, ze względu na ograniczoną przestrzeń roboczą stolika pomiarowego.

Rosnące wymagania związane z produkcją elementów cylindrycznych cechujących się wysoką jakością przy jednoczesnym zachowaniu niskich kosztów produkcji, wymaga opracowania systemów pomiarowych, które oprócz wysokiej dokładności pomiarowej powinny być łatwe w obsłudze, tanie, niezawodne oraz mogą być zastosowane bezpośrednio w warunkach produkcyjnych. Szczególnie duże znaczenie ma to w przypadku produkcji dużych elementów cylindrycznych (przemysł tekstylny, okrętowy, papierniczy), ponieważ każda wada produktu wiąże się z dużymi kosztami. W takim przypadku stosowne wydaje się zastosować przyrządy pomiarowe oparte na metodzie odniesieniowej.

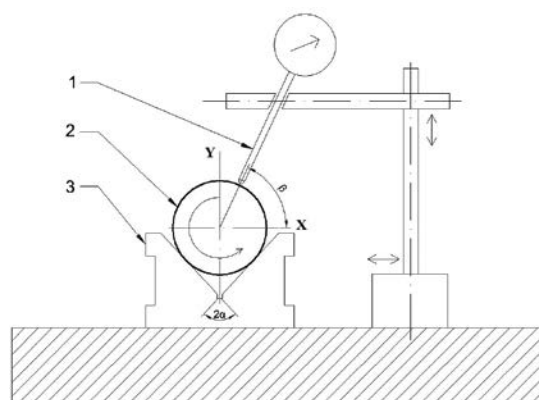
## 2. KONCEPCJA ZASTOSOWANIA METODY ODNIESIENIOWEJ DO POMIARU FALISTOŚCI ELEMENTÓW OKRĄGŁYCH

Liczne prace badawcze dowiodły, że metody odniesieniowe mogą być użyte do pomiaru odchyłki okrągłości [1,8] oraz walcowości [2] dużych elementów cylindrycznych w warunkach przemysłowych. Prowadzone były, również badania mające na celu zastosowanie pneumatycznych przetworników długości do oceny odchyłki okrągłości wewnętrznych powierzchni cylindrycznych bazując na metodzie odniesieniowej [7].

Należy dodać, że konstrukcja przyrządów pomiarowych opartych na metodzie odniesieniowej jest stosunkowo prosta, a tym samym przyrządy te są tanie i bardziej niezawodne.

Pomimo tego, że prowadzono liczne prace mające na zastosowanie metody odniesieniowej do dokładnych pomiarów odchyłki okrągłości, brak jest prac badawczych związanych z oceną dokładności odniesieniowych pomiarów realizowanych w szerszym zakresie pomiarowym tj. 16–50 fal/obrót, przedstawiającym falistości powierzchni cylindrycznych.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat pomiaru odchyłki okrągłości przy użyciu trójpunktowej metody odniesieniowej.



Rys. 1. Pomiar odchyłki okrągłości trójpunktową metodą odniesieniową: 1 – czujnik, 2 – przedmiot mierzony, 3 – pryzma pomiarowa

Analizując pomiar odchyłki okrągłości lub falistości elementów cylindrycznych trójpunktową metodą odniesieniową, której schemat przedstawiono na rysunku 1, przedmiot mierzony (2) umieszczony jest na pryzmie pomiarowej (3), natomiast końcówka czujnika pomiarowego (1) styka się z powierzchnią mierzoną. Dwa punkty styku przedmiotu mierzonego z pryzmą pomiarową uważane są za punkty bazowe, natomiast punkt styku końcówki pomiarowej czujnika z powierzchnią mierzoną oznaczony jest jako punkt pomiarowy. Parametry metody odniesieniowej czyli kąt  $\alpha$  oraz  $\beta$  (patrz rys. 1), określają wzajemne położenie punktów bazowych oraz punktu pomiarowego w stosunku do wcześniej ustalonego układu współrzędnych.

Wartości wskazywane przez czujnik pomiarowy zależą od odchyłek występujących w punktach bazowych oraz odchyłki występującej w punkcie pomiarowym (punkcie styku końcówki pomiarowej czujnika z powierzchnią mierzoną). W związku z tym sygnał uzyskany z czujnika pomiarowego jest zakłócony między innymi pierwszą harmoniczną związaną z mimośrodowością ustalenia przedmiotu mierzonego na pryzmie pomiarowej. Dlatego na początku metody odniesieniowe cechowały się małą dokładnością i by wykorzystywane jedynie do szacunkowej oceny odchyłki okrągłości.

W celu zwiększenia dokładności odniesieniowych pomiarów zarysów okrągłości lub falistości, należało przeprowadzić transformację zarysu zmierzonego  $F(\varphi)$  na zarys przetworzony  $R_p(\varphi)$ , przy użyciu zależności matematycznych uwzględniających te odchyłki. W ten sposób opracowano współczynnik wykrywalności  $K_n$  będący funkcją kątów  $\alpha$  oraz  $\beta$  (parametrów metody odniesieniowej) oraz liczby  $n$  określającej  $n$ -tą harmoniczną rozpatrywanego zarysu.

Podsumowując na podstawie obliczonych wartości współczynników wykrywalności w zakresie  $K_{16}$ - $K_{50}$ , zastosowanych w procedurach komputerowych można przeprowadzić komputerową transformację zarysu zmierzonego czujnikiem

pomiarowym  $F(\varphi)$  na zarys przetworzony  $R_p(\varphi)$ , który powinien odpowiadać rzeczywistemu zarysowi falistości. Wówczas odchyłkę okrągłości oraz falistości  $\Delta Z$  można wyznaczyć za pomocą poniższej zależności [1]:

$$\Delta Z = \frac{\Delta F}{K_n} \quad (1)$$

gdzie:  $\Delta F$  – odchyłka zmierzona czujnikiem pomiarowym,  $K_n$  – współczynnik wykrywalności dla  $n$ -tej harmonicznej zarysu.

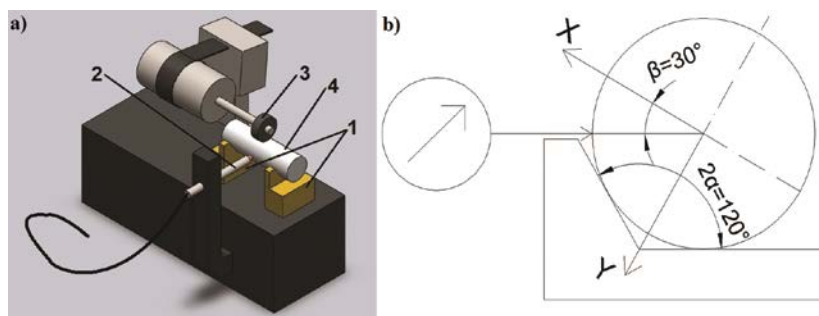
Na podstawie modelu matematycznego opracowanego w pracy [2, 3] oraz przeprowadzając rozwinięcie sygnału w zespolony szereg Fouriera, współczynnik wykrywalności  $K_n$  można określić następująco [2]:

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

gdzie:  $\alpha, \beta$  – parametry metody odniesieniowej.

Jak widzimy w zależności (2), wartość współczynnika wykrywalności  $K_n$  zależy od kątowych parametrów metody odniesieniowej tj. wartości kątów  $\alpha$  oraz  $\beta$ . Powyżej przedstawiony współczynnik wykrywalności zastosowany w procedurach komputerowych pozwala zwiększyć dokładność odniesieniowych pomiarów zarysów falistości. Szersze informacje związane z opracowanym modelem matematycznym znajdują się w [2], natomiast opis procedur komputerowej transformacji zmierzonego zarysu falistości  $F(\varphi)$  na zarys przetworzony  $R_p(\varphi)$  znajduje się w [4].

W celu weryfikacji koncepcji zastosowania metody odniesieniowej do pomiaru odchyłki falistości powierzchni cylindrycznych w zakresie 16–50 fal/obrót opracowano stanowisko badawcze ROL-2, którego schemat został przedstawiony na rysunku 2a.



Rys. 2. Modelowe stanowisko badawcze ROL-2 do odniesieniowych pomiarów odchyłki falistości:  
a) schemat: 1 – pryzmy nożowe, 2 – indukcyjny czujnik pomiarowy, 3 – zespół napędowy, 4 - przedmiot mierzony  
b) parametry metody odniesieniowej zastosowane w ROL-2

W przyrządzie pomiarowym ROL-2, przedmiot mierzony (2) usytuowany na dwóch pryzmach nożowych (1), wprowadzony jest w ruch obrotowy za pomocą zespołu napędowego (3). Końcówka czujnika indukcyjnego (1) przemieszczając się po powierzchni mierzonego elementu walcowego zbiera punkty pomiarowe. Sygnał z czujnika indukcyjnego przy użyciu przetwornika analogowo-cyfrowego przesyłany jest za pośrednictwem złącza RS-232 do komputera. Następnie profil zmierzony czujnikiem pomiarowym  $F(\varphi)$  zostaje poddany transformacji za pomocą opracowanego oprogramowania komputerowego na profil przetworzony  $R_p(\varphi)$ . Po dokonaniu jego odpowiedniej filtracji w celu odseparowania składowych okrągłości oraz chropowatości powierzchni, w oparciu o okrąg odniesienia zostaje wyznaczona odchyłka falistości  $RONt$  w zakresie 16–50 fal/obrót.

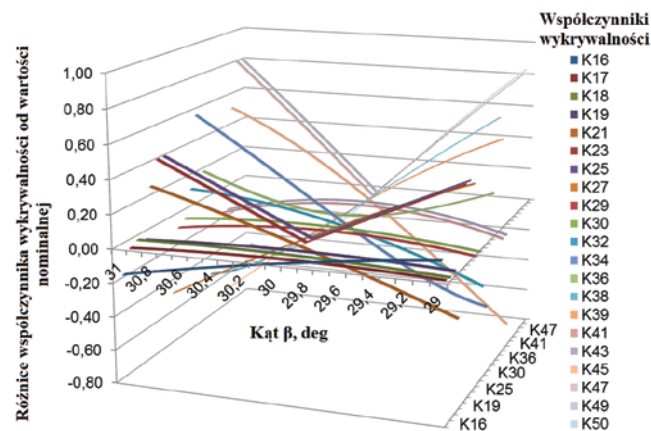
Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych, których wyniki zostały przedstawione w [5], stwierdzono, że najodpowiedniejszym typem metody odniesieniowej służącej do oceny falistości powierzchni cylindrycznych w zakresie 16–50 fal/obrót jest metoda trójpunktowa, niesymetryczna odwrócona. W związku z tym modelowe stanowisko badawcze ROL-2 zostało zbudowane w oparciu o proponowany typ metody odniesieniowej, o następujących kątowych parametry metody odniesieniowej:  $\alpha=60^\circ$ ,  $\beta=30^\circ$  (patrz rys. 2b).

### 3. WPLYW ZMIANY PARAMETRÓW METODY ODNIESIENIOWEJ NA WARTOŚĆ WSPÓŁCZYNNIKA WYKRYWALNOŚCI

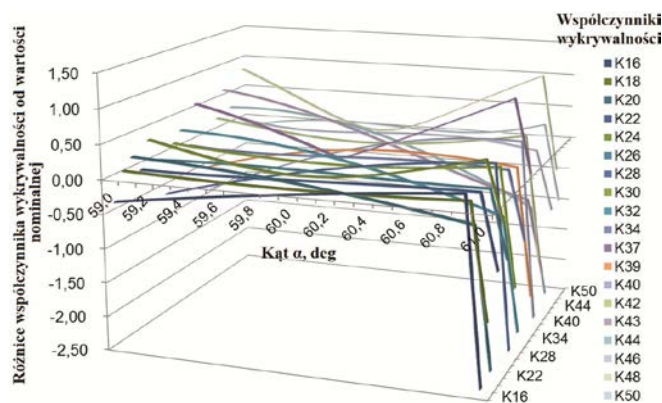
Jak widzimy na rysunku 2b, w celu uzyskania kąta  $\alpha=60^\circ$ , w modelowym stanowisku badawczym zastosowano pryzmę pomiarową o kącie rozwarcia wynoszącym  $120^\circ$ . Natomiast czujnik pomiarowy został usytuowany w stosunku do obranej wcześniej osi  $X$  pod kątem  $\beta=30^\circ$ . Są to nominalne wartości kątowym parametrów metody odniesieniowej. W praktyce rzeczywiste wartości kąta  $\alpha$  oraz  $\beta$  mogą się różnić od ich nominalnych wartości wynoszących:  $\alpha=60^\circ$ ,  $\beta=30^\circ$ , co wpływa na wartość współczynnika wykrywalności  $K_n$  [4], a w ostateczności na dokładność pomiarową metody odniesieniowej. Dlatego przeprowadzono badania mające na celu ustalenie jak zmiana wartości kąta  $\alpha$  oraz  $\beta$  wpłynie na zmianę wartości współczynnika wykrywalności  $K_n$  w zakresie  $n \in \langle 16, 50 \rangle$ . Przeanalizowano odchylenie wartości kątów  $\alpha$  oraz  $\beta$  o  $\pm 1^\circ$  w stosunku do ich wartości nominalnych tj.  $\alpha=60^\circ$  oraz  $\beta=30^\circ$ . Do wyznaczenia współczynnika wykrywalności posłużono się zależnością (2).

Na początku przeanalizowano wpływ zmiany kąta  $\beta$  w zakresie  $n \in \langle 29^\circ, 31^\circ \rangle$  na wartości współczynników wykrywalności  $K_n$  przy zachowaniu stałej wartości kąta  $\alpha=60^\circ$ .

Na rysunku 3 przedstawiono wykres zmian wartości wybranych współczynników wykrywalności  $K_n$  przy zmianie kąta  $\beta$  oraz przy zachowaniu stałej wartości kąta  $\alpha$ , w stosunku do nominalnych wartości  $K_n$  uzyskanych dla kątów  $\alpha=60^\circ$  i  $\beta=30^\circ$ .



Rys. 3. Różnice wartości współczynnika wykrywalności  $K_n$  dla  $\alpha=60^\circ$ ,  $\beta \in \langle 31^\circ, 29^\circ \rangle$  w stosunku do wartości kątów nominalnych tj.  $\alpha=60^\circ$ ,  $\beta=30^\circ$ .



Rys. 4. Różnice wartości współczynnika wykrywalności  $K_n$  dla  $\beta=30^\circ$ ,  $\alpha \in \langle 59^\circ, 61^\circ \rangle$  w stosunku do wartości kątów nominalnych tj.  $\alpha=60^\circ$ ,  $\beta=30^\circ$ .

Na podstawie analizy rysunku 3 można stwierdzić, że najbardziej czuлыми na zmianę kąta  $\beta$  są współczynniki wykrywalności  $K_n$  uzyskane dla wysokich wartości składowych harmonicznych tj.  $K_{34}$ ,  $K_{38}$ ,  $K_{39}$ ,  $K_{49}$  oraz  $K_{50}$ . Natomiast zmiana kąta  $\beta$  najmniej wpływa na współczynniki wykrywalności  $K_n$  dla niższych składowych harmonicznych, czyli  $K_{17}$ ,  $K_{18}$ ,  $K_{19}$ ,  $K_{29}$  oraz  $K_{30}$ . Jak widzimy na rysunku 3, współczynniki te praktycznie nie są czułe na zmianę kąta  $\beta$  o  $\pm 1^\circ$  od nominalu.

Analizując wyniki obliczeń można stwierdzić, że zmiana kąta  $\beta$  od wartości nominalnej może wpłynąć na jakość odwzorowania zarysu zmierzonego na zarys przetworzony, szczególnie w przypadku pomiaru falistości w zakresie powyżej 40

fal/obrót, ponieważ jak widzimy na rysunku 3. wraz ze zmianą kąta  $\beta$  współczynnik wykrywalności dla 50 składowej harmonicznej ulegał największym zmianą.

Kolejnym etapem badań była analiza wpływu zmiany kąta  $\alpha$  (rozwarcie pryzmy pomiarowej) na wartość współczynników wykrywalności  $K_{16}$ – $K_{50}$ . W tym celu podobnie jak we wcześniejszej symulacji, przeanalizowano zmianę kąta  $\alpha$  w zakresie  $\langle 59^\circ, 61^\circ \rangle$ , przy zachowaniu stałej wartości kąta  $\beta=30^\circ$ . Wyniki symulacji dla wybranych współczynników wykrywalności przedstawiono na rysunku 4.

Z wykresu przedstawionego na rysunku 4. wynika że wartości wszystkich współczynników wykrywalności  $K_n$  gwałtownie spadają po przekroczeniu kąta  $\alpha=60,9^\circ$ . Natomiast podobnie jak dla przeprowadzonej symulacji kąta  $\beta$ , zmiana wartości kąta  $\alpha$  najbardziej wpływa na współczynniki wykrywalności  $K_n$  uzyskane dla wysokich wartości składowych harmonicznych tj.  $K_{37}$ ,  $K_{43}$ ,  $K_{44}$ ,  $K_{48}$  oraz  $K_{50}$ . W tym przypadku najmniejszą czułością na zmiany kąta  $\alpha$  wykazywały współczynniki wykrywalności  $K_n$  dla niskich składowych harmonicznych czyli  $K_{18}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{26}$ ,  $K_{34}$ ,  $K_{38}$ .

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Badania, których wyniki zostały przedstawione w niniejszym artykule miały na celu ustalenie jak zmiana wartości parametrów metody odniesieniowej zastosowanej w modelowym stanowisku badawczym ROL-2 wpływa na zamianę współczynników wykrywalności w zakresie  $K_{16}$ – $K_{50}$ . Dzięki przeprowadzonym analizom możemy stwierdzić czy istnieje konieczność zidentyfikowania rzeczywistych wartości kąta  $\alpha$  oraz  $\beta$  w przyrządzie pomiarowym ROL-2 służącym do odniesieniowych pomiarów odchyłki falistości w zakresie 16–50 fal/obrót.

Podsumowując wyniki badań symulacyjnych przedstawionych w tym artykule, możemy stwierdzić, że zmiana zarówno kąta  $\alpha$ , jak i kąta  $\beta$  w stosunku do ich wartości nominalnych wpływa na wartości współczynników wykrywalności  $K_n$ . Wpływ ten jest większy dla współczynników wykrywalności powyżej  $K_{40}$ , co świadczy o tym, że metoda odniesieniowa bardziej jest czuła na zmianę wartości parametrów kątowych w wyższych zakresach pomiarowych.

Podczas gdy, przeprowadzając pomiar odchyłki okrągłości metodą odniesieniową w niższych zakresach pomiarowych np. 2–15 fal/obrót, różnica pomiędzy przyjętymi nominalnymi wartościami kątów  $\alpha$  oraz  $\beta$ , a ich rzeczywistymi wartościami, nie ma większego znaczenia, to rozpatrując pomiar odchyłki falistości w zakresie 16–50 fal/obrót, różnica ta może w znaczny sposób wpłynąć na dokładność pomiarową rozpatrywanej metody.

Dlatego podczas konstruowania przyrządu pomiarowego służącego do odniesieniowych pomiarów odchyłki falistości powierzchni cylindrycznych należy dążyć do uzyskania rzeczywistych wartości kąta  $\alpha$  oraz  $\beta$  najbardziej zbliżonych do wartości nominalnych. Dobrym rozwiązaniem wydaje się również, bezpośrednia identyfikacja rzeczywistych wartości parametrów metody odniesieniowej poprzez ich

bezpośredni pomiar, a następnie uwzględnienie ich w procedurze transformacyjnej. Pomimo tego, że pomiar kąta  $\beta$  może wydawać się problematyczny, to kąt  $\alpha$  można w prosty oraz dokładny sposób zmierzyć za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej.

Zasadne wydaje się również przeprowadzenie badań eksperymentalnych mających na celu wyznaczenie dokładności pomiarowej przyrządu pomiarowego służącego do odniesieniowych pomiarów zarysów falistości powierzchni cylindrycznych, przy zastosowaniu procedur transformacyjnych uwzględniających nominalne wartości kątowe zastosowane w przyrządzie pomiarowym, a następnie dla procedur uwzględniających rzeczywiste wartości tych kątów. Następnie należy stwierdzić w jakim stopniu identyfikacja rzeczywistych wartości parametrów kątowych wpływa na dokładność pomiaru odchyłki falistości metodą odniesieniową. Będzie to tematyką dalszych badań autorów.

Należy dodać, że badania symulacyjne były prowadzone dla dużej rozbieżności analizowanych kątów, ponieważ o  $\pm 1^\circ$ . Wysoki poziom rozwoju współczesnych technik wytwarzania, szczególnie w obszarze produkcji przyrządów pomiarowych, pozwala na uzyskanie znacznie dokładniejszych wartości parametrów kątowych, niż te brane pod uwagę podczas symulacji.

Opracowanie koncepcji zastosowania metody odniesieniowej do pomiaru odchyłki falistości powierzchni cylindrycznych elementów walcowych cechujących się dużymi wymiarami, pozwoliły by na jej ocenę oraz ewentualne przeciwdziałanie jej nadmiernym wartością bezpośrednio w cyklu produkcyjnym.

#### LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., *Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość*. Warszawa, WNT, 2008.
- [2] ADAMCZAK S., JANECKI D., STĘPIEŃ K., *Qualitative and quantitative evaluation of the accuracy of the V-block method of cylindricity measurements*. W: Precision Engineering, vol. 34, 2010, 619-626.
- [3] ADAMCZAK S., JANECKI D., STĘPIEŃ K., *Statystyczne badania dokładności pomiaru zarysów walcowości metodą odniesieniową*, W: PAK, nr 6, 2005, 006-008.
- [4] ADAMCZAK S., ZMARZŁY P., CHMIELIK I. P.: *Investigating mathematical models of waviness measurements of cylindrical elements by the V-block method through computer simulations*, W: 11th International Symposium on Measurement and Quality Control 2013, Kraków-Kielce, września 2013.
- [5] ADAMCZAK S., ZMARZŁY P., STĘPIEŃ K. *Model matematyczny odniesieniowych pomiarów kształtu i falistości elementów okrągłych*. W: Mechanik, nr 7, 2013, 518-522.
- [6] BORYCZKO A., *Effect of waviness and roughness components on transverse profiles of turned surfaces*. W: Measurement, vol. 46, 2013, 667-696.
- [7] CELLARY A., JEREMAK CZ. J., MAJCHROWSKI R., *Metody symulacyjne wyznaczenia błędów systemu do pomiaru odchyłki okrągłości metodą odniesieniową*. W: PAK, nr 56, 2010, 008-009.
- [8] JEONG G.-B., KIM D.-H., JANG D.-Y., *Real time monitoring and diagnosis system development in turning through measuring a roundness error based on three-point method*. W: International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 45, 2005, 1494-1503.



# **POMIARY TEMPERATURY PODCZAS GŁADZENIA DŁUGICH OTWORÓW**

Adam BARYLSKI <sup>1</sup>

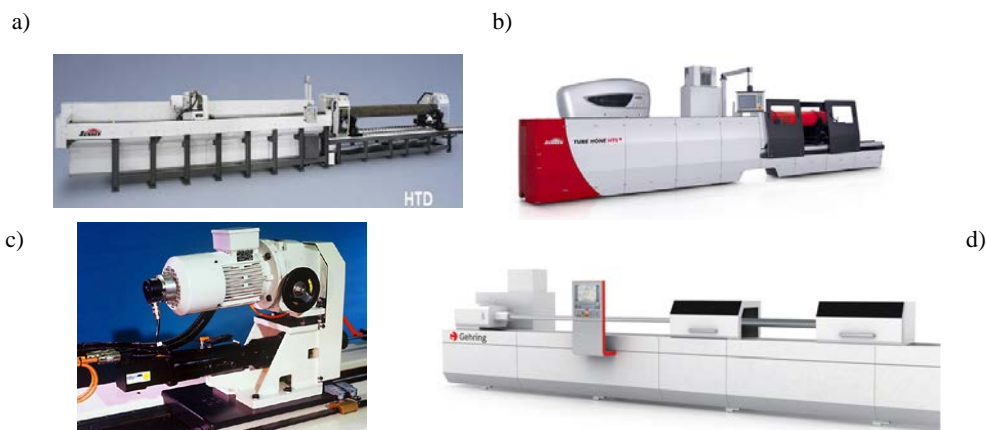
## **1. WSTĘP**

Współcześnie, jedną z podstawowych metod ścierniej obróbki bardzo dokładnej jest gładzenie. Metoda ta wykorzystywana jest głównie do obróbki otworów walcowych o zróżnicowanych długościach, w tym o małych średnicach [1]; umożliwia też kształtowanie wykończeniowe powierzchni płaskich [11], krzywoliniowych [7] i uzębień [24]. Prowadzone są w tym zakresie w wielu ośrodkach naukowych badania doświadczalne, jak również nieliczne próby bezpośrednio w warunkach produkcyjnych [2]. Wynikiem gładzenia jest powierzchnia o małej chropowatości i dużej nośności, zaś stawiane przez konstruktorów maszyn wymagania dotyczą również dokładności kształtu i wymiaru. Realizowane badania dotyczą zarówno obróbki elementów metalowych [26], jak i ceramicznych [4,32] i obejmują m.in. optymalizację procesu gładzenia [29, 30], analizę mechanizmów występujących w strefie obróbki [20-22, 27, 33], intensywności oddziaływania ziaren ściernych z materiałem obrabianym [28], symulację i modelowanie mikrostruktury geometrycznej powierzchni po gładzeniu [3, 5, 12, 18, 19] – w tym głównie chropowatości i nośności powierzchni [6], modelowanie kinematyki gładzenia [35], modelowanie procesu przy użyciu sztucznych sieci neuronowych [25], badania wydajności i dokładności obróbki [10, 34] oraz dobór technologii gładzenia [31], również z wykorzystaniem ultradźwięków [9, 36].

Stosowane względnie małe prędkości gładzenia (ruchu obrotowego i posuwowego głowicy) i nominalne naciski powierzchniowe oselek oraz dostatecznie obfite i ciągle dawkowanie cieczy obróbkowej sprzyjają warunkom uniknięcia niepożądanym naprężeniom rozciągającym w warstwie wierzchniej przedmiotu.

<sup>1</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: [abarylsk@pg.gda.pl](mailto:abarylsk@pg.gda.pl)

Gładzenie otworów długich jest obecnie możliwe na obrabiarkach poziomych, produkowanych seryjnie przez czołowe firmy, np. Sunnen [15] i Gehring) [13]. Tradycyjnie, bogatą ofertę honownic z pojedynczym wrzecionem lub multi układem wrzecion pionowych do otworów krótszych proponuje też firma Kadia [14]. Przykłady obrabiarek do gładzenia otworów w układzie poziomym pokazano na rys.1.

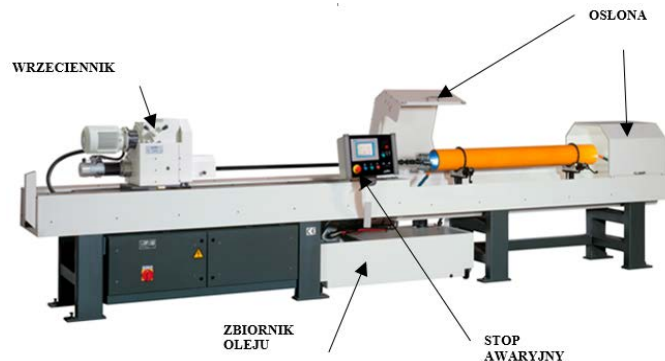


Rys. 1. Przykłady honownic poziomych: a) typu HTD (średnica głowicy powyżej 400 mm, wydajność 2000-3000cm<sup>3</sup>/h, obrabiarka wyposażona w układ filtrowania i chłodzenia oleju), b) typu HTS (budowa modułowa, wydajność gładzenia 700-1500 cm<sup>3</sup>/h), c) typu HTC-2120 (sterowanie CNC, gładzenie otworów o małej średnicy) firmy Sunnen [15], d) typu Deephone (napęd o mocy 9 kW, mocowanie przedmiotów o średnicy do 360 mm – na indywidualne zamówienie do 1200 mm, filtr magnetyczny i układ chłodzenia oleju) firmy Gehring [13]

W procesie gładzenia mechanicznego, w wyniku ruchowej współpracy oselek głowicy z materiałem obrabianym w obecności płynu następuje wzrost temperatury kształtowanego przedmiotu [8]. Jak wykazały własne badania wstępne [2], faktu tego nie należy pomijać chcąc uzyskać wysoką dokładność wymiarowo-kształtową, a także planując miejsce kontroli jakości w procesie technologicznym. Zmiana średnicy otworu jest wynikiem nie tylko procesu skrawania, ale i chwilowej temperatury przedmiotu. Problem ten ilustrują prezentowane poniżej wyniki pomiarów.

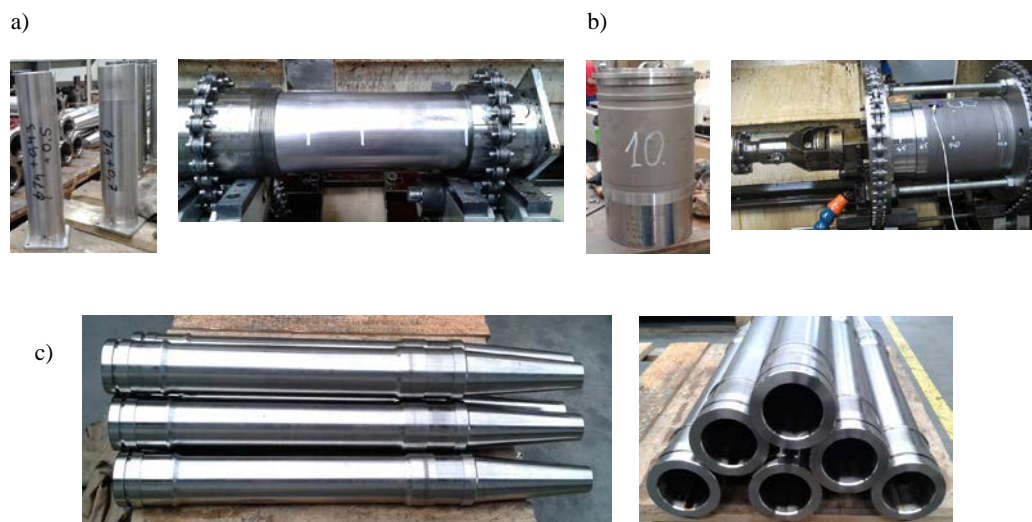
## 2. WARUNKI I WYNIKI BADAŃ

Pomiary temperatury gładzonych przedmiotów przeprowadzono podczas obróbki otworów na honownicy poziomej HTH 4000S (rys.2).



Rys. 2. Honownica pozioma HTH 4000S ze sterowaniem CNC firmy Sunnen [16]

Wykorzystano w tym celu kamerę termowizyjną VIGOcam v50, usytuowaną w odległości 2,5 m od honownicy. Gładzono otwory (rys.3) o średnicy 75H7 i 75H10 (tuleje ze stali 34CrNiMo6, 34-38 HRC) i 150H7 mm w tulejach ze stali 38HMJ (po szlifowaniu,  $R_a=0,11-0,32 \mu\text{m}$ ).



Rys. 3. Elementy obrabiane: a) o średnicy otworu 75H7 mm, b) o średnicy otworu 150H7 i długości 201 mm, c) o średnicy otwory 75H10 i długości 937 mm ( $R_a=1,25\mu\text{m}$ )

Oprócz temperatury początkowej i maksymalnej przedmiotu mierzono ubytek liniowy na średnicy gładzonego otworu oraz wyrywkowo chropowatość powierzchni [17]. Przykładowe wyniki pomiarów podano w tab.1.

Na rys.4. przedstawiono wybrany zrzut ekranu monitora otrzymany w przypadku badań gładzonego otworu o średnicy 75H7 mm, zaś na rys.5 ilustrację zmian temperatury.

Tab.1. Wyniki gładzenia otworów o średnicy 75H7 mm

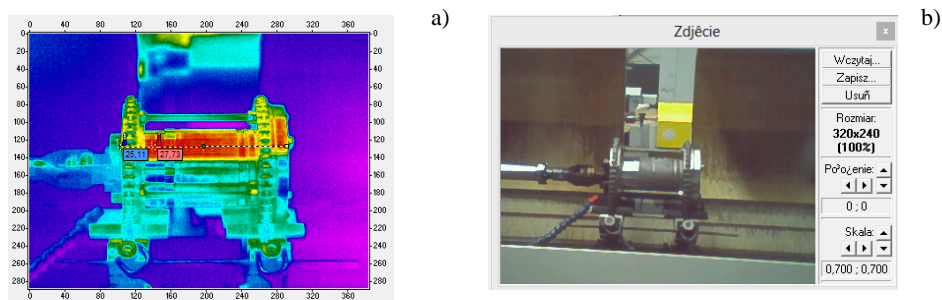
Przedmiot	Cykl	Czas [min]	Prędkość skoku [m/min]	Obciążenie wrzeczona [%]	Temperatura [°C]			Średnica	Ubytek	Osełki
					T <sub>o</sub>	T <sub>max</sub>	T <sub>otocz</sub>			
Tuleja I	I	6	19	15	23,73	30,11	25,3	74,85	-	H70J87
	II	4	19	12	24,62	33,12	25,3	74,92	0,07	H70J88
	III	2,5	19	17	24,7	33,84	25,3	75	0,15	H70J89
	IV	1	19	14	25,5	31,9	25,2	75	0,15	H70J90
	V	2	19	10	25,6	33,83	25,2	75,015	0,165	H70J91
	VI	2,5	19	10	26,5	34,68	25,1	75,015	0,165	H70J92
	VII	3	19	10	26,58	35,44	25,2	75,015	0,165	H70J93
	VIII	3	19	10	27,2	35,6	25,2	75,025	0,175	H70J94
	IX	3	19	10	27,6	26,67	25,2	75,03	0,18	H70J95
	X	3	19	10	28,76	38,38	25,2	75,04	0,19	H70J96
Tuleja II	I	5	19	5-25	23,32	27,57	25,4	74,7	-	H70NM57XM84
	II	2	19	5-25	23,4	27,86	25,8	74,84	0,14	H70NM57XM85
	III	6	19	16	23,82	28,89	26	74,91	0,21	H70J87
	IV	6	19	18	24,12	29,75	26,2	74,94	0,24	H70J88
	V	1	19	14	24,5	32,87	26,4	74,95	0,25	H70NM57XM84
	VI	1,5	19	15	24,53	33,27	26,5	74,97	0,27	H70NM57XM85
	VII	1,5	19	15	25,07	34,3	26,5	75	0,3	H50J67
	VIII	2	19	14	24,23	32,3	26,6	75,01	0,31	H50J68
	IX	2	19	14	25,34	34,38	26,8	75,01	0,31	H50J69
	X	2	19	11	26,28	35,41	26,8	75,02	0,32	H50J70
Tuleja III	I	6	19	16	23,9	27,86	27,2	74,63	-	H70NM57XM84
	II	6	19	16	24,23	28,86	27,4	74,67	0,04	H50J70
	III	6	19	16	24,62	29,06	27,7	74,8	0,17	H70NM57XM84
	IV	4	19	16	24,9	29,75	27,9	74,82	0,19	H70J87
	V	3,5	19	16	25,12	32,87	28,3	74,9	0,27	H70NM57XM84
	VI	4	19	17	24,83	33,27	28,4	74,92	0,29	H70J87
	VII	3	19	17	25,06	34,3	28,4	75,01	0,38	H70NM57XM84
	VIII	2	19	12	25,72	34,31	28,4	75,03	0,4	H70J87

Przykładowe obrazy temperatury gładzonego otworu o średnicy 150 H7 podano na rys.6 i 7. W wykonanych badaniach otrzymano zakresy temperatury początkowej mieszczącej się w przedziałach: 24,06-26,39°C (początek obróbki tulei z otworem o średnicy 75H10), 23,32-23,9°C (początek obróbki tulei z otworem o średnicy 75H7), i 25,9-26,43°C (początek obróbki tulei z otworem o średnicy 150H7 mm). Temperatury najwyższe w momencie końcowym obróbki wynosiły odpowiednio: 45,11-55,09°C (otwór o średnicy 75H10); 34,31-38,38°C (otwór o średnicy 75H7) i 29,87-32,56°C (otwór o średnicy 150H7). Na zmiany temperatury przedmiotu miały wpływ nie tylko warunki kinematyczne obróbki i nacisk osełek, ale i zastosowany czas gładzenia, który wynosił odpowiednio: 18-21 min (dla otworu 75H10, osełki elektrokorundowe A45M i z węgla krzemu H70J87 – oznaczenia wg firmy Sunnen

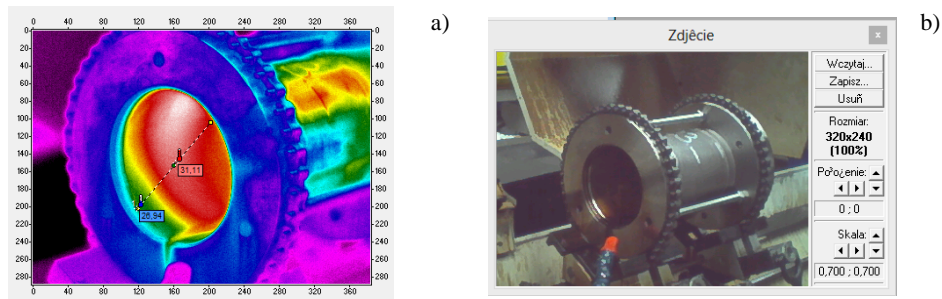


i 9-10 min (dla otworu 150H7). W każdym przypadku gładzenia otworu o średnicy 150 mm zastosowano oselki H70NM57XM84 (etap wstępny) i H70J87 (etap końcowy procesu).

Natężenie przepływu oleju w układzie zawierało się w przedziale 20-30 dm<sup>3</sup>/min, prędkość obwodowa głowicy 25 m/min i wybieg oselek 10 mm (liczba oselek w głowicy 2, liczba pilników w oselce 2). Prędkość wzdłużna głowicy wynosiła od 14 do 18 m/min. Docisk oselek w honownicy poziomej firmy Sunnen jest nastawiany w % mocy możliwej do wykorzystania w procesie (stosowano 12-30%). Wartość docisku jest tajemnicą handlową firmy [23], co stanowi istotną trudność badawczą.



Rys. 6. Obrazy gładzonego przedmiotu (o średnicy otworu 150H7 mm): a) termogram, b) widok układu obróbkowego



Rys. 7. Obrazy wnętrza gładzonego otworu (o średnicy 150H7 mm): a) termogram, b) widok zamocowanego przedmiotu

### 3. PODSUMOWANIE

Analizując otrzymane wyniki badań potwierdzono, że do czynników, które determinują wzrost temperatury podczas gładzenia należą: gabaryty i grubość ścianek tulei, rodzaj materiału przedmiotu, liczba (długość) cykli obróbkowych, rodzaj oselek ściernych, odstępy czasowe pomiędzy poszczególnymi etapami obróbki, temperatura



otoczenia, prędkość wzdłużna i nacisk oselek oraz przerwy związane z pracą operatora i niezbędnym przezbrajaniem obrabiarki.

W przypadku analiz termowizyjnych istotnym problemem są refleksy świetlne, które wpływają niekorzystnie na wyniki pomiarów, co szczególnie uwidacznia się podczas prób w warunkach produkcyjnych.

Celem przeprowadzonych pomiarów było rozpoznanie wpływu podstawowych warunków gładzenia otworów na zmiany temperatury przedmiotów cienkościennych, która w wyniku rozszerzalności cieplnej stali wpływa na analizowany wymiar średnicy. Poszukiwanie kompromisu, istotnego z punktu widzenia technologicznego i ekonomicznego, pomiędzy wydajnością a nagrzewaniem się elementów gładzonych będzie kolejnym etapem badań.

#### LITERATURA

- [1] BAI Y.J., ZHANG L.H., REN C.G., *Experimental investigation on honing of small holes*. W: Key Engineering Materials, vol. 329, 2007, 303-308.
- [2] BARYLSKI A., SENDER P., *Badania przyrostów średnic i temperatury przedmiotów podczas gładzenia długich otworów w warunkach produkcyjnych*. W: Materiały XXXVII Nauk. Szkoły Obróbki Ściernej, P.Kosz., Wyd. Mech., Kołobrzeg, 2014 (w druku).
- [3] BEYERER J., *Model-based analysis of groove textures with applications to automated inspection of machined surfaces*. W: Measurement, vol. 15, 1995, 189-199.
- [4] BO Z., CHUANSHAO L., GUOFU G., FENG J., *Surface characteristics in the ultrasonic ductile honing of ZrO<sub>2</sub> ceramics using coarse grits*. W: Journal of Materials Processing Technology, vol.123, 2002, 54-60.
- [5] BUJ-CORRAL I., VIVANCOS-CALVET J., COBA-SALCEDO M., *Modelling of surface finish and material removal rate in rough honing*. W: Precision Engineering, vol.38, 2014, 100-108.
- [6] BUJ-CORRAL I., VIVANCOS-CALVET J., *Roughness variability in the honing process of steel cylinders with CBN metal bonded tools*. W: Precision Engineering, vol.35, 2011, 289-293.
- [7] DYNAROWSKI R., NOWICKI B., *Investigation on non-conventional honing of sculptured surfaces for parts made of alloy steel*. W: Journal of Materials Processing Technology, vol.109, 2001, 270-276.
- [8] GONZÁLEZ-ROJAS H.A., VIVANCOS-CALVET J., COBA-SALCEDO M., *Thermal analysis of honing process*. W: Materials Science Forum, vol.526, 2006, 235-240.
- [9] GOUSKOV A.M., VORONOV S.A., BUTCHER E.A., SINHA S.C., *Non-conservative oscillations of a tool for deep hole honing*. W: Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, vol.11, 2006, 685-708.
- [10] GUO J., YU C., CAI G., *The influence of the grinding face to the material removal rate the heavy load honing*. W: Applied Mechanics and Materials, vol.63-64, 2011, 719-722.
- [11] GUO Y.B., ZHANG Y., ZHONG J.A., SYOJI K., *Optimization of honing wheel structure parameters in ultra-precision plane honing*. W: Journal of Materials Processing Technology, vol.129, 2002, 96-100.
- [12] HOFFMEISTER H., W., GROSSE T., GERDES A., *Investigation of the influence of different process setting parameters on the surface formation at honing of thermally sprayed layers*. W: Procedia CIRP, vol.1, 2012, 371-376.
- [13] <http://www.gehring.de> (dostęp 14.04.2014).
- [14] <http://www.kadia.de> (dostęp 14.04.2014).

- [15] <http://www.sunnen.pl> (dostęp 14.04.2014).
- [16] Instrukcja honownicy poziomej HTH 4000S, Sunnen Polska, Warszawa, 2009.
- [17] JANICKA A., *Analiza technologii gladzenia dlugich otworow na obrabiarce CNC*. Pr. dypl., Wyd. Mech., PG, prowadz. pr. A. Barylski, Gdańsk, 2013.
- [18] JOLIET R., KANSTEINER M., *A high resolution surface model for the simulation of honing processes*. W: *Advanced Materials Research*, vol.769, 2013, 69-76.
- [19] LAWRENCE D.K., RAMAMOORTHY B., *An accurate and robust method for the honing angle evaluation of cylinder liner surface using machine vision*. W: *Int.J.Adv.Manuf.Technol.*, vol.55, 2011, 611+621.
- [20] LIN Z., LIN P., *Preliminary study on mechanism of superalloy deep-hole honing*. W: *Applied Mechanics and Materials*, vol.271-272, 2013, 353-356.
- [21] LIN Z., PAN L., YAN C., *The adherence mechanism of superalloy honing oilstone*. W: *Key Engineering Materials*, vol.589-590, 2014, 464-469.
- [22] LIU Y., NIE J., GONG J., *The optimization design for protection plate structure of honing measuring head*. W: *Advanced Materials Research*, vol.628, 2013, 107-110.
- [23] Materiały firmy Sunnen Polska, Warszawa, 2014.
- [24] MISRA J.P., JAIN N.K., JAIN P.K., *Investigations on precision finishing of helical gears by electrochemical honing process*. W: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol.224, 2010, 1817-1830.
- [25] PU W., RUI Y., ZHAO L., ZHANG C., *Intelligence selection system for honing parameter based on genetics and artificial neural networks*. W: *Advanced Materials Research*, vol.102-104, 2010, 846-850.
- [26] RAJU H.P., NARAYANASAMY K., SRINIVASA Y.G., KRISHNAMURTHY R., *Characteristics of extrude honed SG iron internal primitives*. W: *Journal of Materials Processing Technology*, vol.166, 2005, 455-464.
- [27] ROSÉN B. D., THOMAS T.R., *Relationship of the plasticity index to machining parameters*. W: *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol.41, 2001, 2061-2069.
- [28] SZABÓ O., BARYLSKI A., *Tribology of honing*. W: *Tribologia*, nr 1(151), 1997, 89-101.
- [29] SZABÓ O., *Goodness indicator and technological optimization of honing*. W: *Key Engineering Materials*, vol.581, 2014, 261-265.
- [30] SZABÓ O., *Optimisation of technology and "quasi honing" of polygon bores*. W: *Journal of Materials Processing Technology*, vol.119, 2001, 117-121.
- [31] XU X., SUN Z., LIU Z., PENG H., *Deep-hole precision honing of difficult-to-cut materials*. W: *Advanced Materials Research*, vol.690-693, 2013, 3218-3221.
- [32] YU A.B., XU Y.S., CHEN S.F., LIN B., LIN B., TIAN X.L., *Analysis of material removal in alumina ceramic honing*. W: *Journal of Materials Processing Technology*, vol.129, 2002, 167-170.
- [33] YU T., GONG Y., WANG W., *Deep hole honing based on squeeze film damping technology*. W: *Advanced Materials Research*, vol.76-78, 2009, 252-257.
- [34] ZHANG Z., DONG P., DONG Z., *The honing process for precision holes*. W: *Applied Mechanics and Materials*, vol.419, 2013, 269-272.
- [35] ZHANG Y., NIU J., YANG Y., GONG J., *Study on the influence factors of honing efficiency*. W: *Advanced Materials Research*, vol.655-657, 2013, 1204-1209.
- [36] ZHU X.S., XU K.W., ZHAO B., MA A.Z., *Experimental and theoretical research on 'local resonance' in an ultrasonic honing system*. W: *Journal of Materials Processing Technology*, vol.129, 2002, 207-211.



# **KIERUNKI ROZWOJU METROLOGII NIERÓWNOŚCI POWIERZCHNI**

Michał WIECZOROWSKI<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

Ze wszystkich dziedzin metrologii wielkości geometrycznych pomiary nierówności powierzchni, w uproszczeniu zwane pomiarami chropowatości powierzchni, uważane są za najtrudniejsze i najbardziej skomplikowane. Chropowatość powierzchni jest miarą braku jej uporządkowania. Nieporządek (entropia) zgodnie z drugim prawem termodynamiki będzie miał tendencję dążenia do maksimum. Aby zmniejszyć chropowatość, należy zatem zredukować entropię; uczynienie tego wymaga włożenia pracy. Tą pracą w budowie maszyn jest obróbka.

Powierzchnie, z którymi mamy do czynienia w technice, są w większości skomplikowane i występują na nich nierówności o bardzo szerokim zakresie wysokości, rozłożone w różny sposób. Wobec ciągle wzrastających wymagań dotyczących maszyn i części obrabianych staje się jasne, że coraz ważniejsze jest nie tylko spełnienie tolerancji wymiarowych, ale także uwzględnienie stanu powierzchni.

Przyrządy do analizy topografii powierzchni pracują w oparciu o dwie zasadnicze grupy metod: skaningowe i powierzchniowe. Metody skaningowe są wykorzystywane znacznie częściej. Do tej grupy należą dwa rodzaje przyrządów: profilowe - zbierające dane na podstawie punktów rozmieszczonych według linii oraz obrazowe - na podstawie obrazów zbieranych z różnych położeń. Ten pierwszy rodzaj wykorzystuje skaning poziomy i sprowadza się do profilometrii obejmującej serię profili najczęściej w płaszczyznach równoległych do siebie, czyli tzw. multiprofilometrii. Skaning odbywa się wtedy w osi  $x$ , a po nim następuje przesunięcie o krok próbkowania w kierunku  $y$ . Oprócz skanowania powierzchni na podstawie linii prostych przyrządy działające w oparciu o metodę profilową mogą zbierać dane z powierzchni wykorzystując skaning obrotowy (profile kołowe), w układzie współrzędnych

---

<sup>1</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, pl. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań

cylicydrycznych. Możliwy jest też skaning wykorzystujący jedną tylko linię spiralną. Współrzędna pionowa  $z$  dla każdego profilu jest wtedy funkcją kąta obrotu. Multiprofilometria może zostać zrealizowana za pomocą przyrządów stykowych lub bezstykowych. Do tej grupy przyrządów należą m.in. profilometry stykowe, profilometry autoogniskowe punktowe, profilometryczne głowice konfokalne i mikroskopy skaningowe z sondą (w tym np. skaningowe mikroskopy tunelowe i mikroskopy sił atomowych).

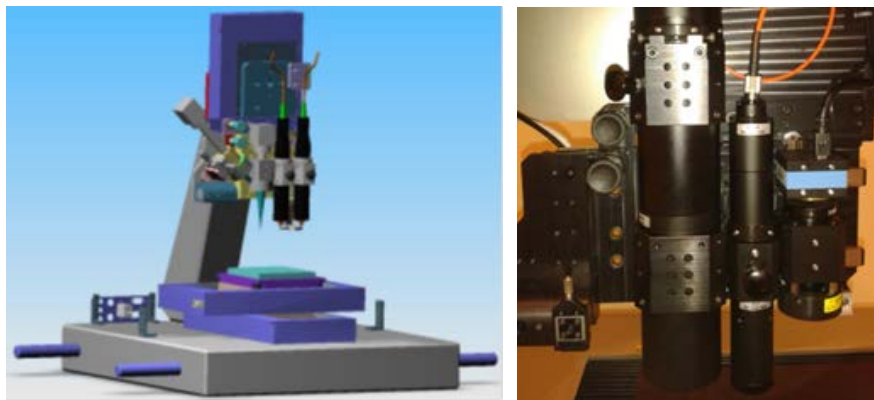
Drugi rodzaj przyrządów z grupy metod skaningowych umożliwia inspekcję powierzchni na podstawie analizy obrazów 2D. Takie systemy można budować na dwa sposoby. Pierwszym z nich jest układ, w którym elementem przemieszczającym się jest kolumna, wykonująca ruch w osi  $z$  i zbierająca sekwencje punktów (obrazy) na kolejnych poziomach wysokościowych. Spotykane są także rozwiązania, w których cała kolumna jest nieruchoma, a przemieszcza się znajdujący w niej układ optyczny, albo za ruchy skanujące w kierunku  $z$  odpowiada stolik, na którym znajduje się przedmiot mierzony, a kolumna funkcjonuje jako statyw z uchwytem dla czujnika pomiarowego. Obrazy złożone z punktów można także zbierać przemieszczając układ zbierający dane w dowolny sposób względem mierzonego przedmiotu i wykonując ujęcia tej samej powierzchni pod różnymi kątami i z różnych pozycji. Przykładami przyrządów z tej grupy metod profilowych są systemy interferometryczne różnych typów, mikroskopy konfokalne, holograficzne i różnicowania ogniskowego, przyrządy wykorzystujące projekcję światła strukturalnego, a także skaningowe i transmisyjne skaningowe mikroskopy elektronowe.

Drugą – obok skaningowych – rodziną metod wykorzystywanych do analizy nierówności powierzchni są metody powierzchniowe, nazywane też całkowymi lub integracyjnymi. Polegają one na pomiarze reprezentatywnego fragmentu powierzchni i stworzeniu modelu numerycznego zależnego od jej właściwości całkowych. Metod tych używa się w połączeniu z wykalibrowanymi wzorcami nierówności powierzchni, wzorcami porównawczymi lub próbkami wzorcowymi, czyli fragmentami powierzchni o znanych parametrach nierówności wykonanymi za pomocą analogicznego procesu. W ten sposób pomiary mają charakter porównawczy i pozwalają wykryć różnicę pomiędzy procesem analizowanym i wzorcowym. Przykładami przyrządów pracujących w oparciu o metodę powierzchniową są przyrządy wykorzystujące rozproszenie światła, pojemnościowe i pneumatyczne. W praktyce przyrządy te są stosowane rzadko, na ogół pod konkretne, bardzo specyficzne aplikacje.

Ponieważ z braku miejsca trudno tutaj opisać wszystkie wymienione wyżej konstrukcje przyrządów (zainteresowanych odsyłam do pozycji [1]), warto przyjrzeć się kilku wybranym rozwiązaniom przyrządów skaningowych, których możliwości są najbardziej obiecujące. Na temat chropowatości powierzchni ukazał się również w *Mechaniku* cykl publikacji (m.in. [2]), zawierających wiele istotnych informacji, można zajrzeć także do publikacji książkowych [3, 4, 5, 6].

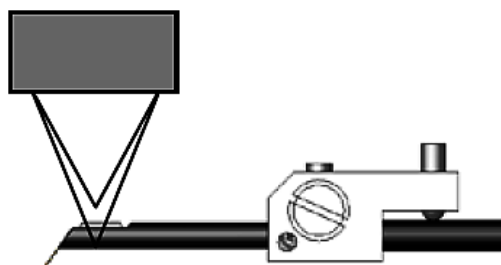
## 2. METODY SKANINGOWE PROFILOWE

Przyrządy skanujące profilowe coraz częściej konstruowane są w tzw. otwartej architekturze, czyli pozwalają na zastosowanie różnych typów głowic pomiarowych dla tego samego układu mechanicznego i systemu zbierania danych. Są wśród nich zarówno głowice stykowe jak i bezstykowe, pozwalające na inspekcję różnych cech powierzchni. Można więc na przykład wyposażyć przyrząd w standardową głowicę z końcówką stykową, głowicę stykową o małym nacisku, głowice konfokalne o różnym zakresie i głowice interferometryczne. Dodatkowo można zamontować kamerę do obserwacji powierzchni, laserowy czujnik do pomiaru konturu, a nawet mikroskop sił atomowych, głowicę do badania zarysowań czy goniometr. Schemat takiego systemu i przykład mocowania pokazane zostały na rysunku 1.



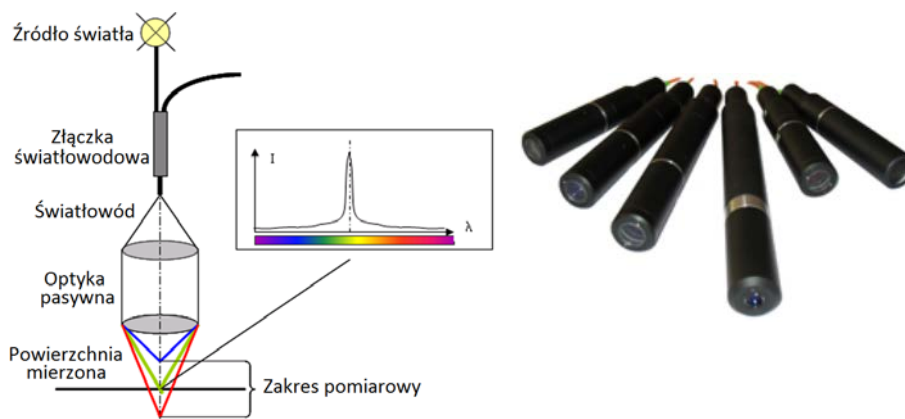
Rys. 1. Schemat systemu pracującego w otwartej architekturze [7] i mocowanie głowic

System ten posiada gniazda (na rysunku są one trzy) do jednoczesnego zamocowania różnych głowic pomiarowych. Ich pozycje wzajemne są znane i ustalone, dzięki czemu można porównywać pomiary dokonane w tym samym miejscu różnymi głowicami. Można zatem na przykład rozpocząć procedurę pomiarową od zastosowania kamery CCD w celu precyzyjnego obejrzenia miejsca pomiaru, następnie przeprowadzić inspekcję topografii powierzchni w wybranym miejscu za pomocą głowicy konfokalnej, a potem zebrać dane z tego samego obszaru za pomocą np. głowicy stykowej o obniżonym nacisku. Uzyskane w ten sposób dwa zbiory danych zawierające topografię powierzchni pokażą różnice pomiędzy skanowaniem głowicą optyczną a stykową. Nacisk ostrza końcówki standardowej zgodnie z zaleceniami normy powinien się mieścić w granicach od 0,6 do 2,0 mN. Dla głowicy o małym nacisku wartość ta wynosi 0,01 mN, co umożliwia pomiar wielu miękkich powierzchni bez niebezpieczeństwa ich uszkodzenia, a sygnał zbierany jest przez przetwornik głowicy konfokalnej. Schemat takiej głowicy zaprezentowano na rysunku 2.



Rys. 2. Głowica stykowa o obniżonym nacisku [8]

W ostatnich latach coraz większą popularność zdobywają głowice konfokalne pracujące w układzie profilometrycznym, albo podłączane do tradycyjnych profilometrów w miejscu głowicy stykowej, albo jako część systemu a priori dedykowanego do pomiarów bezstykowych. Jako elementy oświetlające powierzchnię w takich głowicach wykorzystuje się źródła światła białego. Głowice wykorzystują efekt konfokalny, dzięki czemu fotodetektor w dowolnym momencie obserwuje tylko jeden punkt. Punkt ten oświetlany jest przez małą, dokładnie zogniskowaną plamkę, a cały system jest niewrażliwy na inne promienie świetlne. Klasyczny układ konfokalny posiada bardzo dobrą rozdzielczość poziomą i stosunek wartości sygnału do zakłóceń. Jego wadą jest natomiast bardzo mała głębokość ogniskowania, przez co konieczny jest skanowanie pionowe, stosowane m.in. w mikroskopach konfokalnych. Kombinacja układu konfokalnego z dwoma technologiami uzupełniającymi, a mianowicie chromatycznym kodowaniem kolorów i interferometrią spektralną pozwala rozszerzyć głębokość ogniskowania eliminując konieczność skanowania pionowego. Schemat działania przykładowej głowicy profilometrycznej pracującej w oparciu o chromatyczny efekt konfokalny i wygląd przykładowych głowic przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Schemat działania głowicy konfokalnej światła białego [1] i wygląd głowic [9]

Wiązka światła białego padająca na powierzchnię jest rozszczepiana na widmo kolorowe. Tylko jedna, określona częstotliwość, która jest zależna od nierówności powierzchni ogniskuje się na powierzchni. Dla tej długości fali uzyskiwany jest ostry obraz, docierający następnie do fotodetektora, którym jest precyzyjny spektrofotometr. Pozwala on na odczytanie długości fali lub częstotliwości tej barwy, co z kolei jest informacją o wysokości mierzonej nierówności.

Główki konfokalne chromatyczne produkowane są dla różnych zakresów pomiarowych. Najmniejsze z nich przekraczają nieznacznie 100  $\mu\text{m}$  przy rozdzielczości kilku nanometrów. Najczęściej stosuje się główki o zakresie około 400  $\mu\text{m}$  i rozdzielczości ok. 20 nm, lub o zakresie nieco poniżej 1,5 mm i rozdzielczości ok. 60 nm. Do zastosowań makro produkowane są główki o zakresie prawie 25 mm, ale ich rozdzielczość to już prawie 800 nm. Istotny jest również maksymalny kąt zbocza, który można mierzyć za pomocą konfokalnej główki chromatycznej. Dla główek o małym zakresie jest on bardzo duży i przekracza  $\pm 40^\circ$ . W miarę jak zakres pomiarowy rośnie kąt zbocza maleje do  $\pm 25^\circ$  dla 1,4 mm. Przy aplikacjach makro można mierzyć zbocza o kącie  $\pm 8,5^\circ$ . Poza ruchem stolika profilometru ta metoda pomiarowa nie wymaga żadnych ruchomych elementów, a zakres determinuje spektrometr, długość liniiki fotodiody i parametry przyrządu. Dodatkowymi zaletami opisywanych główek konfokalnych jest to, że dość dobrze spisują się na bardzo różnych powierzchniach – zarówno gładkich, jak i chropowatych, oraz mogą mierzyć nierówności powierzchni przezroczystych. Ich działanie nie jest uwarunkowane materiałem, z którego zbierane są dane (metale, tworzywa sztuczne, szkło, materiały elektroniczne itp.).

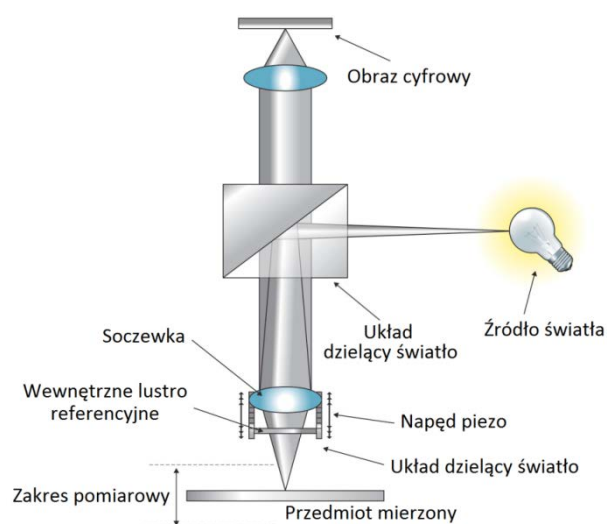
Prezentowane główki mierzą w układzie profilometrycznym, kolejno następujące po sobie profile. Interesującym pomysłem na przyspieszenie pomiarów jest rozwinięcie tej główki do systemu multisensorycznego, w którym jedna wiązka zastąpiona jest szeregiem wiązek równoległych, zwanym sensorem liniowym. Przykładowa konstrukcja takiego sensora składa się ze 180 punktów zbierających dane wzdłuż linii. Zestaw wiązek pada na mierzoną powierzchnię i każda z nich po odbiciu dociera do spektrofotometru, zamieniającego barwę na współrzędną wysokościową nierówności powierzchni. W ten sposób jednorazowo uzyskiwane jest 180 współrzędnych punktów wzdłuż linii sensora. Skanowanie powierzchni odbywa się przez ruch sensora liniowego prostopadle do jego osi przez co jednorazowo zbierane są dane z obszaru o szerokości kilku milimetrów. Sensor skanuje powierzchnię linią o szerokości 1,8 mm, co daje odległość pomiędzy sąsiednimi wiązkami na linii wynoszącą 10  $\mu\text{m}$ . Wiązki na powierzchni tworzą plamki o średnicy 4  $\mu\text{m}$ , przez co uśrednianie danych niewiele różni się od tego, jakie dokonuje się w końcówce profilometru stykowego o promieniu zaokrąglenia wierzchołka wynoszącym 5  $\mu\text{m}$ . Sensor liniowy można dalej rozbudować do powierzchniowego. Wymaga to zastosowania dodatkowego wewnętrznego lustra skanującego, ale takie rozwiązanie umożliwia pomiar nierówności 3D z obszaru pomiarowego bez

jakiegokolwiek przemieszczania.

### 3. METODY SKANINGOWE OBRAZOWE

#### 3.1. SKANINGOWA INTERFEROMETRIA KOHERENTNA

Do pomiaru nierówności powierzchni o małych nierównościach stosowana jest skaningowa interferometria koherentna (CSI). Polega ona na zbieraniu obrazów prążków interferencyjnych i ich lokalizacji w czasie skanowania pionowego wzdłuż długości drogi optycznej, dzięki czemu uzyskuje się obraz przestrzenny. Wykorzystuje źródło światła białego i łączy technikę skanowania pionowego (w osi z) z interferometrią optyczną.



Rys. 4. Schemat skaningowego interferometru koherentnego [10]

Przyrządy na niej oparte są typowo wyposażone w podstawę ustawioną na stole antywibracyjnym, aby zminimalizować efekt wpływu drgań pochodzących z otoczenia. Na tej podstawie mocowana jest kolumna pionowa (albo portal) oraz stół krzyżowy z możliwością przesunięcia w kierunku  $x$  i  $y$ . Przyrządy posiadają możliwość tzw. stitchingu czyli łączenia skanów wykorzystując automatyczny ruch stolika w obu kierunkach, dzięki czemu możliwy jest pomiar większych fragmentów powierzchni (choć wiąże się to często z wyraźną stratą wierności odwzorowania). Kolumna (lub portal) jest podporą dla systemu interferometrycznego i systemu skanowania pionowego. Pozostałym elementem systemu pomiarowego opartego na skaningowej interferometrii koherentnej jest sterownik z komputerem. Różnica dróg optycznych osiągana jest przez ruch obiektu, głowicy skaningowej lub lustra

referencyjnego ze stałą prędkością. Sensor obrazu rejestruje zmiany intensywności zapisując poszczególne ujęcia w miarę jak w zaprogramowany sposób zmienia się różnica dróg optycznych. Jednym z najczęściej przyjętych sposobów jest zatem skanowanie w kierunku pionowym za pomocą głowicy przyrządu z lustrem referencyjnym. Typowa konfiguracja zaprezentowana została na rysunku 4.

Najbardziej popularne techniki pomiarów interferometrycznych stosowane w systemach CSI to interferometria przesunięcia fazowego PSI i interferometria skanowania pionowego VSI. Są to techniki uzupełniające się, a to którą z nich będzie wygodniej zastosować zależy w dużej mierze od badanej powierzchni.

Podstawowe zalety skaningowych interferometrów koherentnych to duży zakres pomiarowy i dokładność. Wady to stosunkowo małe pole pomiarowe i wrażliwość na silne zmiany kontrastu powierzchni oraz pochylenia nierówności.

### 3.2. MIKROSKOPIA KONFOKALNA

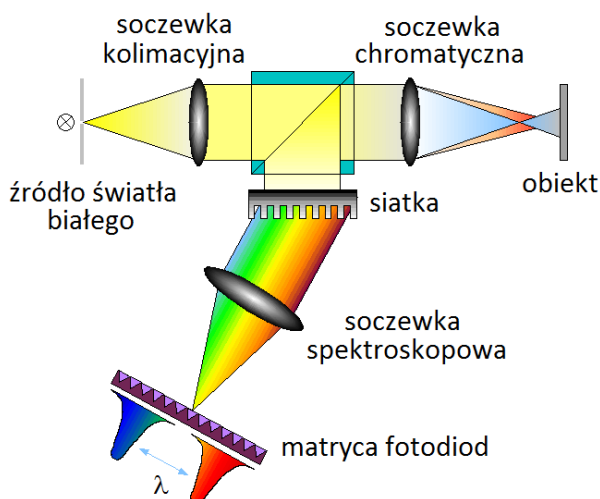
Mikroskopia konfokalna polega na oświetlaniu przez otwór w przesłonie badanej powierzchni i transmitowaniu uzyskanego obrazu przez drugi otwór w przesłonie do detektora. Zasada funkcjonowania mikroskopu konfokalnego polega na ograniczeniu obszarów oświetlanych na mierzonym przedmiocie za pomocą odpowiednio ukształtowanej wiązki świetlnej i obserwacji wiązki odbitej po przejściu przez podobny system kształtujący blokujący światło zarówno niezogniskowane jak i pochodzące spoza obszaru oświetlenia.

Nowoczesne mikroskopy konfokalne wykorzystujące skaning pionowy bardzo chętnie korzystają z zasady konfokalnej mikroskopii chromatycznej [11]. W takich układach światło białe pada na mierzoną powierzchnię. Obiekt wyposazony jest w soczewkę chromatyczną, to znaczy taką, która posiada różne długości ogniskowania dla różnych długości fali składowych światła białego. Na matrycy fotodiod znajduje się jasne miejsce, którego położenie skorelowane jest przez spektrometr z konkretną długością fali. Punkt ogniskowania promieniowania o tej długości fali jest zgodny z punktem na mierzonej powierzchni. Wszystkie inne punkty powierzchni odbijają mniej światła, ponieważ znajdują się poza płaszczyzną ogniskowania. Schemat takiego działania zaprezentowano na rysunku 5.

Można wyróżnić trzy podstawowe kategorie mikroskopów konfokalnych pod względem sposobu uzyskania efektu konfokalnego: skaningowy laserowy mikroskop konfokalny (LSCM), mikroskop konfokalny z programowalną tablicą (PACM) i – najbardziej popularny – skaningowy dyskowy mikroskop konfokalny (DSCM). Zawiera on dysk skanujący z zestawem otworów lub szczelin funkcjonujący zarówno jako układ oświetlający jak i detekcyjny. Każdy z otworów na dysku odwzorowuje swój obraz na powierzchni dzięki optyce tworzącej wiązkę pomiarową. Promienie odbite od powierzchni lub przez nią rozproszone przechodzą z powrotem przez ścieżkę optyczną i padają na dysk skanujący. Wynikowe światło po przejściu przez

jego otwory skupiane jest na detektorze. Ponieważ dysk skanujący obraca się z dużą prędkością oświetlenie i filtrowanie światła poza ogniskiem daje w efekcie obraz mierzonej powierzchni.

Podstawową zaletą mikroskopu konfokalnego jest to, że jego zakres pionowy można swobodnie zwiększać, a wadą jest fakt, że dokładność w osi z jest zależna od obiektywu, pole widzenia jest stosunkowo małe, a ponadto straty natężenia światła są spore.



Rys. 5. Zasada działania konfokalnego mikroskopu chromatycznego [12]

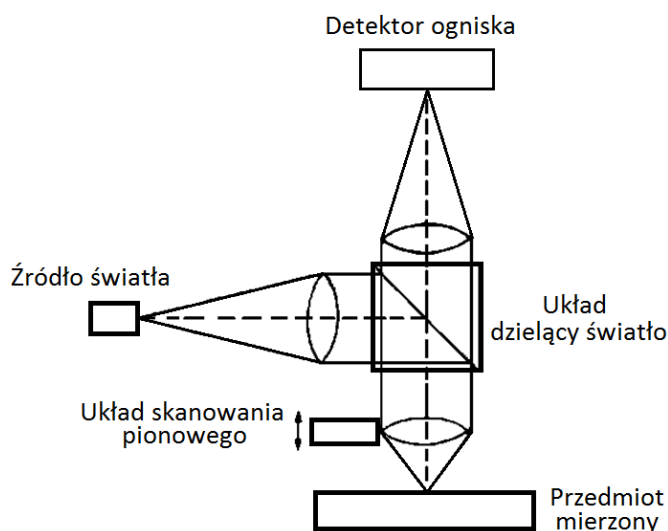
Mikroskopy konfokalne oraz głowice konfokalne pracujące w układzie profilometrycznym są obecnie najchętniej stosowanymi optycznymi systemami pomiaru nierówności powierzchni obok skaningowych interferometrów koherentnych. Nic więc dziwnego, że różni badacze i producenci poświęcają sporo miejsca porównaniom tych przyrządów, choć trzeba przyznać, że chwając własne rozwiązania – nie zawsze czynią to w sposób do końca obiektywny. Z reguły można przyjąć, że CSI pozwalają na uzyskanie lepszej rozdzielczości pionowej, natomiast systemy konfokalne pozwalają mierzyć większe pochylenia zboczy powierzchni.

### 3.3. MIKROSKOPIA RÓŻNICOWANIA OGNISKOWEGO

Mikroskopia różnicowania ogniskowego polega na wykorzystaniu ostrości obrazu powierzchni (lub innej właściwości światła odbitego przy najlepszym zogniskowaniu) do oceny wysokości nierówności powierzchni. Przedmiot mierzony oświetlany jest światłem o odpowiedniej modulacji, transmitowanym przez optykę i ogniskowanym na powierzchni. Światło odbite przez nią wraca przez układ optyczny i dociera do detektora cyfrowego wyszukującego wiązkę zogniskowaną. Obraz powierzchni kształtowany jest przez system optyczny pozwalający uzyskać zarówno informacje

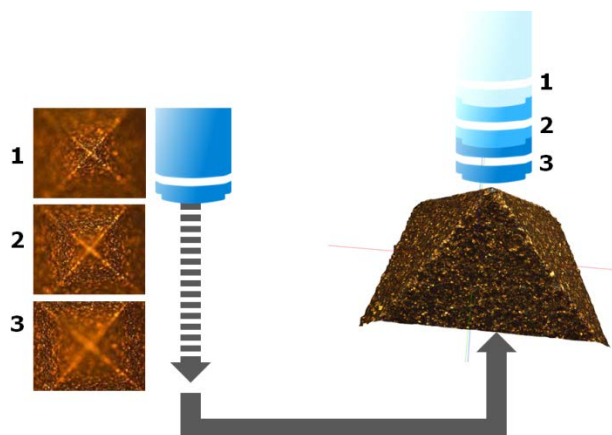


fotometryczne (jasność, kolor itp.) jak i geometryczne (odległości, kształt) [13]. Każda powierzchnia będzie miała tylko fragment ogniskowany, a pozostałe obszary będą rozmyte. Dla potrzeb rekonstrukcji topografii zapamiętane zostaną jedynie te miejsca, w których dane z detektora będą się pokrywać z danymi z powierzchni ogniskowania obrazu. Schemat funkcjonowania opisanego systemu zaprezentowano na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat funkcjonowania systemu różnicowania ogniskowego

Głównym elementem takiego systemu jest układ optyczny zaczerpnięty z mikroskopu, który można wyposażyć w różne obiektywy, pozwalające na pomiary z różną rozdzielczością. Światło ze źródła przechodzi przez drogę optyczną i pada na powierzchnię mierzonego przedmiotu. Zależnie od jego topografii światło odbite rozprasza się na różne kierunki. Wszystkie promienie wracające od powierzchni i docierające do obiektywu są zbierane w układzie optycznym przez detektor. Ze względu na bardzo małą głębokość ogniskowania układu optycznego tylko mały fragment obiektu ma obraz ostry (w ognisku) i tylko ta część obrazu wykorzystywana jest do dalszego przetwarzania. Całość kształtu uzyskuje się przez skanowanie pionowe powierzchni (zmiana odległości pomiędzy obiektywem a detektorem) i sukcesywne uzupełnienie obszarów, w których poprzednio nie uzyskano ogniskowania. Każdy region obiektu ma obraz w ognisku w jednym położeniu pionowym skanera. Zebrane dane z obrazów przetwarzane są na widok trójwymiarowy. Mikroskop różnicowania ogniskowego umożliwia zatem rekonstrukcję topografii powierzchni z obrazów 2D zarejestrowanych pomiędzy najniższym i najwyższym punktem ogniskowania. System pomiarowy jest przy tym mikroskopem optycznym, a więc wszystkie obrazy mierzonego przedmiotu są kolorowe. Schemat takiej analizy pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Rekonstrukcja obrazu 3D w systemie różnicowania ogniskowego [14]

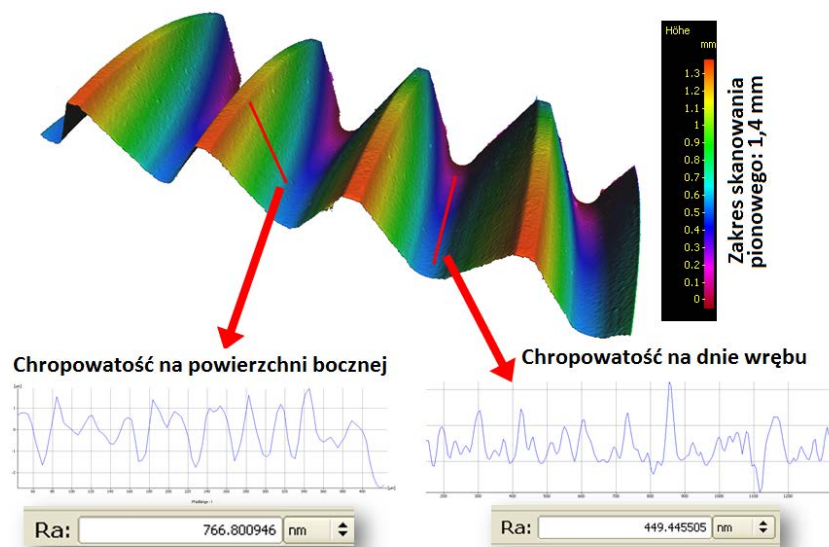
Współczesny system pomiarowy wykorzystujący różnicowanie ogniskowania jest układem skanującym często wyposażonym w cały zestaw obiektywów do różnych zadań pomiarowych. Wygląd przyrządu pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Mikroskop różnicowania ogniskowego [15]

Pozwala on na zebrania nawet kilkudziesięciu milionów punktów pomiarowych w bardzo krótkim czasie, mierzonym w sekundach. W zależności od zastosowanego obiektywu zakres pomiarowy może wynosić od około 3 mm przy rozdzielczości pionowej 10 nm, do ponad 20 mm przy rozdzielczości rzędu 400 nm. Przedmioty mierzone mogą być wykonane z różnych materiałów, o bardzo różnej chropowatości i refleksyjności. Przyrząd daje również informację cechach geometrycznych

mieszczących się w jego zakresie pomiarowym, w tym również na powierzchniach nachylonych o kącie do 85°. Dzięki dużemu zakresowi pomiarowemu i kątowi nachylenia powierzchni można mierzyć jednocześnie chropowatość i cechy geometryczne. Przykład takiej analizy na gwintowniku pokazano na rysunku 9. Porównania geometrii dokonano poprzez nałożenie pliku z danymi rzeczywistymi i teoretycznymi CAD.



Rys. 9. Pomiar chropowatości na gwintowniku i porównanie jego geometrii z CAD [16]

Wadą jest to, że ponieważ opisana metoda wykorzystuje różnicowanie ogniskowania, można ją stosować tylko do powierzchni, w których ognisko wyraźnie się zmienia w trakcie skanowania pionowego. Jeśli ten warunek nie jest spełniony (na przykład dla powierzchni przezroczystych lub przedmiotów z tylko niewielkimi lokalnymi nierównościami) to nie można jednoznacznie określić położenia ogniska i prawidłowo przeprowadzić pomiaru. Mikroskopia różnicowania ogniskowego ma ponadto gorszą rozdzielczość od mikroskopii konfokalnej i CSI.

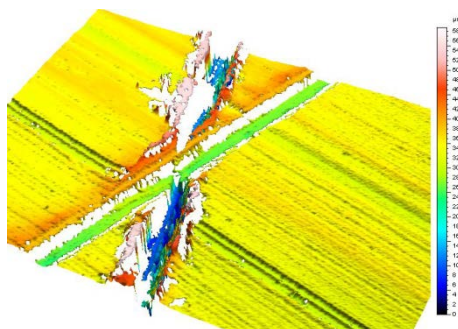
#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawione wybrane przyrządy i koncepcje ich wykorzystania pokazują jak złożonym problemem są pomiary nierówności powierzchni. Już sama mnogość technik możliwych do ich wykorzystania jest imponująca, a jednocześnie pokazuje, że nie ma jednej zdecydowanie wiodącej. Bardzo dużo w kwestii wyboru konkretnej metody zależy od aplikacji i warunków pomiaru. W metrologii powierzchni istnieje wiele różnych zadań pomiarowych poza parametryczną analizą chropowatości, jak np.

identyfikacja i ocena zarysowań, badanie defektów powierzchniowych, inspekcja mikrokształtu itp. Istnieje również wiele technik pomiarowych i różne wymagania związane z tolerancją.

W metrologii powierzchni podstawową zaletą metody stykowej jest jej powszechność do kwalifikacji funkcjonalności i jakości. Od lat istnieją międzynarodowe i krajowe normy precyzujące warunki stosowania, kalibrację i identyfikowalność. Parametry liczbowo określające nierówności zostały stworzone właśnie z myślą o metodzie stykowej. Osoby zajmujące się pomiarami posiadają często bogate doświadczenie wynikające z lat pracy. Metodę stykową można stosować do różnych aplikacji z dużą precyzją. Jest ona zrozumiała, wytłumaczalna matematycznie (włącznie z filtrującym działaniem końcówki pomiarowej) i bardzo odporna na różne zakłócenia. Wadą metody stykowej jest długi czas pomiaru, zwłaszcza w zastosowaniach 3D, przy konieczności wykonania wielu przejść końcówki pomiarowej. Pomiary w kierunku zgodnym ze śladami obróbki są praktycznie niemożliwe. Poza tym metoda ta jest destrukcyjna dla powierzchni miękkich.

Zalety metod optycznych to zdecydowanie krótszy czas pomiaru zwłaszcza przy pomiarach większych fragmentów powierzchni oraz możliwość pomiaru materiałów miękkich, w których stykowa końcówka pomiarowa uszkadza powierzchnię. Potencjalnie – jeśli chodzi o zagadnienia związane z kontrolą jakości – rynek na pomiary optyczne i przyrządy do ich realizacji jest ogromny. Rzeczywistość jest jednak taka, że obecnie jest on bardzo wyraźnie zdominowany przez metodę stykową. Techniki optyczne traktowane są jako jej potencjalne uzupełnienie, pozwalające uzyskać zupełnie nowe informacje. Problemem w technikach optycznych są tzw. miejsca niemierzone, czyli takie, z których nie otrzymano danych pomiarowych, oznaczone w postaci białych plam na obrazie topografii powierzchni. Typowy wygląd miejsc niemierzonych pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Obraz powierzchni z miejscami niemierzonymi [17]

Takie białe plamy występują zresztą przy pomiarach praktycznie wszystkimi technikami optycznymi, w zależności od powierzchni i techniki jest ich mniej lub

więcej. Plamy te można wypełnić dzięki funkcjom oprogramowania, umożliwiającym interpolację i przewidywanie kształtu nierówności powierzchni. Oczywiście, jest to możliwe tylko do pewnego stopnia, a jeśli punktów niemierzonych jest za dużo, wiarygodność ich wypełnienia staje się mocno dyskusyjna.

Coraz częściej tworzone są przyrządy, których zasada działania jest połączeniem kilku różnych technik, co pozwala na znaczne rozszerzenie zakresu pomiarowego przy zachowaniu bardzo wysokiej rozdzielczości. Przykładem jest opisany w profilometrze umożliwiający zamontowanie tradycyjnej głowicy stykowej, głowicy stykowej o małym nacisku, głowic optycznych: konfokalnej i interferometrycznej oraz mikroskopu sił atomowych. Uniwersalność takiego systemu jest nie do przecenienia, chociażby z uwagi na możliwość porównania zachowania różnych głowic na tej samej powierzchni.

#### LITERATURA

- [1] WIECZOROWSKI M., *Metrologia nierówności powierzchni – metody i systemy*, ZAPOL, Szczecin, 2013.
- [2] ADAMCZAK S., *Struktura geometryczna powierzchni. Cz. 1. Przyrządy pomiarowe*, Mechanik, 10, 2006, 736-740.
- [3] NOWICKI B., *Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni*. WNT, Warszawa 1991.
- [4] WIECZOROWSKI M., CELLARY A., ChAJDA J., *Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli o chropowatości i nie tylko*, Poznań 2003.
- [5] PAWLUS P., *Topografia powierzchni, pomiar, analiza, oddziaływanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2005.
- [6] ŁUKIANOWICZ C., *Podstawy pomiarów nierówności powierzchni metodami rozpraszania światła*. Monografia 85, Wydział Mechaniczny, Politechniki Koszalińskiej, 2001.
- [7] WIECZOROWSKI M., CARRAS S., ŚMIERZCHAŁSKI D., MATHIA T., KUCHARSKI D., *Multisensor Solution in Platform Device for Surface Roughness Measurements*. W: Development of Surface Metrology, ed. P. Pawlus, University of Bielsko Biała, 2012, 35-44.
- [8] Altisurf 520, Altimet, Francja, 2013.
- [9] <http://www.stilsa.com>
- [10] PETZING J., COUPLAND J., LEACH R., *The Measurement of Rough Surface Topography using Coherence Scanning Interferometry*. Good Practice Guide No. 116, NPL, 2010.
- [11] COHEN-SABBAN J., GAILLARD-GROLEAS J., CREPIN P.-J., *Quasi-confocal extended field surface sensing*. Proceedings of the SPIE, 4449, 2001, 178-183.
- [12] [www.breitmeier.de](http://www.breitmeier.de)
- [13] SUBBARAO M., CHOI T., *Accurate Recovery of Three-Dimensional Shape from Image Focus*. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 17, 1995, 266-274.
- [14] Focus-Variation. The Technology, Alicona, 2014.
- [15] Infinite Focus G5, Alicona, 2014.
- [16] Roughness Measurement with Focus-Variation, Alicona, 2012.
- [17] ARMSTRONG J., *Talysurf CCI - How it works*. Taylor Hobson, Leicester, Anglia, 2005.