

Józef GAWLIK¹, Jerzy SŁADEK²
Andrzej RYNIIEWICZ², Marek KOWALSKI²
Adam GĄSKA²

WIELOFUNKCYJNA OCENA JAKOŚCI URZĄDZEŃ TECHNOLOGICZNYCH I WYROBÓW

W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące oceny jakości procesów technologicznych oraz wyrobów. Przedstawiono sposoby oceny jakości za pomocą wskaźników zdolności maszyn i urządzeń na bazie metodyki SPC. Zamieszczono także ocenę dokładności wyrobów z wykorzystaniem rentgenowskiej tomografii komputerowej. Do oceny zaproponowano wzorce przestrzenne oraz strategię umożliwiającą porównanie urządzeń pomiarowych względem siebie i ocenę dokładności odwzorowania badanych wyrobów.

1. WSTĘP

Rozpatrując zagadnienie oceny jakości wyrobów należy zwrócić uwagę na następujące aspekty:

- a) jakość wyrobu jest kształtowana w całym procesie produkcyjnym, a nie na jego końcu,
- b) kontrola finalna nie wpływa bezpośrednio na jakość, ale zabezpiecza w znaczący sposób przed ryzykiem trafienia do odbiorcy wyrobu wadliwego,
- c) kontrola 100% nie prowadzi do całkowitej pewności, że wadliwy wyrób nie dostanie się do klienta,
- d) najlepsze rezultaty dla zapewnienia odpowiedniego poziomu jakości daje połączenie nadzorowania wyrobu z nadzorowaniem produkcji.

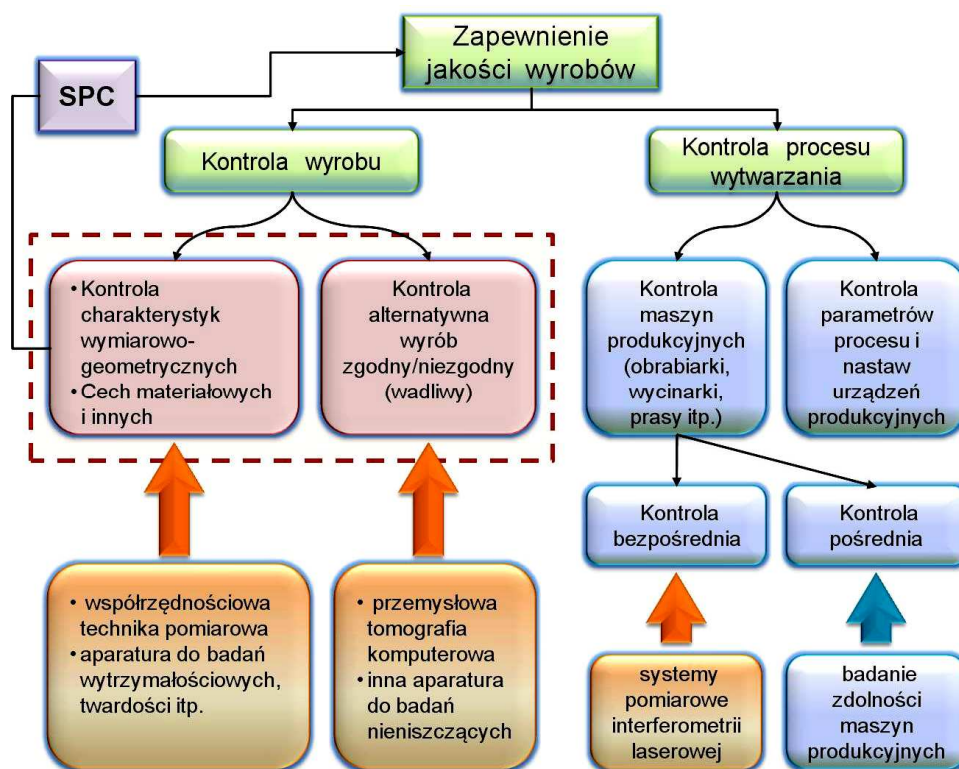
Wychodząc z powyższych przesłanek przeanalizowano ogólny system kontroli procesu i wyrobu. Nadzór (kontrola) ma być dokonywana dla zapewnienia odpowiedniej jakości procesu i stwarza możliwość jego poprawy. Nadzór nad wytwarzaniem powinien mieć charakter procesowy zaś podstawą do działania są wnioski z pomiarów. Wynika z tego dominująca rola działań metrologicznych.

¹ Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Politechnika Krakowska, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

² Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, Politechnika Krakowska, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

2. ANALIZA SYSTEMU NADZOROWANIA JAKOŚCI W PRODUKCJI

Analiza metody kontroli prowadzonej w sposób ciągły prowadzi do struktury systemu pokazanej na rys. 1. Kontrola procesu wytwarzania może być prowadzona w dwojaki sposób: albo przez pomiary cech wyrobu (np. wymiaru, kształtu, położenia, twardości mat. itp.) w różnych stadiach procesu albo poprzez metrologiczny nadzór nad jego parametrami. O ile kryteria oceny procesu pomiaru wyrobu są jednoznaczne, to przy stosowaniu wyłącznie drugiej metody pojawia się szereg problemów. Pierwsze pytanie z tym związane to, jakie mają być wartości optymalne parametrów maszyn i urządzeń i jak je wyznaczać? Następną kwestią to, które parametry i na jakiej podstawie wybrać do kontroli. Objęcie kontrolą wszystkich może być ze względów technicznych i ekonomicznych trudne do wykonania. Zważywszy, że istnieje wiele zmiennych determinujących jakość wyrobu; część kontroli powinna mieć charakter statystyczny.



Rys. 1. Ogólna struktura systemu zapewnienia jakości wyrobów w przemyśle maszynowym
Fig. 1. General structure of quality assurance system in machine industry

2.1. ZAPEWNIENIE JAKOŚCI WYROBU PRZEZ MONITOROWANIE WYBRANYCH CHARAKTERYSTYK

Dla zapewnienia sterowalności procesu produkcyjnego, z uwagi na jakość, skuteczną metodą okazała się kontrola charakterystyk wymiarowo-geometrycznych i ewentualnie

innych z użyciem metod statystycznych, w więc SPC. Ze względu na złożony charakter procesu produkcyjnego jest on odwzorowywany przy pomocy modelu statystycznego, do którego dane pochodzą z pomiarów. Współczesne systemy produkcyjne wykorzystują w tym celu zautomatyzowane układy pomiarowe, a w przypadkach bardziej skomplikowanych wyrobów współrzędnociową technikę pomiarową w postaci maszyn lub ramion współrzędnociowych. Natomiast w przypadku wykrywania wewnętrznych wad coraz częściej wykorzystuje się m.in. tomografię komputerową. Obie wspomniane techniki zapewniają przestrzenny charakter pomiaru, co pozwala na lepsze niż w innych przypadkach odwzorowanie cech wyrobu. Mimo, iż pomiarowi podlega wyrób, to uwaga jest tu skupiona na procesie. Jeżeli wyniki wykazują jakiegokolwiek odchylenie od założeń, to należy natychmiast zareagować i poddać analizie funkcjonowanie maszyn produkcyjnych. Zasadniczym modułem przy ocenie jakościowej procesów są karty kontrolne stosowane do procesów dyskretnych oraz ciągłych. Trzeba jednak być świadomym, że pomimo dość długiego okresu stosowania kart kontrolnych pewne problemy nie zostały jeszcze zadowalająco rozwiązane. Należy tu wymienić: brak adekwatności kart kontrolnych w warunkach nietypowych rozkładów prawdopodobieństwa, istnienie trendów okresowych, nieoczekiwanych zmian w wycentrowaniu nastaw, czy też ich zastosowalność dla krótkich serii.

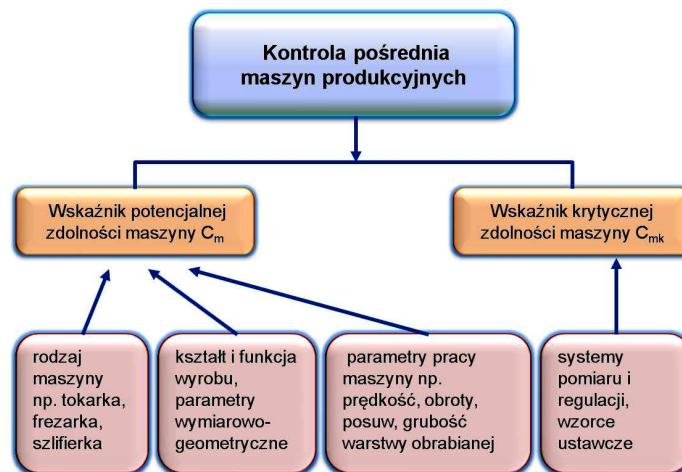
2.2. ZAPEWNIENIE JAKOŚCI WYROBU PRZEZ NADZOROWANIE PARAMETRÓW PROCESU WYTWARZANIA

Tego typu stały nadzór koncentruje się na kontroli poszczególnych składników procesu wytwarzania i dotyczy głównie maszyn i urządzeń technologicznych. Stosowane są dwa podejścia do tego zagadnienia. Podejście pierwsze polega na kontroli bezpośredniej maszyn np. obrabiarek (rys. 2), zaś podejście drugie na wyznaczeniu syntetycznego wskaźnika jakościowego dla maszyny np. wskaźników C_m , C_{mk} (rys. 3). Każde z tych podejść ma swoje zalety i wady, ale nie muszą się one wykluczać. Metoda pierwsza pozwala ocenić praktycznie wszystkie składowe błędy sumarycznego maszyny związane z jej geometrią i poprawnością kinematyczną, ale wymaga specjalistycznej aparatury, wzorców oraz względnie długiego czasu na wykonanie badań kompleksowych. Ponadto ocena maszyny następuje w warunkach bez obciążenia siłami powstającymi podczas obróbki.

Bardziej korzystną jest metoda pośrednia. Bazuje ona na wyznaczeniu współczynników zdolności maszyny C_m i C_{mk} . Wpływ obciążenia siłami podczas obróbki jest uwzględniany, ale z zastrzeżeniem, że dotyczy ściśle określonego obciążenia i obróbki podobnych wyrobów. Nie zapewnia ona szybkiego zdiagnozowania dominujących źródeł zakłóceń, natomiast dobrze nadają się do stwierdzenia, czy dany produkt może być wytwarzany na maszynie z odpowiednią dokładnością. Metoda ta zasadniczo nie wymaga specjalistycznych przyrządów pomiarowych, chociaż technika współrzędnociowa bywa tu często przydatna. Konieczne jest jednak wykonanie serii próbnej wyrobów, co wiąże się z czasem i kosztami.



Rys. 2. Zakres ogólny kontroli bezpośredniej maszyn
Fig. 2. General scope of direct machine control



Rys. 3. Uwarunkowania przy kontroli pośredniej
Fig. 3. Conditions of indirect control

Ponadto istotnym problemem przy wyznaczaniu wskaźnika zdolności dla maszyny są oddziaływania o charakterze nielosowym, takie jak zmieniająca się sztywność układu mechanicznego przy obróbce różniących się części, rodzaj narzędzia i podatność na zużycie, a także wpływy termiczne. Te ostatnie zwykle są kojarzone głównie z dylatacją cieplną. Największe znaczenie mają odkształcenia nieliniowe mechanicznej struktury urządzenia produkcyjnego, trudne do analitycznej oceny. Wymienione czynniki oddziałują w ograniczonym zakresie na wartość odchylenia standardowego lub jego estymatę, ale w pełni zaznaczają swój wpływ przy zmianie wytwarzanego produktu.

Tak więc wyznaczanie wartości współczynników c_m , c_{mk} tylko w odniesieniu do jednego wyrobu daje zbyt mało informacji dla produkcji różnych wyrobów tymi samymi maszynami oraz przy zmieniających się warunkach środowiskowych. Pełną informację dałoby przyporządkowanie danemu urządzeniu produkcyjnemu kilku wartości c_m dla typowych, ale wyraźnie zróżnicowanych, elementów wytwarzanych na tym urządzeniu. Rozważyć również można wyodrębnienie grupy cech, do których należy przypisać daną wartość c_m , np. grupa wymiarowa, odchyłek kształtu, odchyłek kierunku oraz położenia.

Ocena wskaźników zdolności maszyn lub procesów jest dodatkowo uzależniona od rodzaju rozkładu prawdopodobieństwa. W wielu przypadkach rozkład gęstości prawdopodobieństwa nie jest zgodny z krzywą Gaussa. Do tej pory znane są dwa podejścia do tego problemu. Podejście pierwsze polega na wykorzystaniu transformacji Johnsona do przekształcenia dowolnego rozkładu w standaryzowany rozkład Gaussa. Drugi sposób bazuje na granicznych udziałach procentowych przyjmując dolny percentyl jako równy 0,135% a górny równy 99,865%. Zakłada się, że w tych granicach zawiera się 99,73 populacji danej cechy. Przyczyn występowania rozkładów innych niż normalny może być wiele. W odniesieniu do procesu produkcyjnego może być to efektem cykliczności pewnych systematycznych zmian, oddziaływania zakłóceń w formie trendu lub passy, nagłej zmiany poziomu wycentrowania urządzeń technologicznych, niestabilności warunków obróbki, czy też tolerowania jednostronnego np. dla twardości materiału. W przypadku maszyny jest to zazwyczaj efektem zmian termicznych, zużycia narzędzia, zmian w sztywności układu obróbkowego.

Przykładem szczególnym jest występowanie rozkładów dwóch zmiennych losowych. Przykładem może być obróbka elementów walcowych np. otworów, o lokalizacji tolerowanej względem układu baz (tolerancja pozycji). Nie istnieje tu prosta analogia do klasycznych wskaźników zdolności. Propozycję oceny takiego wskaźnika można znaleźć w pracy [2] w postaci obliczonego prawdopodobieństwa, ale nie jest to wystarczające dla praktyki i wymaga ściślejszych analiz. Takie analizy bazujące na podejściu wektorowym są obecnie prowadzone przez autorów.

3. DOKŁADNOŚĆ ODWZOROWANIA MIERZONEGO KSZTAŁTU

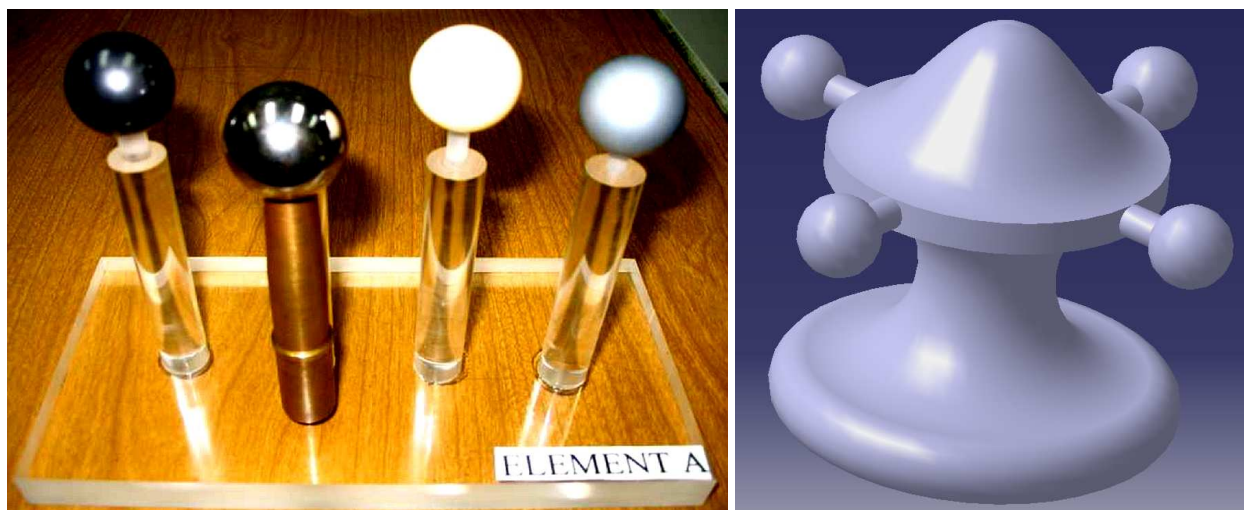
Jednym ze sposobów oceny dokładności wykonania wyrobów jest wykorzystanie współczesnej tomografii komputerowej. Tomograf jest urządzeniem odmiennym niż standardowe urządzenia pomiarowe, z tego względu, że oprócz wymiarów zewnętrznych badanego przedmiotu, istnieje możliwość zmierzenia struktury wewnętrznej obiektu. Tomografy mogą być wykorzystywane zarówno w przemyśle, do oceny stanu wewnętrznego badanych przedmiotów, bez konieczności niszczenia ich, jak i w medycynie. Tomografia komputerowa umożliwia wniknięcie w głąb, w strukturę wewnętrzną wyrobu i określenie jej stanu dotyczącego jakości materiałowej. Problem oceny dokładności odwzorowania wewnętrznego elementów, jest niezwykle ważny i od lat fascynuje naukowców różnych dziedzin. Najnowsze techniki obrazowania spiralną tomografią komputerową (STK) problem ten częściowo rozwiązują, jednak nadal wyznaczenie geometrii 3D naraża wiele problemów. Zapewnienie odwzorowania kształtu badanych

powierzchni z odpowiednią dokładnością w skali makro i mikro, pozwoli na ocenę jakości części w przemyśle, lub w medycynie. Niezależnie od obszaru zastosowania tomografii komputerowej, istotny jest problem dokładności odwzorowania mierzonego kształtu. Na Politechnice Krakowskiej prowadzone są badania nad oceną dokładności odwzorowania kształtu. Opracowany został sposób oceny dokładności odwzorowania kształtu, przy obrazowaniu STK, z zastosowaniem wzorców walcowych i kulowych.

4. METODA OCENY DOKŁADNOŚCI ODWZOROWANIA KSZTAŁTU Z ZASTOSOWANIEM WZORCÓW PRZESTRZENNYCH

4.1. WZORCE KONTROLNE

Z uwagi na specyfikę pomiarów wykonywanych z wykorzystaniem STK oraz fakt, iż w wielu przypadkach procedury kontroli jakości obejmują nie tylko rekonstrukcję 3D, ale również pomiary geometryczne, pozycjonowania, odległościowe czy objętościowe analizowanych części lub narzędzi, zaproponowano ocenę dokładności odwzorowania kształtu opartą na analizie odtworzenia wzorców ceramicznych i polimerowych. W etapie pierwszym zarysów wzorców, a następnie powierzchni sferycznych. W etapie drugim dodatkowo oceniano odległości pomiędzy punktami charakterystycznymi wzorca np. odległość pomiędzy środkami kul. Do rekonstrukcji 3D oraz oceny parametrów geometrycznych wykorzystywano programy Femap Nastran i AutoCAD.



Rys. 4. Przykładowe wzorce kontrolne wykorzystywane do oceny dokładności tomografu
Fig. 4. Exemplary standards used for tomographs accuracy assessment

Dobór materiałów wzorców oparto na właściwościach pochłaniania promieniowania rentgenowskiego. Obraz tomograficzny jest tworzony na podstawie siatki wartości

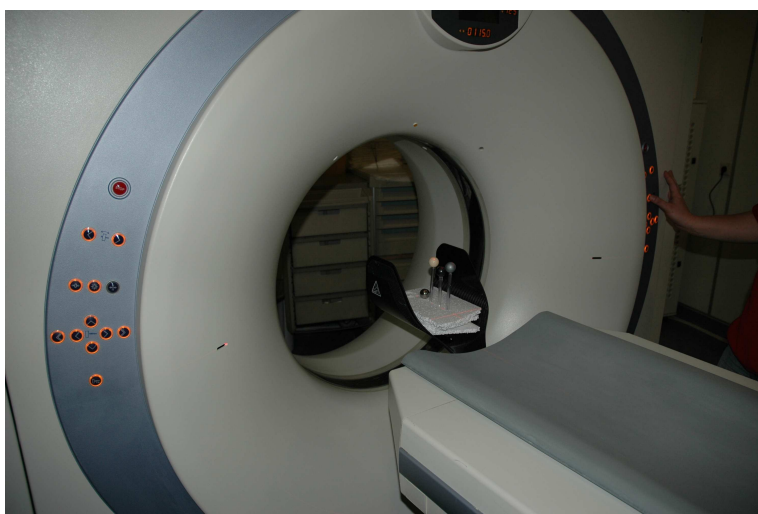
liniowego współczynnika osłabienia promieniowania rentgenowskiego, obliczanego dla poszczególnych elementów objętości badanego obiektu. Wartości te są zwykle podawane w znormalizowanych jednostkach HU (ang. HU - Hounsfield units, także CT values, CT numbers) [3], [4]. Przy doborze materiału na wzorce przeprowadzono ocenę osłabienia promieniowania X przy przejściu przez materiał wzorca. Podstawą do doboru materiałów na wzorce były więc wyniki badań wybranych materiałów w TK. Szczególnie analizowano materiały ceramiczne oraz polimery i kompozyty, a ich przykładowe właściwości wybrane do oceny to: współczynniki pochłaniania promieniowania X w odniesieniu do badanych materiałów, stabilność kształtu w warunkach oddziaływania obciążeń cieplnych, sposób obróbki, chłonność wody.

Przykłady wzorców kontrolnych zostały przedstawione na rys. 4. Kształt wzorców dobrano z uwagi na specyficzną kinematykę tomografów komputerowych oraz możliwie maksymalne wyeliminowanie błędów ustawienia przy metodzie sekwencyjnej oraz spiralnej.

4.2. POMIARY WZORCÓW

Wszystkie modele wzorców badano dwutorowo: 1. - na maszynie współrzędnościowej, w celu uzyskania wzorca numerycznego, 2. - z zastosowaniem tomografu komputerowego, w celu otrzymania skanów i obrazów przestrzennych oraz przeprowadzenia pomiarów np. z zastosowaniem programów Amira i AutoCAD.

Przykładowe badanie wzorca wykonanego w Politechnice Krakowskiej, realizowane na tomografie komputerowym wraz z oznaczeniem parametrów kontrolnych przedstawiono na rys. 5. Do analizy wyników wykorzystano numeryczny obraz wzorca oraz programy: 3D Reshaper, Rhinoceros, AutoCad 2007, Microsoft Excel, Mimics.

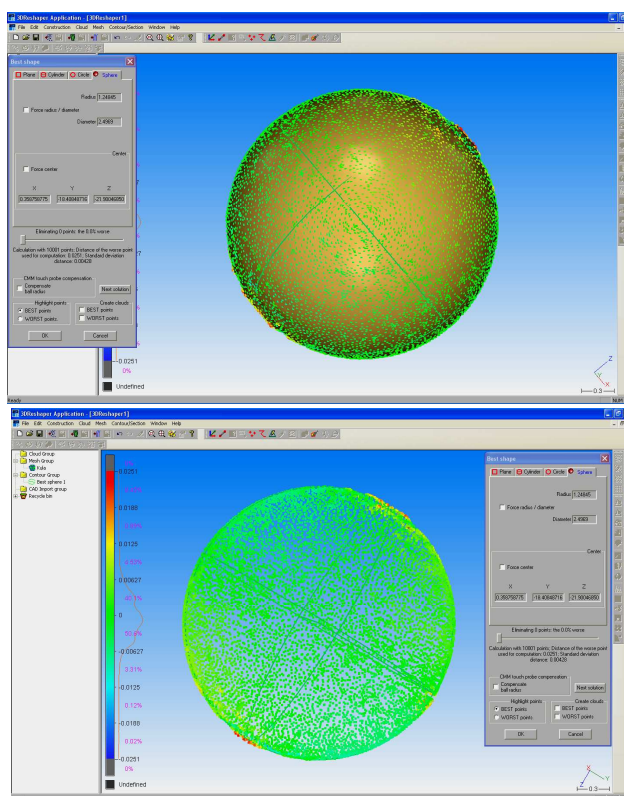


Rys. 5. Pomiar wzorca na tomografie komputerowym
Fig. 5. Measurements of standard spheres on computed tomography

Po przeprowadzeniu segmentacji obrazów, określeniu granic i krawędzi modeli otrzymanych z plików Dicom, otrzymano obrazy 3D modeli, które następnie poddano obróbce w programie Rhinoceros. Przykładowe wyniki pomiaru wybranych parametrów kontrolnych przedstawiono w następnym punkcie.

4.3. WYNIKI POMIARÓW

Zgodnie z obowiązującymi procedurami kontrolnymi oraz zaproponowanymi przez Politechnikę Krakowską strategiami pomiarowymi [1], [6], po wykonaniu wzorców i opracowaniu ich modeli, przeprowadzono ocenę dokładności odwzorowania zarysu. Analiza ta wykazała, że np. przy odwzorowaniu zarysu ceramicznej kulki wzorcowej (rys.6), odchyłka kształtu okrągłości w badanym przekroju wyniosła 0,012mm (średnia z 10 serii pomiarów przy rozstępie wyników od 0,01mm do 0,015mm).



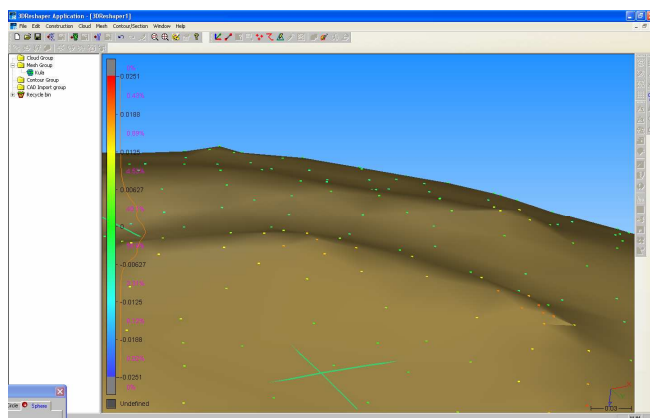
Rys. 6. Porównanie zmierzonej kulki wzorcowej z idealną sferą
Fig. 6. Comparison of measured sphere with ideal sphere

W celu oceny dokładności odwzorowania kształtu w przestrzeni roboczej TK przeprowadzono pomiary średnicy ceramicznej kulki wzorcowej w najczęściej używanym obszarze pomiarowym tj. 1200mm co 150mm. Pomiary przeprowadzono 5-krotnie w każdym położeniu. Stwierdzono, że wzrost rozstępu wyników dla poszczególnych

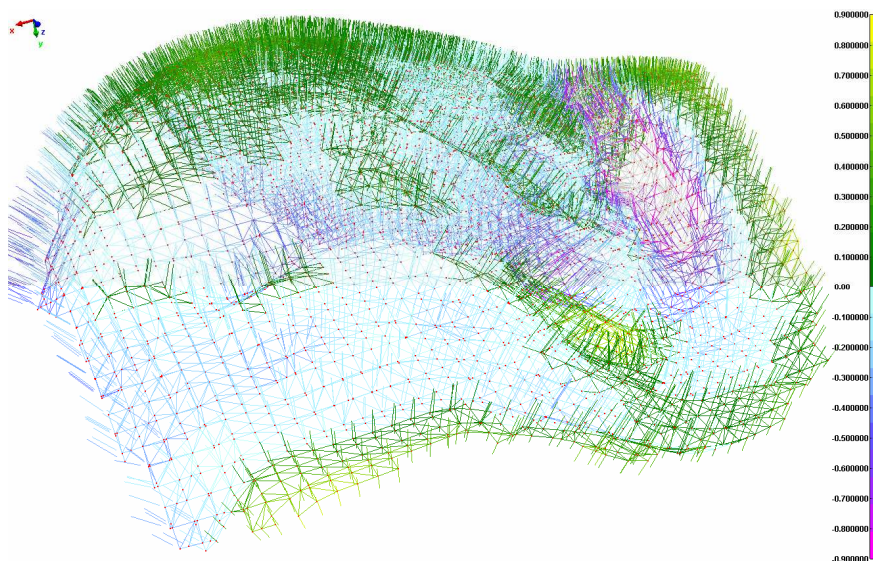
punktów pomiarowych wynosi średnio 0,01mm od punktu bazowego, a pod koniec zakresu pomiarowego 0,04mm.

Na podstawie wykonanych pomiarów promienia kulki wzorcowej powtórzonych 10-krotnie stwierdzono, że w 90,7% wyników błąd pomiaru promienia na tomografii, w stosunku do pomiaru na PMM, mieści się w przedziale $\pm 0.063\text{mm}$, a dla 98.5% wyników w przedziale $\pm 0.125\text{mm}$. Odchylenie standardowe wyniosło 0,0428mm, a wartość średnia pomiaru średnicy kuli wzorcowej wyniosła 24,969mm, podczas gdy dla pomiaru zrealizowanego na PMM wynosiła 24,884mm.

Zaobserwowano również, że największe błędy w pomiarach średnicy są spowodowane przez problemy tomografu z odwzorowaniem obszarów przy biegunach kul wzorcowych. Również błędy odwzorowania mierzone po promieniu są zdecydowanie największe w obszarach przy biegunach kuli (rys. 7).



Rys. 7. Widok kuli w obszarze okołobiegunowym
Fig. 7. View of the sphere in vicinity of the pole



Rys. 8. Wektory błędów porównania powierzchni wyrobu uzyskane z TK
Fig. 8. Vectors of fit error of surface of product measured on CT

Ocenę odwzorowania kształtu powierzchni swobodnych, które są charakterystyczne dla struktur wewnętrznych wyrobów przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch rodzajów tomografów: diagnostycznego i przemysłowo kalibracyjnego. Ocenę dokładności odwzorowania kształtu przeprowadzono również z wykorzystaniem teorii wektorowej błędów w oparciu o przestrzenny układ wektorów błędów, charakteryzujących niedokładność wyznaczonej geometrii (rys. 8).

5. CHARAKTERYZACJA PRZESTRZENI BŁĘDÓW

Świadomość konieczności jednoznacznego opisu dokładności rentgenowskiej tomografii komputerowej (RTG) poprzez pojęcie wektora błędu pozycji nie jest powszechna w zakładach produkcyjnych. Panuje pogląd, że wystarczające w tym celu są parametry podawane przez producentów maszyn np.: błędy graniczne dopuszczalne (MPE), czy niepewność 1-, 2- kierunkowa lub w przestrzeni 3D. Taki stan rzeczy jest po części spowodowany brakiem wiedzy o istocie techniki wielowspółrzędnościowej oraz stopniu skomplikowania problemu. Skutkiem takiego stanu jest niewłaściwa ocena dokładności realizowanych zadań pomiarowych oraz trudności przy planowaniu optymalnej strategii pomiarowej.

Współczesne systemy komputerowe wspomagające pomiary na RTG umożliwiają korekcję niektórych błędów maszyn współrzędnościowych lub wyników pomiarów. Jest to jednak działanie bierne i nie może być w większości przypadków używane przy planowaniu dokładności pomiarów współrzędnościowych.

Pomimo ciągłych prac nad metodami oceny dokładności RTG problem dokładnego porównania różnych RTG między sobą nie został do końca rozwiązany. Zaproponowany opis przestrzeni błędów RTG, przy pomocy wektora błędu pozycji, może być przydatny do porównania zdolności dokładności różnych RTG.

Mając na uwadze powyższe względy można postawić pytanie: w jaki sposób scharakteryzować przestrzeń pomiarową pod względem parametrów dokładności i jak zapisać zmienne pole błędów, aby ułatwić ocenę metrologiczną takich urządzeń? Dla rozwiązania tego problemu konieczne jest bardziej wnikliwe opisanie pola błędów i jego zapis w formie graficznej.

6. PARAMETRY DOKŁADNOŚCI W PRZESTRZENI

W przypadku, gdy należy scharakteryzować i opisać zmienność pewnych parametrów dokładnościowych w zależności od położenia w obszarze pomiarowym, powinno się rozważyć następujące możliwości:

Parametry skalarne:

- a) Każdemu punktowi w przestrzeni zostaje przyporządkowany błąd dokładności. W tym sensie błąd dokładności jest długością wektora błędu pozycji. Realizacja

takiej charakterystyki może być osiągnięta z wykorzystaniem laserowych systemów nadążnych.

- b) Każdemu punktowi w przestrzeni zostaje przyporządkowany błąd dokładności położenia dla punktu charakterystycznego dla elementów geometrycznych np. środka sfery. W stosunku do poprzedniego parametru, tak rozumiany błąd ogranicza wpływ niedokładności systemu stykowego przejmowania współrzędnych punktów pomiarowych. Realizacja tej charakterystyki wymaga użycia specjalnego wzorca przestrzennego z kulami.
- c) Każdej linii pomiarowej przyporządkowana zostaje jedynie maksymalna wartość błędu pomiaru długości. Realizacja takiej charakterystyki RTG odpowiada zasadniczo sposobowi zawartemu w PN-EN 10360-2. Obecna wersja tej normy wprowadza ograniczenia co do liczby kierunków. Technicznie polega ona na użyciu wzorców końcowych długości, ewentualnie zastosowaniu laserowych wzorców długości.

Parametry wektorowe:

- d) Każdemu punktowi w przestrzeni pomiarowej zostaje przyporządkowany wektor błędu pozycji. Metrologiczne informacje pozwalające na taką ocenę wymagają zastosowania wzorców płytowych, kulowych lub otworowych oraz specjalistycznego oprogramowania.
- e) Każdemu punktowi w przestrzeni pomiarowej zostaje przyporządkowany obszar błędów w postaci elipsoidy o zorientowanych w przestrzeni osiach. Wyznaczenie przez pomiar tego parametru jest niezwykle trudne, a w warunkach zakładów produkcyjnych wręcz niemożliwe.

W niniejszej pracy analizie poddano pole błędów utworzone przez wektory błędów pozycji, rozmieszczone w węzłach siatki pomiarowej. Ustalenie wektorów pomiędzy punktami węzłowymi może nastąpić drogą tradycyjnej aproksymacji lub z zastosowaniem sieci neuronowych [4], [5].

Dowolny wektor δ_p w punkcie A przestrzeni pomiarowej można zapisać w postaci:

$$\delta(A) = \delta_x(A)i + \delta_y(A)j + \delta_z(A)k \quad (1)$$

gdzie:

$\delta(A)$ — wektor pola błędów w punkcie P,

$\delta_x, \delta_y, \delta_z$ — składowe wektora $\delta(A)$ w ortokartezjańskim układzie współrzędnych,

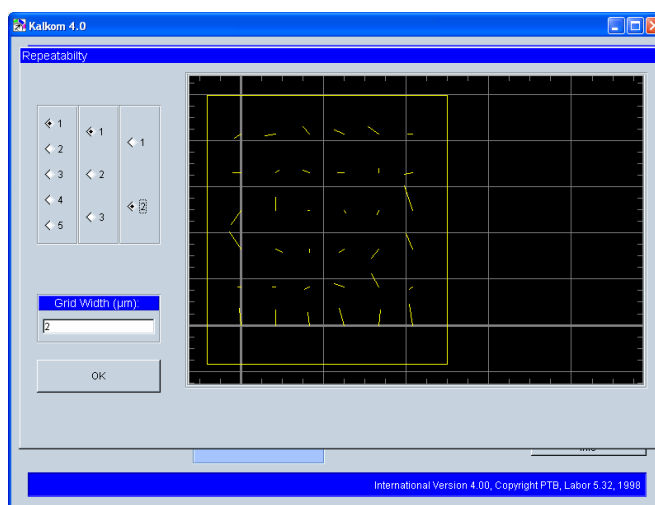
i, j, k — wersory osi układu.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów wzorcem płytowym, jako wzorcem o względnie dużym rozproszeniu, otrzymano dyskretne pole wektorowe jako funkcję błędów.

7. CHARAKTERYZACJA WEKTOROWEGO POLA BŁĘDÓW ZA POMOCĄ PARAMETRÓW

Wektory pola błędów pozycji tworzą siatkę wektorów, która w ogólności ma kształt prostopadłościanu. Siatka o stałych odstępach na płaszczyźnie zawiera wiersze i kolumny. Odstęp między dwoma kolejnymi miejscami zaczepienia wektorów błędów w kolumnie jest z reguły taki sam jak w wierszu i jest równy stałej siatki wzorca, co obrazuje rys. 9. Natomiast odstęp między kolejnymi punktami zaczepienia wektora w kierunku prostopadłym do płaszczyzny płyty nie jest uzależniony od konstrukcji stałej płyty, lecz wynika z określonej procedury kontrolnej, co oznacza, że stała siatki będzie inna niż stała płyty (z reguły znacznie większa).

W powszechnym przekonaniu parametrem porównywalności różnych WMP między sobą jest dokładność w sensie MPE lub niepewność U_1 , U_2 , U_3 . W rzeczywistości jednoznaczna porównywalność może być osiągnięta tylko poprzez analizę wektorowych pól błędów. Narzucająca się analiza, często wzrokowa, odpowiednich diagramów wektorowych nie jest wystarczająca. Potrzebne jest w tym celu wprowadzenie i zdefiniowanie parametrów odzwierciedlających właściwe formy wektorów błędów.



Rys. 9. Schemat dyskretnego pola wektorowego na płaszczyźnie jako odwzorowanie wyników użycia wzorca płytowego (program Kalkom 4.0)

Fig. 9. Scheme of discrete vector field on plane as a result of usage of plate standard

W związku z tym proponuje się wprowadzenie następujących parametrów:

- liniowych (klasy L), związanych z długością wektorów,
- kątowych (klasy K), opisujących zmiany w orientacji katowej wektorów błędów.

Parametry klasy L oraz klasy K można podzielić na:

- miejscowe (lokalne), opisujące dany rząd,
- globalne, opisujące całość pola wektorowego (dyskretnego).

W zakresie parametrów miejscowych klasy L, dotyczących płaszczyzny (np. płaszczyzny wzorca kontrolnego), proponuje się następujące parametry:

- długość maksymalna wektora błędu w r – tym rzędzie:

$$D_{r \max} \quad (2)$$

- długość minimalna wektora błędu w r – tym rzędzie:

$$D_{r \min} \quad (3)$$

- rozstęp długości wektora błędów w r – tym rzędzie:

$$R_r(D) = D_{r \max} - D_{r \min} \quad (4)$$

- średnia arytmetyczna długości wektora błędu w r – tym rzędzie:

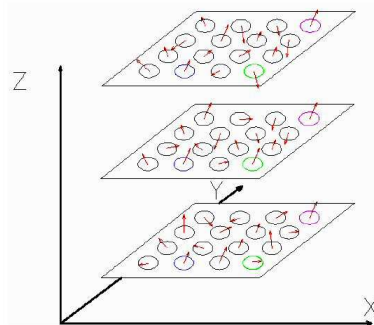
$$\bar{D}_r = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k D_{ri} \quad (5)$$

przy czym:

i – wskaźnik sumowania,

Przedstawione propozycje charakteryzacji pola błędów pozwalają na uściślenie zdolności tomografii komputerowej, co do dokładności pomiaru. Wydaje się to korzystne zwłaszcza w fazie planowania pomiaru. Następnym etapem powinno być dostosowanie tych parametrów do analizy 3 – wymiarowej.

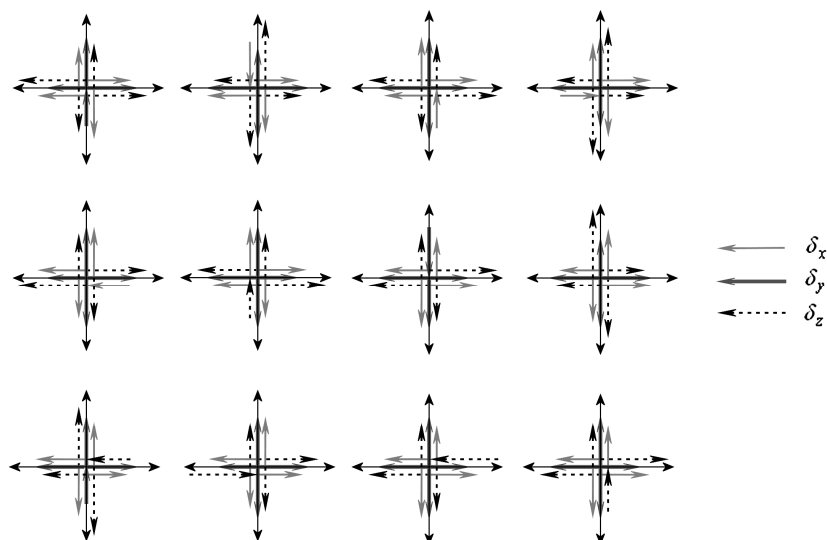
Pojawia się tutaj zagadnienie właściwego i czytelnego przedstawienia wyników identyfikacji przestrzeni pomiarowej tomografii komputerowej wzorcami płytowymi, ponieważ stanowi to punkt wyjścia do charakteryzacji parametrycznej w przestrzeni urządzenia. Przedstawienie wektorów w sposób poglądowy (rys. 10) nie rozwiązuje problemu, a nawet może prowadzić do błędnej oceny.



Rys. 10. Przedstawienie wektorów błędów pozycji w przestrzeni w sposób poglądowy
Fig. 10. Simplified presentation of vectors of position error in measuring area

Dlatego też autorzy proponują przedstawienie danych w formie siatki wektorów błędów pozycji, otrzymanych z kilku płaszczyzn równoległych na specjalnym diagramie

(rys. 11). Z tak przedstawionych danych bardzo łatwo odtworzyć postać pola wektorowego błędów pozycji, a także zależność poszczególnych składowych tego błędu wzdłuż określonych linii.



Rys. 11. Proponowany diagram przestrzennej siatki błędów w zapisie na płaszczyźnie
Fig. 11. Proposed diagram of spatial grid of errors presented on plane

8. WNIOSKI

Świadomość szerszej, a jednocześnie bardzo dokładnej, analizy dokładności tomografu komputerowego i wektorowego charakteru błędów w przestrzeni nie jest wśród personelu pomiarowego zakładów produkcyjnych jeszcze dobrze ugruntowana. Opieranie się wyłącznie na danych producenta odnośnie dokładności tomografu komputerowego prowadzi do zbyt uproszczonych interpretacji metrologicznych.

Dotychczasowe formy analitycznego opisu dokładności RTG bywają zbyt trudne do praktycznego użytku w warunkach przemysłowych. Wydaje się, że potrzebna jest nowa koncepcja opisu dokładności tomografu komputerowego poprzez charakteryzację przestrzennego pola błędów. Przedstawione parametry takiej charakteryzacji stanowią punkt wyjścia do dyskusji nad tym zagadnieniem. Zaproponowany zapis parametrów, związanych ze zmiennością wektora błędu pozycji, stwarza większe możliwości w diagnozowaniu przyczyn błędów (np. skręcenia prowadnicy) w stosunku do tradycyjnej analizy.

Zaproponowana koncepcja zapisu przestrzeni pola błędów pozwala na graficzne odwzorowanie wszystkich cech tego pola na płaszczyźnie. Zaleca się stosowanie tej metody zapisu dla nie więcej niż czterech położeń poziomych wzorca. Przeprowadzona analiza wektorów błędów odwzorowania kształtów wzorców kulowych oraz opracowane charakterystyki błędów umożliwiły wskazanie obszarów, gdzie odwzorowanie kształtu na podstawie obrazowania RTK, może nieść z sobą potencjalne błędy, które przede wszystkim

będą wynikały z kształtu, ale także z parametrów i procedury badania oraz lokalizacji obiektu w przestrzeni badawczej.

LITERATURA

- [1] CIERNIAK R., 2005, *Computed Tomography. Algorithms of reconstruction*, Warsaw.
- [2] DIETRICH E., SCHULZE A., 2000, *Metody statystyczne w kwalifikacji środków pomiarowych, maszyn i procesów produkcyjnych*, Notika System, Warszawa.
- [3] HOFER M., 2004, *Teaching Manual of color duplex tomography, 2nd edition*, Tieme, New York.
- [4] KOWALSKI M., 1997, *Interpretacja wyników badań dokładności WMP realizowanych płytami kontrolnymi*, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika, 63, Kielce.
- [5] SŁADEK J., 2001, *Modelowanie i ocena dokładności maszyn oraz pomiarów współrzędnościowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Mechanika, 87, Kraków.
- [6] RYNIWICZ A., 2010, *Analiza dokładności odwzorowania kształtu powierzchni roboczych biłożysek z zastosowaniem wzorców przestrzennych i modeli odwrotnych*, Sprawozdanie z projektu badawczego nr 4083/B/T02/2008/34, Politechnika Krakowska.

MULTIFUNCTIONAL QUALITY ESTIMATION OF TECHNOLOGICAL DEVICES AND PRODUCTS

Chosen aspects of quality estimation of technological processes and products were presented in this paper. Methods of quality estimation which use process and machine capability indices according to SPC framework were also presented. Next part of paper concerns topics connected with products accuracy evaluation using Computed Tomography. Spatial standards were proposed to use in accuracy evaluation. Paper also shows strategy of comparison of different metrological devices in order to evaluate accuracy of shape mapping of measured products.