

Dr hab. inż. Andrzej Kawalec, e-mail: ak@prz.edu.pl  
Dr inż. Marek Magdziak, e-mail: marekm@prz.edu.pl  
Politechnika Rzeszowska  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji

## WPŁYW METODY DOPASOWANIA NA WYNIKI POMIARÓW PIÓRA ŁOPATKI

**Streszczenie:** W celu wyboru właściwej metody dopasowania zmierzonych danych rzeczywistych do nominalnych w artykule porównano wyniki pomiarów współrzędnościowych pióra łopatkki, które uzyskano dla wybranych metod dopasowania. Weryfikację dokładności wykonania pióra łopatkki przeprowadzono z użyciem współrzędnościowej maszyny pomiarowej ACCURA II, która była wyposażona w oprogramowania pomiarowe Calypso oraz Blade Pro.

## INFLUENCE OF BEST-FIT METHOD ON RESULTS OF COORDINATE MEASUREMENTS OF TURBINE BLADE

**Abstract:** In order to choose the appropriate best-fit method of measured data to nominal data in the article the comparison of results of coordinate measurements of turbine blade was conducted. The results of coordinate measurements were obtained with the use of selected best-fit methods. The verification of the accuracy of turbine blade was performed by using the coordinate measuring machine ACCURA II equipped with Calypso and Blade Pro inspection software.

### 1. WPROWADZENIE

Sprawdzenie dokładności wykonania pióra łopatkki przeprowadzono z użyciem współrzędnościowej techniki pomiarowej. Istota pomiarów współrzędnościowych wyrobów (w tym także pióra łopatkki) polega na tym, że informacja o postaci geometrycznej przedmiotu jest odbierana jako zbiór współrzędnych zaobserwowanych punktów pomiarowych, w których znajduje się środek końcówki trzpienia głowicy pomiarowej w trakcie kontaktu z mierzoną powierzchnią danego wyrobu. Na podstawie uzyskanych informacji, w postaci zbioru współrzędnych zaobserwowanych punktów pomiarowych, przeprowadzane są obliczenia, które mają na celu określenie współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych i w konsekwencji weryfikację dokładności wybranych charakterystyk pomiarowych danego produktu [3,6].

Możliwymi do zmierzenia charakterystykami pomiarowymi pióra łopatkki przy pomocy współrzędnościowej techniki pomiarowej są m.in. [1]:

- maksymalna odchyłka profilu,
- długość cięciwy szkieletowej,
- kąt cięciwy szkieletowej,
- maksymalna długość,
- maksymalna grubość,
- grubość na zadanej odległości,
- promień krawędzi natarcia,
- promień krawędzi spływu.

Na dokładność pomiarów współrzędnościowych pióra łopatkki istotny wpływ ma m.in. przyjęta ich strategia. Elementami składowymi strategii pomiarów współrzędnościowych pióra łopatkki są m.in. [4–6,8]:

- metoda korekcji promieniowej (tj. korekcji promienia końcówki trzpienia głowicy pomiarowej),
- metoda rozmieszczenia punktów pomiarowych (rozmieszczenie mierzonych przekrojów poprzecznych pióra łopatki i rozkład punktów pomiarowych wzdłuż tych przekrojów),
- liczba punktów pomiarowych,
- prędkość pomiaru,
- metoda definiowania układu współrzędnych,
- okres czasu, w trakcie którego punkty pomiarowe są maskowane po rozpoczęciu i przed zakończeniem procesu skanowania mierzonej powierzchni,
- metoda dopasowania zmierzonych rzeczywistych danych pomiarowych do danych nominalnych.

W ramach niniejszego artykułu poddano analizie wpływ ostatniego ww. elementu strategii pomiarowej (tj. metody dopasowania) na wyniki pomiarów współrzędnościowych pióra łopatki. Celem tej analizy był wybór właściwej metody dopasowania podczas oceny dokładności wykonania pióra łopatki.

## 2. STANOWISKO POMIAROWE

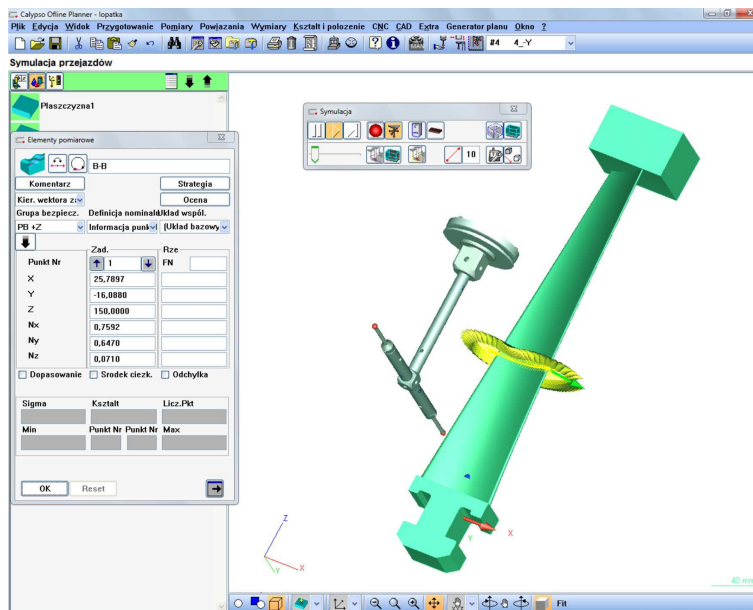
Pomiary współrzędnościowe pióra łopatki zostały przeprowadzone z użyciem współrzędnościowej maszyny pomiarowej (CMM) ACCURA II, wyposażonej w głowicę pomiarową VAST XT (rys. 1) oraz oprogramowania pomiarowe Calypso (rys. 2) i Blade Pro [1–2]. Zastosowana współrzędnościowa maszyna pomiarowa cechuje się następującymi parametrami dokładnościowymi [7]:

- $E_{L,MPE} = 1.6 + (L/333) \mu\text{m}$ ,
- $P_{FTU,MPE} = 1.7 \mu\text{m}$ ,
- $MPE_{Tij} = 2.5 \mu\text{m}$ ,
- $MPT_{Tij} = 50.0 \text{ s}$ .



Rys. 1. Współrzędnościowa maszyna pomiarowa ACCURA II i głowica pomiarowa VAST XT

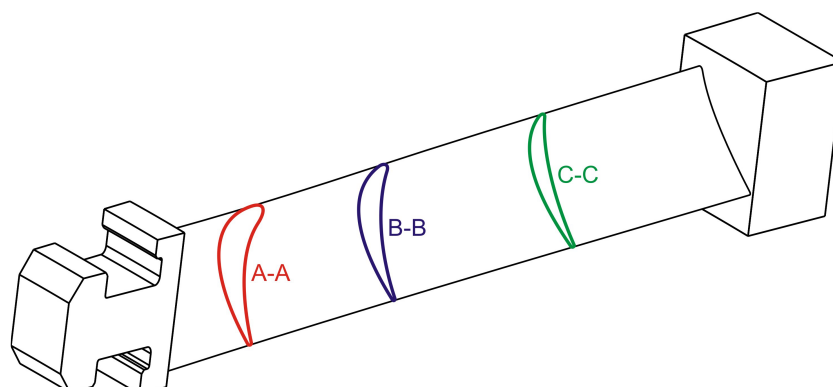
W ramach programu Blade Pro przeprowadzane są obliczenia, których celem jest wyznaczenie rzeczywistych wartości wybranych charakterystyk pomiarowych pióra łopaty. Obliczenia te są wykonywane z użyciem danych pomiarowych, które są wynikiem działania m.in. oprogramowania Calypso i mogą być realizowane zarówno w trybie on-line, jak i off-line. Wymiana danych między ww. programami pomiarowymi jest realizowana w sposób automatyczny za pomocą m.in. makra „łopátka turbiny”. Zarówno oprogramowanie pomiarowe Calypso, jak i Blade Pro należą do grupy programów tzw. komputerowego wspomaganie procesu pomiaru – CAI (ang. *computer aided inspection*). Programowanie poszczególnych zadań pomiarowych w trakcie pomiarów pióra łopaty, w ramach oprogramowania Calypso, może być realizowane na bazie danych nominalnych CAD (ang. *computer aided design*) (rys. 2), które mogą być wykorzystywane także do symulacji poszczególnych zadań pomiarowych. Symulacja ma na celu weryfikację programu pomiarowego pod kątem występowania ewentualnych kolizji i czasu wykonywania pomiaru współrzędnościowego [1–2].



Rys. 2. Symulacja pomiaru pióra łopaty w oprogramowaniu pomiarowym Calypso

### 3. WYNIKI POMIARÓW WSPÓLRZĘDNOŚCIOWYCH

Weryfikację dokładności wykonania pióra łopaty przeprowadzono na podstawie pomiarów krzywych swobodnych, które odpowiadały wybranym jej przekrojom poprzecznym (rys. 3). W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki pomiarów współrzędnościowych pióra łopaty dla trzech jej przekrojów (rys. 3, tab. 1–3).



Rys. 3. Wybrane mierzone przekroje pióra łopaty

W ramach oprogramowania pomiarowego Blade Pro są dostępne następujące metody dopasowania danych pomiarowych rzeczywistych do nominalnych [1]:

- Gaussa – **M1**,
- ważona Gaussa – **M2**,
- L1 – **M3**,
- ważona L1 – **M4**,
- Czebyszewa – **M5**.

Użytkownik CMM może zdefiniować zarówno główną, jak i drugorzędną metodę dopasowania. Ponadto operator współrzędnościowej maszyny pomiarowej może określić maksymalną liczbę iteracji, w trakcie których proces dopasowania jest przeprowadzany [1]. W ramach wykonanych badań doświadczalnych dokonywano zmian jedynie głównej metody dopasowania. Niezmienną, drugorzędną metodą dopasowania była metoda Gaussa. Maksymalna liczba iteracji wynosiła 20.

W celu pomiaru pióra łopatki w wybranym jej przekroju w oprogramowaniu pomiarowym Calypso zastosowano element pomiarowy typu *krzywa 3D*, który w odróżnieniu do elementu pomiarowego *krzywa 2D*, posiada nominalne wektory normalne do danej krzywej swobodnej nie należące do jednej płaszczyzny [2]. To powoduje, że zastosowanie *krzywej 3D* ma istotne znaczenie z punktu widzenia zapewnienia wysokiej dokładności pomiarowej pióra łopatki.

Każdą krzywą podzielono na dwa segmenty, które odpowiadały części wklęsłej i wypukłej pióra łopatki oraz fragmentom zarówno jej krawędzi natarcia, jak i spływu. Prędkość pomiarowa była równa 5 mm/s. Nominalne punkty pomiarowe zostały rozmieszczone wzdłuż wybranych przekrojów pióra łopatki na podstawie zmian wartości ich krzywizny. W związku z tym nominalne punkty pomiarowe zostały zagęszczone wzdłuż krawędzi natarcia i spływu, ponieważ te fragmenty pióra łopatki cechują się największą wartością krzywizny.

Tab. 1. Wyniki badań doświadczalnych dla przekroju **A–A** pióra łopatki

Charakterystyka pomiarowa	Metoda dopasowania					Rozrzut, mm
	M1, mm	M2, mm	M3, mm	M4, mm	M5, mm	
Maksymalna odchyłka profilu	0.215	0.258	0.400	0.258	0.226	<b>0.185</b>
Maksymalna odchyłka krawędzi spływu	0.207	0.227	0.310	0.227	0.225	<b>0.103</b>
Maksymalna odchyłka krawędzi natarcia	0.213	0.209	0.318	0.209	0.188	<b>0.130</b>
Długość cięciwy szkieletowej	65.458	65.473	65.548	65.473	65.457	<b>0.091</b>
Długość względem płaszczyzny odniesienia	66.470	66.470	66.468	66.470	66.470	<b>0.002</b>
Maksymalna długość	66.501	66.500	66.499	66.500	66.500	<b>0.002</b>
Maksymalna grubość	15.440	15.440	15.440	15.440	15.440	<b>0.000</b>
Grubość na zadanej odległości	3.931	3.931	3.931	3.931	3.931	<b>0.000</b>
Promień krawędzi natarcia	2.679	2.687	2.691	2.687	2.683	<b>0.012</b>
Promień krawędzi spływu	1.504	1.502	1.513	1.502	1.501	<b>0.012</b>
Przemieszczenie promieniowe	0.010	0.029	0.100	0.029	0.017	<b>0.090</b>

Tab. 2. Wyniki badań doświadczalnych dla przekroju **B–B** pióra łopatki

Charakterystyka pomiarowa	Metoda dopasowania					Rozrzut, mm
	M1, mm	M2, mm	M3, mm	M4, mm	M5, mm	
Maksymalna odchyłka profilu	0.218	0.262	0.400	0.262	0.219	<b>0.182</b>
Maksymalna odchyłka krawędzi spływu	0.209	0.224	0.324	0.224	0.225	<b>0.115</b>
Maksymalna odchyłka krawędzi natarcia	0.215	0.217	0.308	0.217	0.187	<b>0.121</b>
Długość cięciwy szkieletowej	62.847	62.861	62.933	62.861	62.840	<b>0.093</b>
Długość względem płaszczyzny odniesienia	63.253	63.256	63.249	63.256	63.256	<b>0.007</b>
Maksymalna długość	63.676	63.675	63.674	63.675	63.675	<b>0.002</b>
Maksymalna grubość	14.105	14.105	14.105	14.105	14.105	<b>0.000</b>
Grubość na zadanej odległości	3.576	3.576	3.576	3.576	3.576	<b>0.000</b>
Promień krawędzi natarcia	2.344	2.352	2.355	2.352	2.349	<b>0.011</b>
Promień krawędzi spływu	1.214	1.212	1.223	1.212	1.211	<b>0.012</b>
Przemieszczenie promieniowe	0.011	0.030	0.100	0.030	0.016	<b>0.089</b>



Tab. 3. Wyniki badań doświadczalnych dla przekroju C–C pióra łopatki

Charakterystyka pomiarowa	Metoda dopasowania					Rozrzut, mm
	M1, mm	M2, mm	M3, mm	M4, mm	M5, mm	
Maksymalna odchyłka profilu	0.218	0.261	0.400	0.261	0.222	<b>0.182</b>
Maksymalna odchyłka krawędzi spływu	0.206	0.222	0.314	0.222	0.224	<b>0.108</b>
Maksymalna odchyłka krawędzi natarcia	0.216	0.218	0.315	0.218	0.187	<b>0.128</b>
Długość cięciwy szkieletowej	61.972	61.986	62.058	61.986	61.966	<b>0.092</b>
Długość względem płaszczyzny odniesienia	61.987	61.994	61.983	61.994	61.991	<b>0.011</b>
Maksymalna długość	62.737	62.737	62.733	62.737	62.737	<b>0.004</b>
Maksymalna grubość	13.534	13.534	13.534	13.534	13.534	<b>0.000</b>
Grubość na zadanej odległości	3.421	3.421	3.421	3.421	3.421	<b>0.000</b>
Promień krawędzi natarcia	2.197	2.205	2.206	2.205	2.202	<b>0.009</b>
Promień krawędzi spływu	1.133	1.131	1.143	1.131	1.130	<b>0.013</b>
Przesunięcie promieniowe	0.011	0.029	0.100	0.029	0.016	<b>0.089</b>

## 4. PODSUMOWANIE

W ramach niniejszego artykułu zasygnalizowano istotność wpływu przyjętej strategii pomiarów współrzędnościowych na ich dokładność. Ponieważ strategia pomiarów współrzędnościowych zależy od szeregu składników, zatem użytkownik CMM musi dysponować szeroką wiedzą z zakresu metrologii wielkości geometrycznych w celu przygotowania programu pomiarowego, który będzie zapewniał najwyższą możliwą dokładność pomiarową.

Wyniki pomiarów współrzędnościowych pióra łopatki wskazują na duże rozrzuty wartości zmierzonych charakterystyk pomiarowych pióra łopatki dla rozpatrywanych metod dopasowania (**M1–M5**) i analizowanych przekrojów poprzecznych. Maksymalna wartość rozrzutu wynosi 0.185 mm (przekrój **A–A**). Duże wartości rozrzutów wskazują na konieczność starannego doboru odpowiedniej metody dopasowania podczas oceny parametrów geometrycznych pióra łopatki.

Największe wartości maksymalnych odchyłek profilu, krawędzi spływu i natarcia pióra łopatki uzyskano używając metodę dopasowania L1 (**M3**) dla wszystkich trzech analizowanych przekrojów pióra łopatki. W związku z tym właśnie metoda L1 (**M3**) powinna być stosowana w pierwszej kolejności podczas sprawdzania dokładności wykonania pióra łopatki.

## LITERATURA

- [1] Blade Pro. Carl Zeiss. *Dokumentacja programu*.
- [2] Calypso Curve. Carl Zeiss. *Dokumentacja programu*.
- [3] Jakubiec W., Malinowski J. *Metrologia wielkości geometrycznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2009.
- [4] Kawalec A., Magdziak M. *Lokalne metody obliczania krzywych offset*. *Pomiary Automatyka Kontrola*, **58**(1), 130-132, 2012.
- [5] Kawalec A., Magdziak M. *Metoda obliczania krzywej offset*. *Przegląd Mechaniczny*, **70**(7-8), 26-30, 2011.
- [6] Magdziak M. *Metoda pomiaru powierzchni swobodnych na obrabiarce sterowanej numerycznie*. Praca doktorska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, 2012.
- [7] PN-EN ISO 10360-2:2010 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Część 2: CMM stosowane do pomiaru wymiarów. *Norma*.
- [8] Woźniak A. *Dokładność stykowych głowic pomiarowych maszyn współrzędnościowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2010.