

Andrzej KAWALEC, Marek MAGDZIAK

POLITECHNIKA RZESZOWSKA, WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I LOTNICTWA, KATEDRA TECHNIK WYTWARZANIA I AUTOMATYZACJI,
ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

Analiza dokładności pomiarów współrzędnościowych pióra łopatki

Dr hab. inż. Andrzej KAWALEC

Pracownik naukowo-dydaktyczny Katedry Techniki Wytwarzania i Automatykacji Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Wcześniej zatrudniony przez 8 lat w przemyśle lotniczym. Zainteresowania naukowe dotyczą metod numerycznych, mechaniki ciał stałych, metod kształtowania metali lekkich, w szczególności stosowanych w technologiach lotniczych, konstruowania i wytwarzania napędów lotniczych, a także współrzędnościowej techniki pomiarowej.



e-mail: ak@prz.edu.pl

Dr inż. Marek MAGDZIAK

Adiunkt w Katedrze Techniki Wytwarzania i Automatykacji Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. W swojej pracy naukowo-dydaktycznej zajmuje się zagadnieniami związanymi z wykorzystaniem metod CAD/CAM/CAI w projektowaniu i wytwarzaniu produktów. Specjalizuje się we współrzędnościowej technice pomiarowej.



e-mail: marekm@prz.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono porównanie wyników pomiarów współrzędnościowych pióra łopatki turbiny, które uzyskano z użyciem trzech metod korekcji promieniowej. Analizę dokładności wykonania pióra łopatki przeprowadzono za pomocą programu pomiarowego *Blade Pro*. Pomiar współrzędnościowy pióra łopatki wykonano z użyciem współrzędnościowej maszyny pomiarowej *ACCURA II*, wyposażonej w głowicę pomiarową *VAST XXT* oraz oprogramowanie pomiarowe *Calypso*. Pierwsza metoda korekcji promieniowej była realizowana w oprogramowaniu *Blade Pro*. Druga i trzecia metody obliczania współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych bazowały na krzywych Béziera drugiego oraz czwartego stopnia.

Słowa kluczowe: współrzędnościowa technika pomiarowa, skorygowane punkty pomiarowe, korekcja promieniowa, pióro łopatki turbiny.

Analysis of the coordinate measurement accuracy of a turbine blade

Abstract

This paper presents the comparison of results of coordinate measurements concerning a turbine blade which were obtained using three methods of radius correction. Analysis of the manufacturing accuracy was made using the measurement program *Blade Pro*. The coordinate measurements of the turbine blade were made by applying a coordinate measuring machine *ACCURA II*, equipped with the measuring head *VAST XXT* and the measurement software *Calypso*. The first applied method for radius correction was the one already implemented in the software *Blade Pro*. The second and third methods for computing coordinates of the corrected measurement points were based on the second- and fourth-degree Bézier curves, respectively. These methods are developed for application in the case of coordinate measurements of free-form surfaces with relatively big magnitudes of curvature. The examples of such a kind of surfaces are leading and trailing edges of a turbine blade. Therefore, experimental and numerical investigations were verified on a real turbine blade and its 3D CAD model which represented the nominal data. The performed investigations show that the maximum dispersion of the measurement results takes place in the areas of the leading and trailing edges of the examined turbine blade. Selection of the proper radius correction method should always be considered in the measurement strategy using CMM.

Keywords: coordinate measurement technique, corrected measurement points, radius correction, turbine blade.

1. Wstęp

Analiza dokładności wykonania pióra łopatki turbiny może być wykonywana za pomocą oprogramowania pomiarowego *Blade Pro* [1]. Oprogramowanie to współpracuje z programem pomiarowym *Calypso* [2] oraz ze współrzędnościową maszyną pomiarową (CMM). Wymiana informacji między programami pomiarowymi *Calypso* i *Blade Pro* jest w pełni zautomatyzowana oraz odbywa się za pomocą makra *łopatka turbiny*, które jest dostępne w oprogramowaniu *Calypso*. Oba oprogramowania pomiarowe należą do grupy programów tzw. komputerowego wspomaganie

procesu pomiaru – CAI (ang. *computer aided inspection*). Programowanie poszczególnych zadań pomiarowych w trakcie pomiarów pióra łopatki, w ramach oprogramowania *Calypso*, może być realizowane z użyciem danych nominalnych CAD (ang. *computer aided design*) jako danych referencyjnych [3].

Obliczenia numeryczne w programie *Blade Pro* są przeprowadzane z uwzględnieniem danych pomiarowych, które są wynikami pomiarów współrzędnościowych. Do oprogramowania *Blade Pro* importowane są współrzędne zaobserwowanych punktów pomiarowych, które reprezentują środek końcówki trzpienia głowicy pomiarowej. Dodatkowo z programu *Calypso* do programu *Blade Pro* eksportowana jest wartość promienia końcówki trzpienia głowicy pomiarowej. Jest ona jednym z wyników procesu kwalifikacji danego trzpienia pomiarowego. Proces korekcji promieniowej jest realizowany bezpośrednio w programie *Blade Pro*. Użytkownik CMM nie ma możliwości wpływu na rodzaj stosowanej metody obliczania współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych w trakcie wykonywania obliczeń numerycznych w oprogramowaniu *Blade Pro*.

Chęć zastosowania innej, niż domyślnie dostępnej, metody obliczania współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych w programie *Blade Pro* wymaga edycji plików, które zawierają współrzędne zaobserwowanych punktów pomiarowych. Ponadto obliczenia numeryczne współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych muszą być w takim przypadku zrealizowane za pomocą zewnętrznych algorytmów obliczeniowych. To z kolei implikuje zmniejszenie automatyzacji analizy wyników pomiarów współrzędnościowych pióra łopatki turbiny w środowisku oprogramowania *Calypso-Blade Pro*.

W ramach niniejszego artykułu porównano wyniki pomiarów współrzędnościowych, które otrzymano z użyciem trzech metod korekcji promieniowej. Pierwsza z nich jest metodą, która jest dostępna w oprogramowaniu *Blade Pro* (oznaczenie **M1**). Z kolei dwie kolejne metody wykorzystują krzywe Béziera odpowiednio drugiego (**M2**) oraz czwartego stopnia (**M3**). Są to tzw. *lokalne metody korekcji promieniowej*. Metody te są dedykowane przede wszystkim w przypadku pomiarów współrzędnościowych powierzchni swobodnych, które charakteryzują się dużą wartością krzywizny [4–6]. Przykładem tego rodzaju powierzchni krzywoliniowych są krawędzie natarcia i spływu pióra łopatki.

Opracowane *lokalne metody korekcji promieniowej* działają w sposób iteracyjny. Na każdym etapie działania algorytmów tych metod krzywa interpolująca przebiega przez trzy lub pięć kolejnych sąsiednich zaobserwowanych punktów pomiarowych. Każdy krok iteracji odpowiada za obliczanie współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych zlokalizowanych wewnątrz danej grupy trzech lub pięciu punktów reprezentujących środek końcówki trzpienia głowicy pomiarowej [4–6].

Lokalne metody korekcji promieniowej zostały opracowane przede wszystkim z myślą o pomiarach realizowanych w trybie próbkowania punktowego. W związku z tym jednym z celów badań eksperymentalnych, które przeprowadzono w ramach niniejszego artykułu była chęć określenia ich przydatności w zakre-

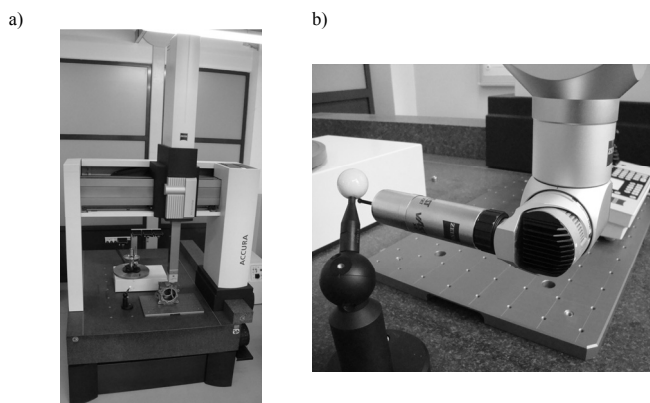
się pomiarów współrzędnościowych, które są wykonywane przez skaningowe głowice pomiarowe w trybie skanowania.

Wyniki porównania ww. *lokalnych metod korekcji promieniowej* z metodą obliczania współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych, która jest dostępna w oprogramowaniu *Calypso* zostały przedstawione w pracach [4–6]. Porównania tego dokonano na podstawie wyników pomiarów, które zrealizowano w trybie skanowania. Pomiary te przeprowadzono dla trzech wybranych teoretycznych powierzchni swobodnych.

W ramach niniejszego artykułu porównanie trzech metod korekcji promieniowej zostało przeprowadzone na przykładzie rzeczywistego wyrobu o złożonym kształcie geometrycznym, którym jest pióro łopatki turbiny.

2. Wyniki pomiarów współrzędnościowych

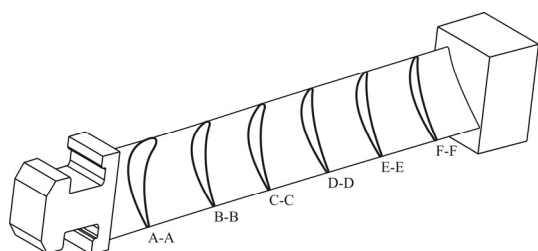
Pomiary współrzędnościowe pióra łopatki turbiny zostały wykonane z użyciem CMM *ACCURA II*. Współrzędnościowa maszyna pomiarowa była wyposażona w głowicę pomiarową *VAST XXT* (rys. 1). Pomiary pióra łopatki zostały wykonane w sześciu jej przekrojach poprzecznych (rys. 2).



Rys. 1. CMM *ACCURA II* (a) i głowica pomiarowa *VAST XXT* (b)
Fig. 1. CMM *ACCURA II* (a) and the measuring head *VAST XXT* (b)

Stanowisko pomiarowe charakteryzowało się następującymi parametrami dokładnościowymi [7–10]:

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



Rys. 2. Analizowane przekroje poprzeczne pióra łopatki turbiny
Fig. 2. The analyzed transverse sections of the turbine blade

Poszczególne przekroje pióra łopatki były mierzone z użyciem elementów pomiarowych typu *krzywa 2D*. Zastosowanie tego rodzaju elementu pomiarowego było wynikiem rodzaju porównywanych metod korekcji promieniowej. Lokalne metody obliczania współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych mogą być stosowane tylko w przypadku krzywych swobodnych, których wektory normalne w poszczególnych ich punktach leżą w jednej płaszczyźnie. W przypadku potrzeby wykonania dokładniejszych

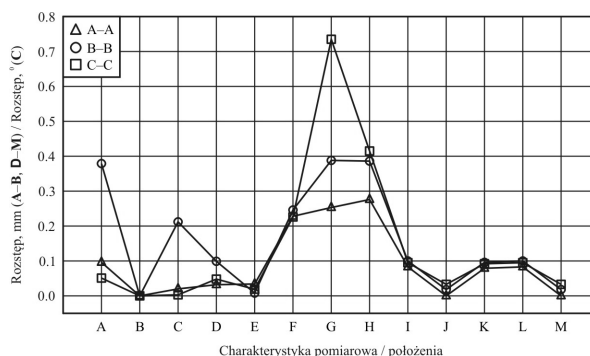
pomiarów współrzędnościowych pióra łopatki turbiny należy zastosować element pomiarowy typu *krzywa 3D*.

Porównania poszczególnych metod obliczania współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych dokonano z wykorzystaniem następujących charakterystyk pomiarowych oraz położenia pióra łopatki:

- długość cięciwy szkieletowej – oznaczenie **A**,
- długość linii szkieletowej – **B**,
- kąt cięciwy szkieletowej – **C**,
- maksymalna długość – **D**,
- maksymalna grubość – **E**,
- odchyłka kształtu wyznaczonego zarysu – **F**,
- promień krawędzi natarcia – **G**,
- promień krawędzi spływu – **H**,
- współrzędna X położenia (wynik dopasowania) – **I**,
- współrzędna Y położenia (wynik dopasowania) – **J**,
- przemieszczenie promieniowe (wynik dopasowania) – **K**,
- współrzędna X punktu środka profilu – **L**,
- współrzędna Y punktu środka profilu – **M**.

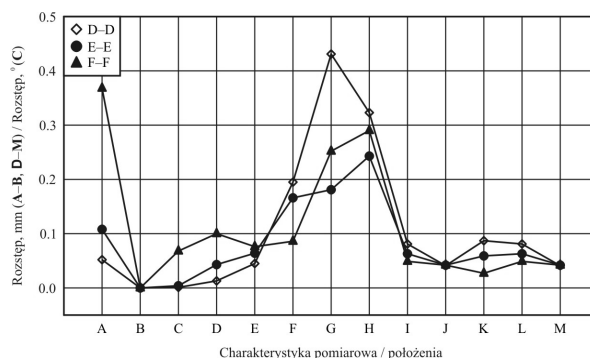
W trakcie wykonywania obliczeń numerycznych w oprogramowaniu pomiarowym *Blade Pro* dane rzeczywiste były dopasowywane do danych nominalnych pióra łopatki turbiny z użyciem metody *Gauss'a*. Była to główna metoda dopasowania. Użytkownik CMM może zdefiniować także drugorzędą metodę dopasowania. Ponadto zastosowano domyślne ustawienia oprogramowania *Blade Pro* w zakresie dokładności dopasowania i maksymalnej liczby iteracji, w trakcie których proces dopasowania jest przeprowadzany.

Na rysunkach 3 i 4 zaprezentowano wartości rozstępów wyników pomiarów współrzędnościowych, które uzyskano z użyciem trzech metod korekcji promieniowej dla wybranych przekrojów poprzecznych i charakterystyk pomiarowych oraz położenia pióra łopatki.



Rys. 3. Wartości rozstępów wyników obliczone dla charakterystyk **A–M** i trzech przekrojów **A-A**, **B-B**, **C-C**

Fig. 3. Dispersions of the results computed for the characteristics **A–M** and three sections **A-A**, **B-B**, **C-C**



Rys. 4. Wartości rozstępów wyników obliczone dla charakterystyk **A–M** i trzech przekrojów **D-D**, **E-E**, **F-F**

Fig. 4. Dispersions of the results computed for the characteristics **A–M** and three sections **D-D**, **E-E**, **F-F**

W tabelach 1–3 przedstawiono szczegółowe wyniki pomiarów współrzędnościowych rozpatrywanego pióra łopatkki, które uzyskano także z użyciem trzech ww. metod korekcji promieniowej (M1–M3) dla wybranych charakterystyk pomiarowych i położenia (A–M).

Tab. 1. Wyniki pomiarów współrzędnościowych dla charakterystyk A–D
Tab. 1. Results of coordinate measurements for characteristics A–D

Przekrój	Metoda korekcji promieniowej	Charakterystyka pomiarowa / położenia			
		A	B	C	D
A-A	M1	65.177	74.637	0.135	66.494
	M2	65.082	74.637	0.115	66.462
	M3	65.081	74.637	0.116	66.464
	Rozstęp	0.096	0.000	0.020	0.032
B-B	M1	61.705	69.737	7.747	62.649
	M2	61.987	69.737	7.935	62.641
	M3	61.608	69.737	7.723	62.550
	Rozstęp	0.379	0.000	0.212	0.099
C-C	M1	59.638	66.194	15.400	60.524
	M2	59.588	66.194	15.398	60.533
	M3	59.587	66.194	15.397	60.485
	Rozstęp	0.051	0.000	0.003	0.048
D-D	M1	58.611	63.766	22.842	59.385
	M2	58.559	63.766	22.843	59.398
	M3	58.559	63.766	22.843	59.393
	Rozstęp	0.052	0.000	0.001	0.013
E-E	M1	58.379	62.321	29.821	59.188
	M2	58.271	62.321	29.817	59.145
	M3	58.271	62.321	29.818	59.147
	Rozstęp	0.108	0.000	0.004	0.043
F-F	M1	59.292	61.833	36.413	59.605
	M2	59.269	61.833	36.425	59.575
	M3	58.924	61.833	36.357	59.505
	Rozstęp	0.368	0.000	0.068	0.100

Tab. 2. Wyniki pomiarów współrzędnościowych dla charakterystyk E–H
Tab. 2. Results of coordinate measurements for characteristics E–H

Przekrój	Metoda korekcji promieniowej	Charakterystyka pomiarowa / położenia			
		E	F	G	H
A-A	M1	15.566	0.148	0.956	0.507
	M2	15.599	0.371	0.764	0.254
	M3	15.600	0.376	0.703	0.231
	Rozstęp	0.034	0.228	0.253	0.276
B-B	M1	13.673	0.152	0.935	0.599
	M2	13.681	0.389	0.557	0.233
	M3	13.681	0.398	0.547	0.213
	Rozstęp	0.008	0.246	0.388	0.386
C-C	M1	11.760	0.172	1.314	0.709
	M2	11.741	0.392	0.714	0.314
	M3	11.741	0.398	0.579	0.294
	Rozstęp	0.019	0.226	0.735	0.415
D-D	M1	9.896	0.141	0.889	0.554
	M2	9.851	0.334	0.546	0.263
	M3	9.851	0.336	0.458	0.231
	Rozstęp	0.045	0.195	0.431	0.323
E-E	M1	8.225	0.124	0.581	0.466
	M2	8.161	0.288	0.420	0.236
	M3	8.161	0.290	0.400	0.223
	Rozstęp	0.064	0.166	0.181	0.243
F-F	M1	6.865	0.147	0.539	0.445
	M2	6.789	0.227	0.287	0.164
	M3	6.791	0.233	0.292	0.155
	Rozstęp	0.076	0.086	0.252	0.290

3. Wnioski

Wyniki wykonanych badań doświadczalnych wskazują na konieczność doboru właściwej metody obliczania współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych w celu uzyskania dokładnych wyników pomiarów współrzędnościowych. Wybór metody korekcji promieniowej powinien być elementem strategii pomiarów z użyciem CMMs.

Na podstawie rezultatów przeprowadzonych badań eksperymentalnych zaobserwowano znaczące wartości rozstępów wyników pomiarów współrzędnościowych (rys. 3 i 4), które uzyskano z użyciem trzech rozpatrywanych metod korekcji promieniowej

(M1–M3). Największe wartości rozstępów odnotowano w przypadku wartości promieni krawędzi natarcia (G) i splywu (H) pióra łopatkki. Mogą być one rezultatem zbyt intensywnej filtracji punktów pomiarowych po rozpoczęciu i przed zakończeniem procesu skanowania. Filtracja punktów pomiarowych jest konieczna z uwagi na potrzebę minimalizacji błędów nadmiernych, które wynikają z niestabilnej pracy skaningowej głowicy pomiarowej VAST XXT.

W przeważającej ilości przypadków zastosowanie dwóch metod korekcji promieniowej M2 i M3, które bazują na krzywych Béziera, prowadzi do uzyskania zbliżonych wyników pomiarów współrzędnościowych pióra łopatkki turbiny (tab. 1–3).

Tab. 3. Wyniki pomiarów współrzędnościowych dla charakterystyk I–M
Tab. 3. Results of coordinate measurements for characteristics I–M

Przekrój	Metoda korekcji promieniowej	Charakterystyka pomiarowa / położenia				
		I	J	K	L	M
A-A	M1	-0.014	-0.011	0.018	-0.014	-0.011
	M2	-0.096	-0.011	0.097	-0.096	-0.011
	M3	-0.097	-0.011	0.097	-0.097	-0.011
	Rozstęp	0.083	0.000	0.079	0.083	0.000
B-B	M1	-0.021	-0.014	0.025	-0.021	-0.014
	M2	-0.116	0.003	0.116	-0.116	0.003
	M3	-0.121	0.004	0.121	-0.121	0.004
	Rozstęp	0.100	0.018	0.096	0.100	0.018
C-C	M1	-0.032	-0.018	0.036	-0.032	-0.018
	M2	-0.124	0.014	0.125	-0.124	0.014
	M3	-0.127	0.015	0.128	-0.127	0.015
	Rozstęp	0.095	0.033	0.092	0.095	0.033
D-D	M1	-0.023	-0.002	0.023	-0.023	-0.002
	M2	-0.103	0.039	0.110	-0.103	0.039
	M3	-0.104	0.039	0.110	-0.104	0.039
	Rozstęp	0.081	0.041	0.087	0.081	0.041
E-E	M1	0.008	0.037	0.037	0.008	0.037
	M2	-0.055	0.079	0.096	-0.055	0.079
	M3	-0.055	0.079	0.096	-0.055	0.079
	Rozstęp	0.063	0.042	0.059	0.063	0.042
F-F	M1	0.072	0.157	0.173	0.072	0.157
	M2	0.025	0.197	0.199	0.025	0.197
	M3	0.023	0.199	0.200	0.023	0.199
	Rozstęp	0.049	0.042	0.027	0.049	0.042

4. Literatura

- [1] Blade Pro. Carl Zeiss. Dokumentacja programu.
- [2] Calypso. Carl Zeiss. Dokumentacja programu.
- [3] Kawalec A., Magdziak M.: Wpływ metody dopasowania na wyniki pomiarów pióra łopatkki. *Mechanik*, 86(2), CD, 2013.
- [4] Kawalec A., Magdziak M.: Lokalna metoda obliczania krzywej offset. XIV Krajowa, V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Metrologia w Technikach Wytwarzania, Politechnika Warszawska, Warszawa-Pułtusk, 12-14 września, 181-186, 2011.
- [5] Kawalec A., Magdziak M.: Lokalne metody obliczania krzywych offset. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 58(1), 130-133, 2012.
- [6] Magdziak M.: Metoda pomiaru powierzchni swobodnych na obrabiarce sterowanej numerycznie. Praca doktorska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska, 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.
- [8] PN-EN ISO 10360-4:2002 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Część 4: CMM stosowane w trybie pomiaru skaningowego.
- [9] PN-EN ISO 10360-4:2002/AC – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Część 4: CMM stosowane w trybie pomiaru skaningowego.
- [10] PN-EN ISO 10360-5:2010 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Część 4: CMM z zespołem głowic pomiarowych stykowych jedno i wielotrząpieniowych.