

dr hab. inż. Jan BUREK, prof. PRz

jburek@prz.edu.pl

Politechnika Rzeszowska

mgr inż. Michał GDULA

gdulam@prz.edu.pl

Politechnika Rzeszowska

mgr inż. Jacek MISIURA

jmisiura@prz.edu.pl

Politechnika Rzeszowska

mgr inż. Marcin PŁODZIEN

plodzien@prz.edu.pl

Politechnika Rzeszowska

mgr inż. Jarosław BUK

jbuk@prz.edu.pl

Politechnika Rzeszowska

WPŁYW KROKU LINIOWEGO ŚCIEŻKI NARZĘDZIA W OBRÓBCE PIĘCIOOSIOWEJ NA DOKŁADNOŚĆ WYKONANIA PIÓRA ŁOPATKI

Streszczenie: Celem artykułu było określenie wpływu kroku liniowego (*cut step*) pięcioosiowej ścieżki narzędziowej na dokładność wykonania pióra łopatki. Modele łopatek oraz program ich obróbki zostały wykonane z zastosowaniem oprogramowania NX 9.0. Symultaniczne pięcioosiowe frezowanie wykończeniowe zaprogramowano z dwiema różnymi wartościami kroku liniowego odpowiednio: 0.1 mm oraz 80 mm. Tolerancję generowania ścieżek przyjęto jako stałą o wartości 0.1 mm. Modele łopatek wykonano na pięcioosiowym centrum obróbkowym DMU 100 MonoBLOCK firmy DMG. Pomiar i ocenę dokładności przeprowadzono w warunkach symulacyjnych w środowisku CAD/CAM systemu NX 9.0 oraz w warunkach rzeczywistych przy użyciu współrzędnościowej maszyny pomiarowej (CMM) ACCURA II firmy ZEISS.

Słowa kluczowe: symultaniczne 5-osiowe frezowanie, krok liniowy, ścieżka narzędzia, dokładność, łopatka

INFLUENCE OF CUT STEP TOOL PATH IN FIVE AXIS MACHINING ON THE ACCURACY OF THE TURBINE BLADE

Summary: The aim of this study was to determine the influence of cut step five axis tool path on the accuracy of the turbine blade. Models of the blades and their machining program were made using the NX 9.0 system. Simultaneous 5-axis milling programmed with two different values of the cut step, respectively 0.1 mm and 80 mm. Tolerance to generate tool paths adopted as a constant value of 0.1 mm. Blades models were manufactured by 5-axis machining center DMU 100 MonoBLOCK DMG. Measurement and assessment of accuracy manufacturing analysis was made by NX 9.0 CAD/CAM system and coordinate measuring machine (CMM) ACCURA II ZEISS.

Keywords: simultaneous five axis machining, cut step, tool path, accuracy, turbine blade

1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój obrabiarek sterowanych numerycznie, a szczególnie wieloosiowych centrów obróbkowych, oraz nowoczesne technologie wytwarzania powodują to, iż wykonanie części o złożonej geometrii nie jest problemem tak skomplikowanym jak kilkanaście, czy też nawet kilka lat temu. Ten trend widoczny jest także w informatycznym

postępie zaawansowanych systemów CAD/CAM, które umożliwiają zamodelowanie dowolnie skomplikowanej geometrii części, zaprogramowanie jej obróbki oraz wykonanie niezbędnych analiz dokładnościowych już na etapie weryfikacji i symulacji. Ubytkowe techniki wytwarzania, w połączeniu z oprogramowaniem CAD/CAM/CAE stają się obecnie niezbędnym działem przemysłu lotniczego, energetycznego jak i maszynowego, pozwalającym kształtować dowolne geometrie opisane powierzchniami złożonymi.

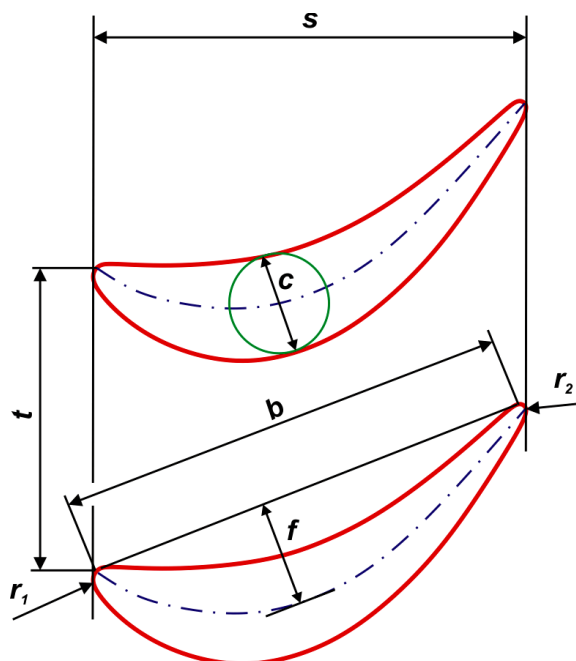
Postęp nowoczesnych technik wytwarzania niesie ze sobą także zwiększenie dokładności wykonania modeli 3D, jakimi w przeważającej większości opisywane są obecnie wytwarzane części. Biorąc ten aspekt pod uwagę niezbędnym jest bardzo staranne opracowanie modelu 3D w odpowiedniej tolerancji, pozbawionego nieciągłości jak również błędów geometrii. Jest to zagadnienie szczególnie istotne ze względu na poprawność programowania torów ruchu narzędzi.

Programowanie ścieżek, zwłaszcza pięcioosiowych, także wymaga zdefiniowania szeregu istotnych parametrów. Najważniejsze z nich to pasmo tolerancji generowania toru ruchu oraz krok liniowy (*cut step*), od których bezpośrednio zależy dokładność wykonania skomplikowanych geometrycznie części, takich jak np. pióro łopatki.

2. PARAMETRY KONSTRUKCYJNE PROFILU ŁOPATKI

W gorących częściach przepływowych maszyn wirnikowych za przemianę energii czynnika roboczego odpowiedzialny jest układ stopnia turbiny, który składa się z wieńców łopatkowych kierownicy oraz wirnika. Przemiany energetyczne na określonym stopniu turbiny uwarunkowane są kinematyką danego stopnia, zależną od charakterystycznych parametrów konstrukcyjnych poszczególnych łopatek (rys. 2.1). W przypadku łopatek turbin należą do nich:

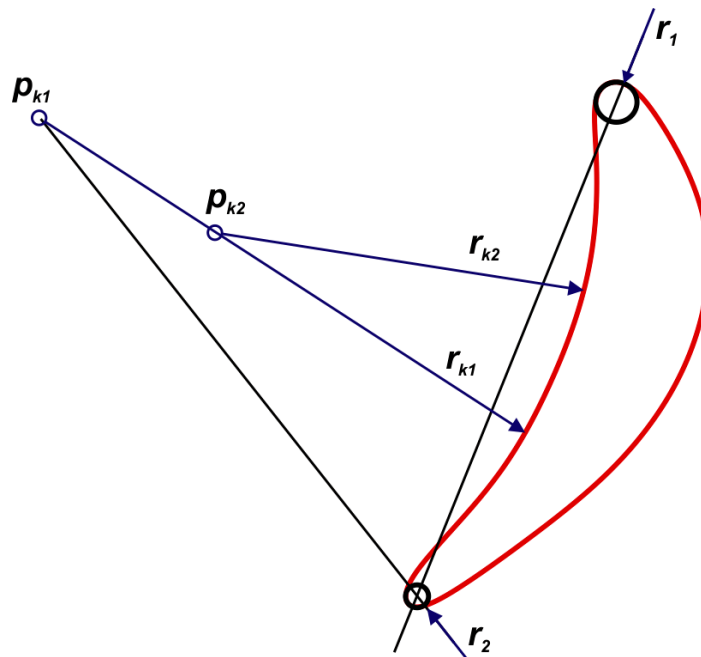
- b – cięciwa pióra łopatki,
- t – podziałka palisady wirnika turbiny,
- f – wypukłość linii szkieletowej,
- c – grubość profilu pióra łopatki,
- s – szerokość palisady,
- r_1 – promień zaokrąglenia krawędzi natarcia,
- r_2 – promień zaokrąglenia krawędzi spływu.



Rys. 2.1. Charakterystyczne parametry profilu łopatki turbiny [2, 4]

Projektowanie oraz wytwarzanie łopatek turbin silników lotniczych czy też energetycznych oparte jest obecnie na systemach komputerowego wspomaganie prac inżynierskich. Na początkowym etapie opracowywania konstrukcji i technologii wytwarzania łopatek wykonuje się model 3D-CAD, który stosowany jest na kolejnych etapach procesu wytwórczego, w tym także kontroli dokładności wykonania [2].

W zależności od rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych wirnik stanowi może zwarty element lub tworzyć zespół składający się z tarczy, w której montowane są łopatki. Podstawowe wymiary łopatek wirnika turbiny określane są na drodze obliczeń gazodynamicznych, które pozwalają również założyć wielkości opisujące profile w poszczególnych przekrojach łopatki. Zarys profilu łopatki, w zależności od jego typu można kreślić różnymi sposobami. Jeden z nich polega na opisaniu krzywych tworzących profil łopatki w postaci promieni okręgów czy parabol. Konstrukcja profilu turbinowego w tym przypadku może być realizowana przez geometryczne kształtowanie krzywizny wklęsłej łukami o określonych promieniach (rys. 2.2), natomiast krzywizna wypukła może być kształtowana parabolą. W przypadku, gdy wymagane jest uzyskanie mniejszej grubości profilu, to wypukłą tworzącą profil opisuje się łukami o odpowiednio dobranych promieniach [4].



Rys. 2.2. Konstrukcja profilu łopatki za pomocą promieni [2, 4]

Wyznaczenie profili w poszczególnych przekrojach stanowi podstawę do wykonania całej geometrii pióra łopatki w systemie 3D-CAD [1], która w końcowym etapie jako nominal postłuży do określenia profili przekrojów w celu oceny dokładności łopatki po symultanicznej obróbce pięcioosiowej.

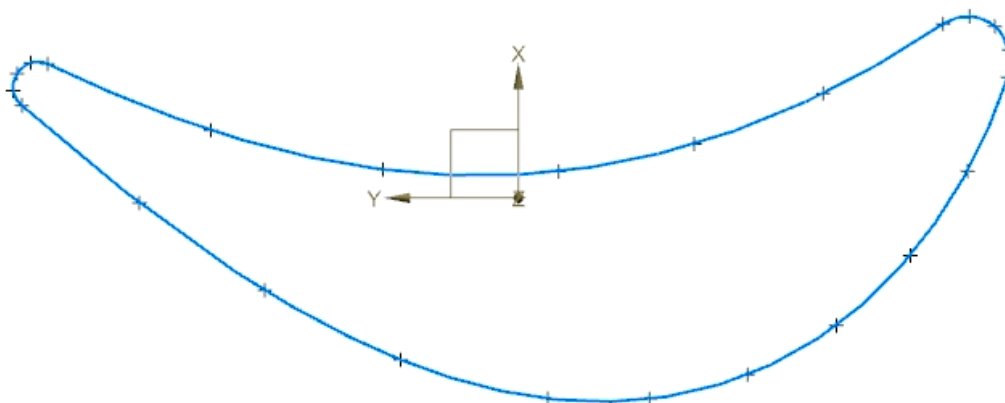
3. MODELOWANIE 3D-CAD BADAWCZEGO PIÓRA ŁOPATKI

Przedstawione w powyższym rozdziale parametry konstrukcyjne postłużą do opracowania konstrukcji profili, które utworzą pióro łopatki po rozpięciu na nich powierzchni. Modelowanie całej geometrii łopatki, programowanie operacji jej obróbki oraz niezbędne analizy są obecnie realizowane z zastosowaniem zaawansowanych systemów CAD/CAM/CAE. Należy do nich m.in. oprogramowanie NX firmy SIEMENS w najnowszej wersji 9.0.

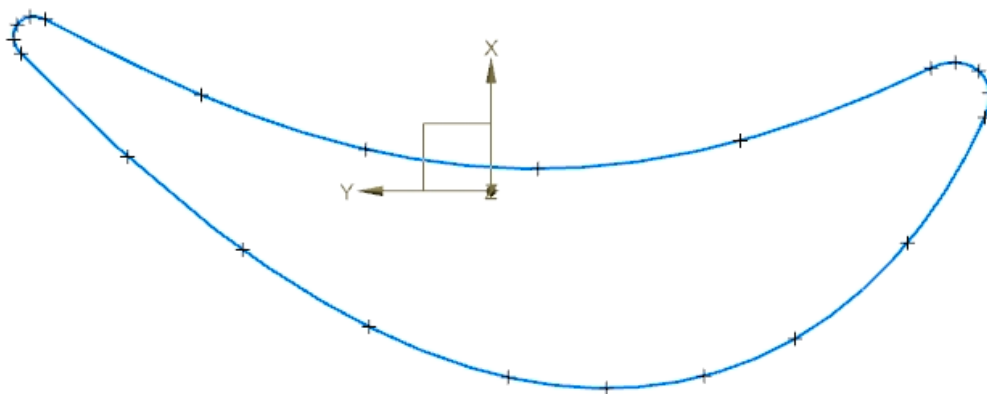
Modelowanie 3D-CAD łopatki jest procesem złożonym z wielu części, m.in. operacji modelowania powierzchniowego, bryłowego czy też ich kombinacji, czyli modelowania hybrydowego. Ponadto przy modelowaniu skomplikowanych geometrycznie części istnieje potrzeba przeprowadzenia dodatkowych wizualizacji oraz symulacji, takich jak np. wykresów grzebieniowych profili, gładkości powierzchni itp. Większość operacji w modelowaniu CAD opartych jest na modelach 3D, które reprezentowane są przez zbiory licznych parametrów określających przede wszystkim ich kształt oraz wymiary. Z uwagi na to, iż systemy CAD są w przeważającej większości parametryczne, umożliwiają tym samym wprowadzanie często wymuszonych modyfikacji wcześniej zdefiniowanych parametrów, a także poprawy więzów geometrycznych między elementami konstrukcyjnymi budowanej geometrii [1].

Geometria trójwymiarowa modelu łopatki w systemie CAD jest numerycznym reprezentantem gotowego wyrobu. Model wyrobu w takiej konfiguracji jest także podstawą do wykonania prototypów badawczych jak i gotowych wyrobów oraz daje możliwość prowadzenia analiz geometrycznych z zastosowaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej [2, 3].

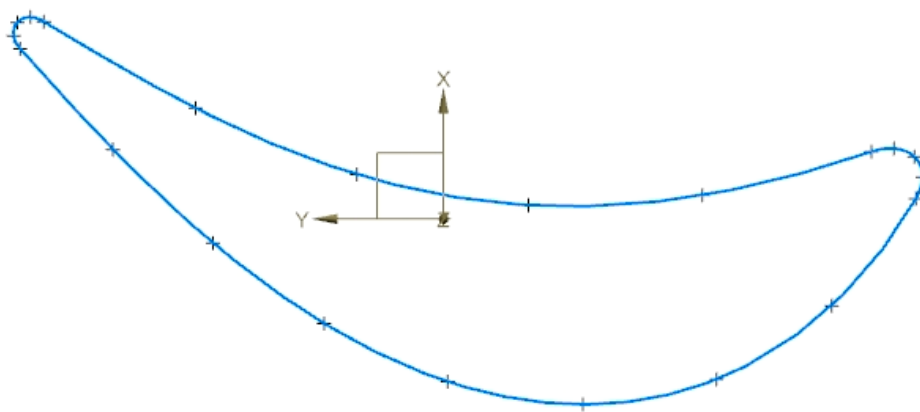
Powierzchnię pióra łopatki modeluje się zazwyczaj jedną z trzech metod: na podstawie zadanych punktów profili, za pomocą łączenia powierzchni składowych czy z zastosowaniem krzywych prowadzących [1]. Powyższe metody opierają się na określeniu punktów w przestrzeni w zadanych przez konstruktora płaszczyznach przekroju. Z tego też względu konieczne jest założenie na całej wysokości pióra łopatki szeregu równoległych do siebie płaszczyzn, na których będą kreślone szkice zarysu krzywizny profili pióra łopatki. Na rys. 3.1÷3.3 przedstawiono profile wybranych przekrojów pióra łopatki, na których rozpięto powierzchnie i otrzymano badawczy model – nominal – pióra.



Rys. 3.1. Profil pierwszego przekroju pióra łopatki turbiny

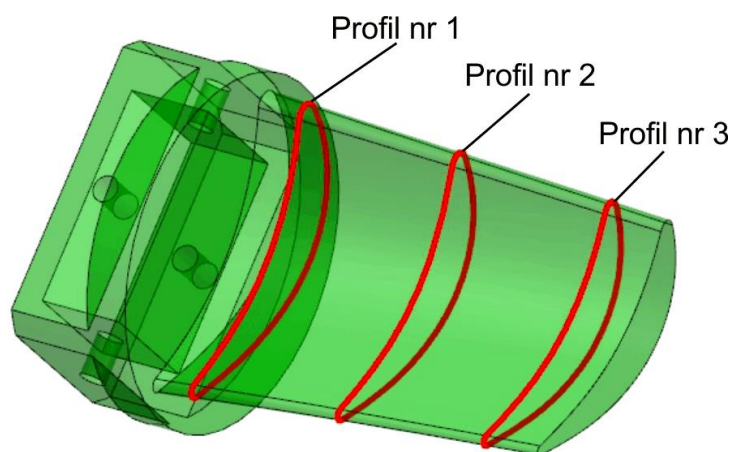


Rys. 3.2. Profil drugiego przekroju pióra łopatki turbiny



Rys. 3.3. Profil trzeciego przekroju pióra łopatki turbiny

W celu zapewnienia właściwej pracy łopatek turbin maszyn przepływowych bardzo istotne jest zachowanie gładkości powierzchni modelowanej oraz krzywizny łopatki. Jest to także ważne z uwagi na kolejny etap programowania ścieżek narzędziowych symultanicznej obróbki pięcioosiowej dla obrabiarek CNC, gdyż niejako dopasowują się one do geometrii modelu. Końcowym rezultatem jest gotowy badawczy model pióra łopatki wraz z zamodelowanymi pozostałymi elementami (rys. 3.4).



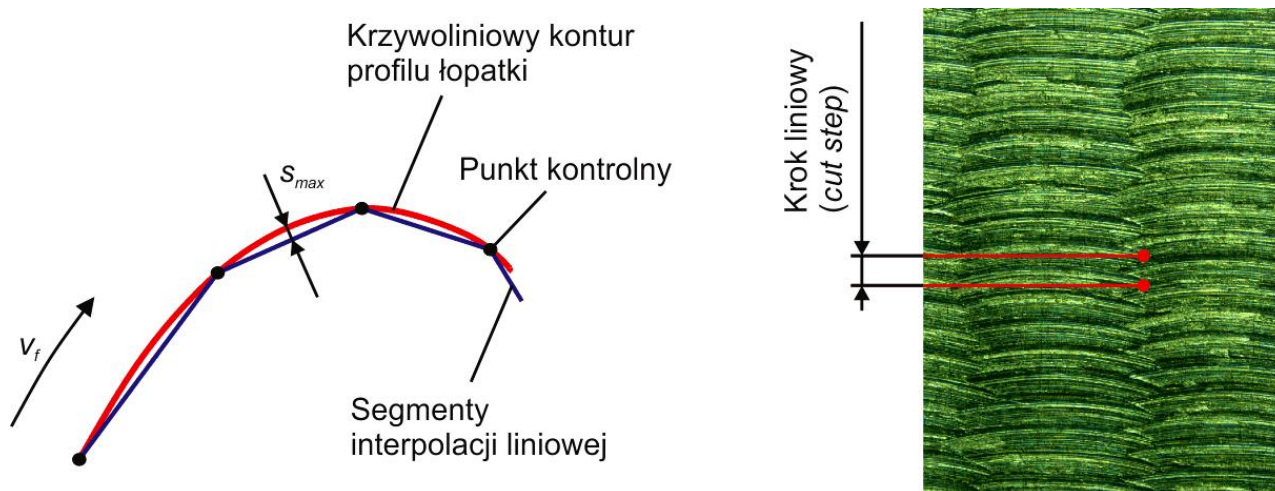
Rys. 3.4. Gotowy badawczy model 3D łopatki turbiny

Tworząc pióro łopatki stosuje się krzywe typu *Spline*, *B-Spline* oraz powierzchnie typu *NURBS*, a samo modelowanie 3D w systemie CAD/CAM/CAE NX 9.0, jak i innych, jest najdokładniejszą możliwą metodą budowania numerycznej geometrii części. Dokładność liniowa profili badawczego modelu łopatki wynosi $0,001\text{ mm}$, natomiast dokładność kątowa 0.5° . Ciągłość modelowanej powierzchni zdefiniowano na poziomie wartości G^2 .

4. PARAMETRY CAM PIĘCIOOSIOWEJ ŚCIEŻKI NARZĘDZIOWEJ

Symultaniczne frezowanie pięcioosiowe jest niezwykle złożonym procesem. Biorąc pod uwagę skomplikowaną kinematykę procesu, na końcowy efekt obróbki powierzchni krzywoliniowych wpływa wiele aspektów. Jednymi z nich są definiowane na etapie programowania parametry CAM pięcioosiowych ścieżek narzędziowych takie jak, pasmo tolerancji oraz przede wszystkim krok liniowy (*cut step*). Parametr ten ma zasadnicze znaczenie w obróbce pięcioosiowej, gdyż określając jego wartość kontroluje się odległość liniową między punktami tworzącymi ścieżkę narzędzia. Krok liniowy mierzony jest wzdłuż kierunku posuwu trajektorii ruchu narzędzia. Definiując wartość kroku liniowego definiuje

się tym samym warunki interpolacji liniowej w zadanym paśmie tolerancji, krzywoliniowych segmentów profili łopatek (rys. 4.1). Wpływa to między innymi na jakość powierzchni obrabianej pióra łopatek. Zmniejszenie odchyłki s_{max} między ścieżką narzędzia a obrabianym profilem krzywoliniowym w celu lepszego ich dopasowania wiąże się ze zwiększeniem ilości punktów kontrolnych ścieżki narzędziowej i tym samym wielkości programu NC. Ponadto szybkość obliczeniowa układu sterowania obrabiarki ogranicza liczbę realnie przetwarzanych bloków NC w jednostce czasu.



Rys. 4.1. Wpływ kroku liniowego (*cut step*) na jakość powierzchni krzywoliniowej [5]

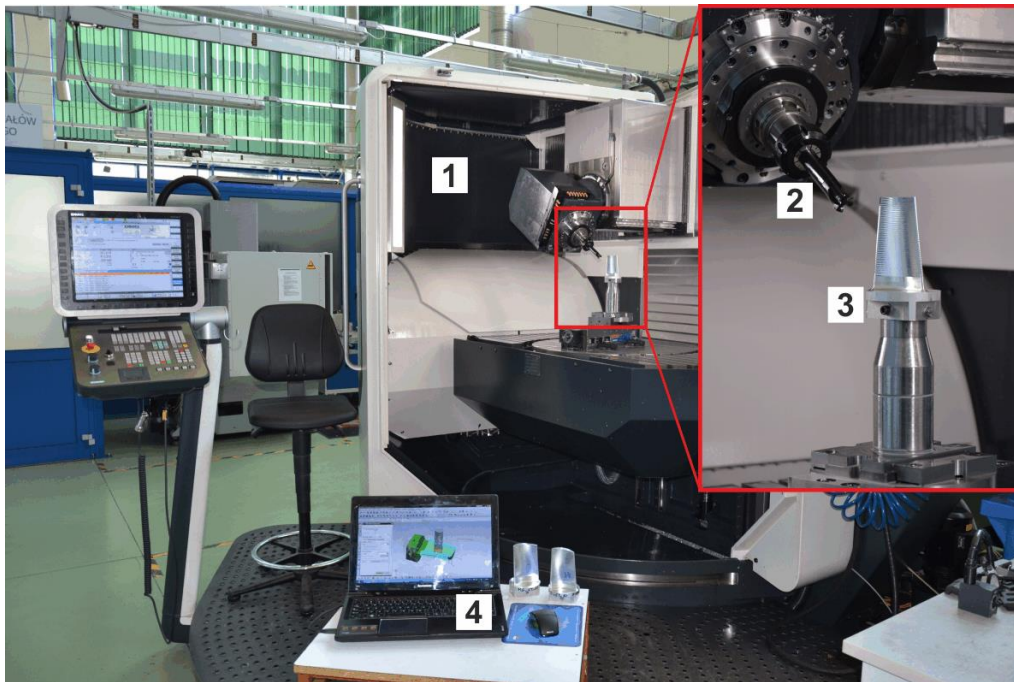
Błąd wprowadzany przez krok liniowy wykrywany jest najczęściej na podstawie pomiaru i analizy parametrów jakości powierzchni (rys. 4.1 – po prawej). Nie dokonano do tej pory oceny wpływu wartości kroku liniowego na dokładność geometryczną wykonania powierzchni krzywoliniowych w obróbce pięcioosiowej takich elementów jak np. łopatek turbin [5].

5. PIĘCIOOSIOWA OBRÓBKA BADAWCZYCH MODELI ŁOPATEK

Proces symultanicznego pięcioosiowego frezowania dwóch badawczych modeli łopatek przeprowadzono na wieloosiowym centrum frezarskim DMU 100 MonoBLOCK firmy DMG ze sterowaniem SINUMERIK 840D SL, będącym na wyposażeniu Katedry Technik Wytwarzania i Autmatyzacji na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej (rys. 5.1). Warunki obróbki pięcioosiowej były następujące:

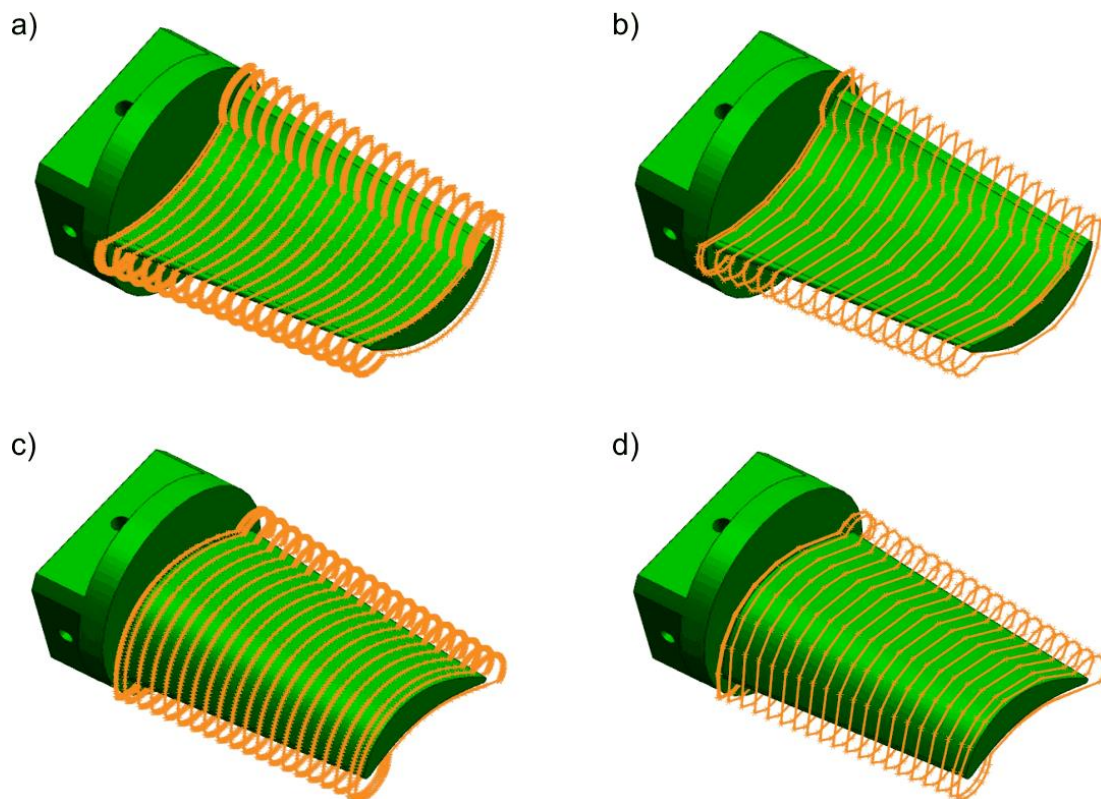
- frez toroidalny R300–025A20L–08M firmy Sandvik Coromant,
- materiał obrabiany – stop aluminium AW–2017A,
- posuw na ostrze $f_z=0.04$ mm/ostrz.,
- szerokość skrawania $a_e=2$ mm,
- prędkość skrawania $v_c=800$ m/min,
- wzór ścieżki: *Helical/Spiral*,
- kąt prowadzenia (*Lead angle*) $\alpha=12^\circ$,
- założone pasmo tolerancji generowania ścieżek: ± 0.1 mm.

W celu dokonania oceny wpływu kroku liniowego pięcioosiowej ścieżki narzędziowej na dokładność wykonania pióra łopatek, założono odpowiednio dla pierwszego modelu badawczego łopatek wartość *cut step* – 0.1 mm, oraz dla drugiego modelu badawczego *cut step* – 80 mm. Operację symultanicznej wykończeniowej pięcioosiowej obróbki zaprogramowano wykorzystując polecenie *Variable Streamline* z metodą prowadzenia (*Drive Method*) *Streamline* oraz wektorem projekcji (*Projection Vector*) *Normal to Drive*.



Rys. 5.1. Stanowisko pięcioosiowej obróbki powierzchni złożonych: 1 – wieloosiowe centrum obróbkowe 100 DMU MonoBLOCK, 2 – frez toroidalny, 3 – badawczy model łopatki, 4 – komputer z oprogramowaniem CAD/CAM/CAE NX 9.0

Podgląd punktów kontrolnych oraz segmentów trajektorii ruchu narzędzia dla obu zaprogramowanych przypadków pokazano na rys. 5.2.

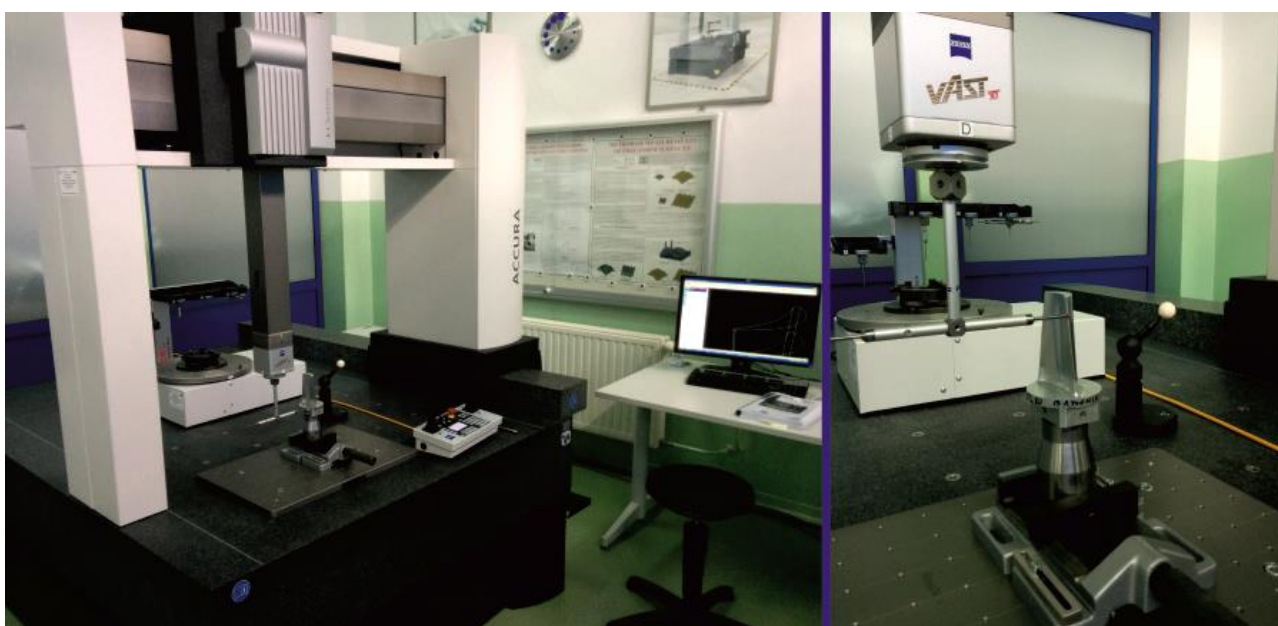


Rys. 5.2. Punkty kontrolne oraz segmenty ścieżki narzędzia dla kroku liniowego: a) i c) o wartości $0,1\text{ mm}$, oraz b) i d) o wartości 80 mm

W trakcie realizacji procesu symultanicznego pięcioosiowego frezowania wykończeniowego pióra łopatkki, zarówno pierwszego jak i drugiego modelu badawczego, nie używano funkcji zaawansowanych (*Advanced Surface*): G645 odpowiedzialnej za włączenie trybu wygładzania ścieżki między blokami liniowymi, COMPCAD umożliwiającej łączenie krótkich bloków liniowych używając wielomianów, FFWON aktywującej parametryczne sterowanie wyprzedzające prędkości jak i posuwu.

6. POMIAR DOKŁADNOŚCI ŁOPATEK Z ZASTOSOWANIEM WMP

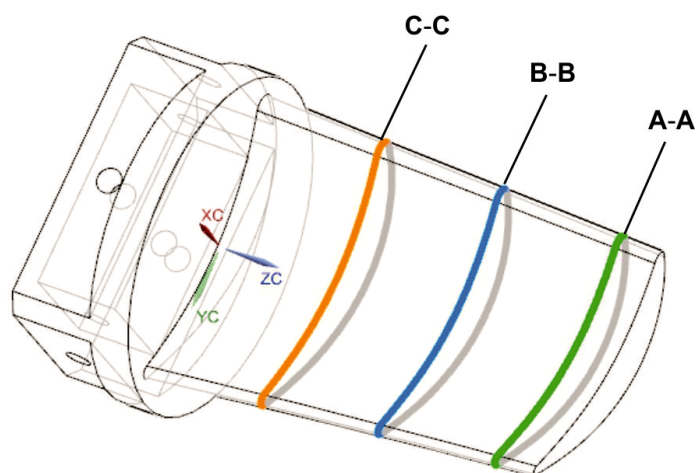
Pomiary współrzędnościowe odchyłki profilu w trzech wybranych przekrojach pióra łopatkki przeprowadzono z użyciem współrzędnościowej maszyny pomiarowej (CMM) ACCURA II firmy ZEISS będącej na wyposażeniu Katedry Techniki Wytwarzania i Automatyzacji Politechniki Rzeszowskiej, wyposażonej w głowicę pomiarową VAST XT (rys. 6.1) oraz oprogramowanie pomiarowe CALYPSO, które należy do grupy programów komputerowego wspomaganie procesu pomiaru – CAI (*Computer Aided Inspection*).



Rys. 6.1. Współrzędnościowa maszyna pomiarowa ACCURA II ZEISS

Programowanie poszczególnych zadań pomiarowych w trakcie pomiarów łopatek, w ramach oprogramowania CALYPSO, było realizowane na bazie danych nominalnych modelu 3D-CAD pióra łopatkki, które wykorzystano także do symulacji poszczególnych zadań pomiarowych.

Pomiar dokładności wykonania badawczych modeli łopatek przeprowadzono na podstawie pomiarów krzywych, które odpowiadały wybranym przekrojom pióra (rys. 6.2). W celu pomiaru piór badawczych modeli łopatek w wybranych przekrojach w oprogramowaniu Calypso zastosowano element pomiarowy typu *krzywa 2D*. Każdą krzywą przekroju pióra podzielono na dwa segmenty, które odpowiadały części wklęsłej oraz wypukłej wraz z fragmentami krawędzi natarcia i splywu łopatkki. Prędkość pomiarowa była równa 3 mm/s. Nominalne punkty pomiarowe rozmieszczono wzdłuż wybranych przekrojów na podstawie zmiany ich krzywizny. Punkty bardziej zagęszczono na krawędziach natarcia i splywu pióra łopatkki, gdyż fragmenty te cechują się największą wartością krzywizny. Wyniki badań doświadczalnych zestawiono w tab. 6.1-6.3. Raporty dla przekroju B-B z przeprowadzonych badań zobrazowano na rys. 6.3., natomiast na rys. 6.4. przybliżenia uzyskanych powierzchni w tym przekroju po obróbce pięcioosiowej.



Rys. 6.2. Wybrane krzywe pomiarowe pióra łopatki

Tab. 6.1. Wyniki badań doświadczalnych dla przekroju A-A pióra łopatki

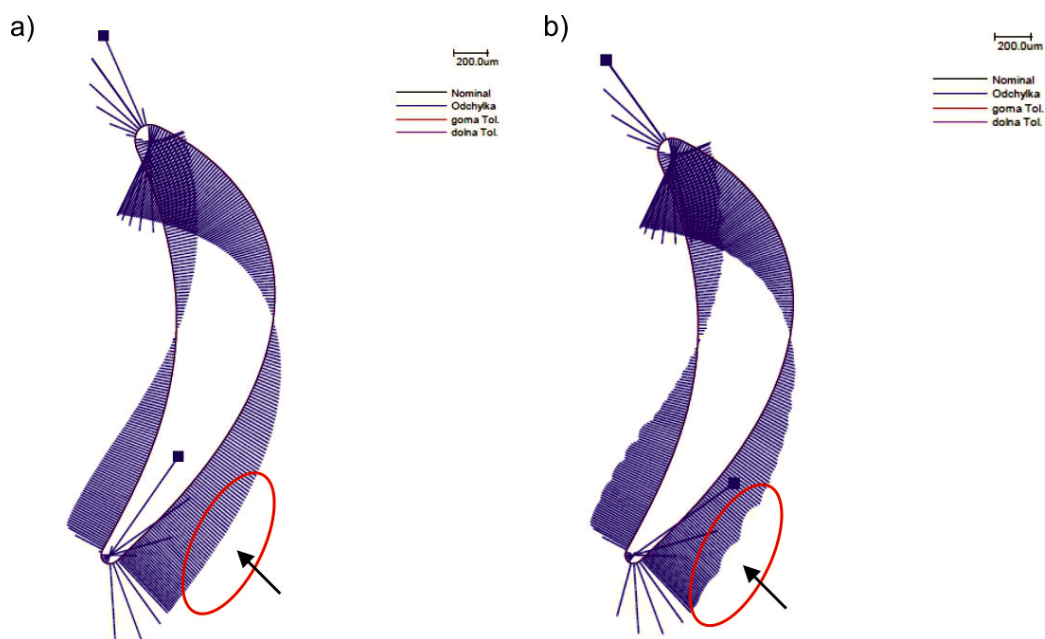
Lp.	Cut step, mm	Odchyłka kształtu, mm	Odchyłka min., mm	Odchyłka max., mm	Rozrzut, mm
1.	0.1	1,209	-0,619	0,590	0,217
2.	80	1,393	-0,733	0,659	0,238

Tab. 6.2. Wyniki badań doświadczalnych dla przekroju B-B pióra łopatki

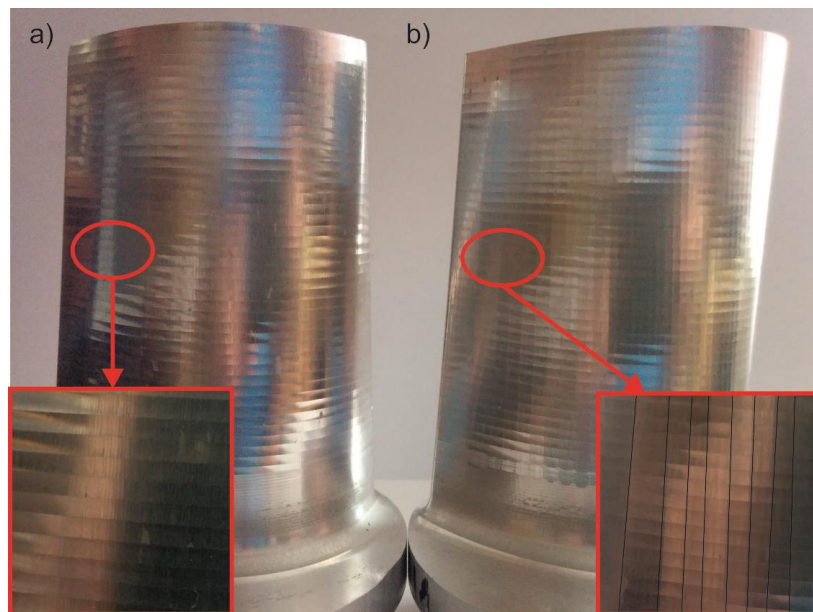
Lp.	Cut step, mm	Odchyłka kształtu, mm	Odchyłka min., mm	Odchyłka max., mm	Rozrzut, mm
1.	0.1	1,258	-0,720	0,538	0,267
2.	80	1,323	-0,750	0,573	0,290

Tab. 6.3. Wyniki badań doświadczalnych dla przekroju C-C pióra łopatki

Lp.	Cut step, mm	Odchyłka kształtu, mm	Odchyłka min., mm	Odchyłka max., mm	Rozrzut, mm
1.	0.1	1,267	-0,590	0,677	0,229
2.	80	1,528	-0,729	0,798	0,251



Rys. 6.3. Raport pomiaru dla przekroju B-B, a) cut step 0.1 mm, b) cut step 80 mm



Rys. 6.4. Uzyskane powierzchnie po obróbce pięcioosiowej: a) *cut step* 0.1 mm, brak widocznych segmentów ścieżki, b) *cut step* 80 mm, widoczne segmenty ścieżki

7. WNIOSKI

Uzyskane wyniki pomiarów współrzędnościowych piór badawczych modeli łopatek wskazują, iż dla analizowanych przekrojów poprzecznych, krok liniowy pięcioosiowej ścieżki narzędziowej wpływa na dokładność ich wykonania. Duże wartości rozrzutów wskazują na konieczność bardziej starannego doboru metody dopasowania podczas oceny parametrów geometrycznych pióra łopatki.

Badane przekroje profili oraz obraz powierzchni po obróbce pięcioosiowej dla wartości kroku liniowego 0.1 mm, charakteryzują się dużo lepszym rezultatem pod względem oceny dokładności aniżeli dla wartości *cut step* 80 mm. Potwierdzają to raporty z pomiarów współrzędnościowych jak i wizualna ocena uzyskanych powierzchni krzywoliniowych badawczych modeli łopatek. W związku z tym, należy stosować możliwie duże zagęszczenie punktów kontrolnych ścieżki narzędziowej w obróbce pięcioosiowej poprzez definiowanie małych wartości kroku liniowego podczas programowania CAM obróbki.

LITERATURA

- [1] Cygnar M., Budzik G., *Wybrane aspekty projektowania elementów wirujących maszyn przepływowych z wykorzystaniem wspomaganie komputerowego*. Wydawnictwo PWSZ w Nowym Sączu, PWSZ, Nowy Sącz, 2005
- [2] Budzik G., *Dokładność geometryczna łopatek turbin silników lotniczych*. OWPRz, Rzeszów, 2013
- [3] Kawalec A. Magdziak M., *Wpływ metody dopasowania na wyniki pomiarów pióra łopatki*. XI Forum Inżynierskie ProCAX, część II, Kraków, 16-18 października 2012
- [4] Orkisz M., *Wybrane zagadnienia z teorii turbinowych silników odrzutowych*. WiZPITE, Radom, 1995
- [5] Potthast A., Oder B., *Spline-Interpolation für die fünfachsigte Fräsbearbeitung*. Zwf 85 (1990) 8

Badania realizowane w ramach Projektu "Badania procesów wysokowydajnej obróbki powierzchni złożonych części z materiałów trudnoobrabialnych", Nr WND-EPPK.01.03.00-18-017/13 współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007 – 2013.