

Dr hab. inż. Jan BUREK prof. Prz.  
[jburek@prz.edu.pl](mailto:jburek@prz.edu.pl)  
Politechnika Rzeszowska

Dr inż. Łukasz ŻYŁKA  
[zylka@prz.edu.pl](mailto:zylka@prz.edu.pl)  
Politechnika Rzeszowska

Mgr inż. Piotr ŻUREK  
[p\\_zurek@prz.edu.pl](mailto:p_zurek@prz.edu.pl)  
Politechnika Rzeszowska

Mgr inż. Michał GDULA  
[gdulam@prz.edu.pl](mailto:gdulam@prz.edu.pl)  
Politechnika Rzeszowska

Mgr inż. Jacek MISUIRA  
[jmisiura@prz.edu.pl](mailto:jmisiura@prz.edu.pl)  
Politechnika Rzeszowska

Mgr inż. Karol ŻURAWSKI  
[zurawski@prz.edu.pl](mailto:zurawski@prz.edu.pl)  
Politechnika Rzeszowska

## WYKONANIE PIÓRA ŁOPATKI NA PODSTAWIE MODELU UZYSKANEGO W WYNIKU POMIARÓW WSPÓŁRZĘDNOŚCIOWYCH

**Streszczenie:** Artykuł opisuje metodykę rekonstrukcji pióra w oparciu o pomiary współrzędnościowe. Opisane zostały pomiary, modelowanie i programowanie obróbki. Do przygotowania strategii pomiarowej posłużył system CALYPSO, natomiast modelowanie i program obróbkowy powstał w systemie NX 9.0. Zaprezentowane zostały błędy które powstają na różnych etapach rekonstrukcji.

**Słowa kluczowe:** obróbka pięcioosiowa, Siemens NX 9.0

## BLADES PRODUCTION ON THE BASIS OF THE MODEL MADE AS A RESULT OF COORDINATE MEASUREMENTS.

**Summary:** The article describes the methodology of blade reconstruction on the basis of coordinate measurements. Measurements, modelling and milling programming were described. To prepare measurement strategy a CALYPSO system was used, whereas modelling and milling program was created in NX 9.0. system. Mistakes that occur during different stages of reconstruction were presented.

**Keywords:** multi axis milling, Siemens NX 9.0

### 1. WSTĘP

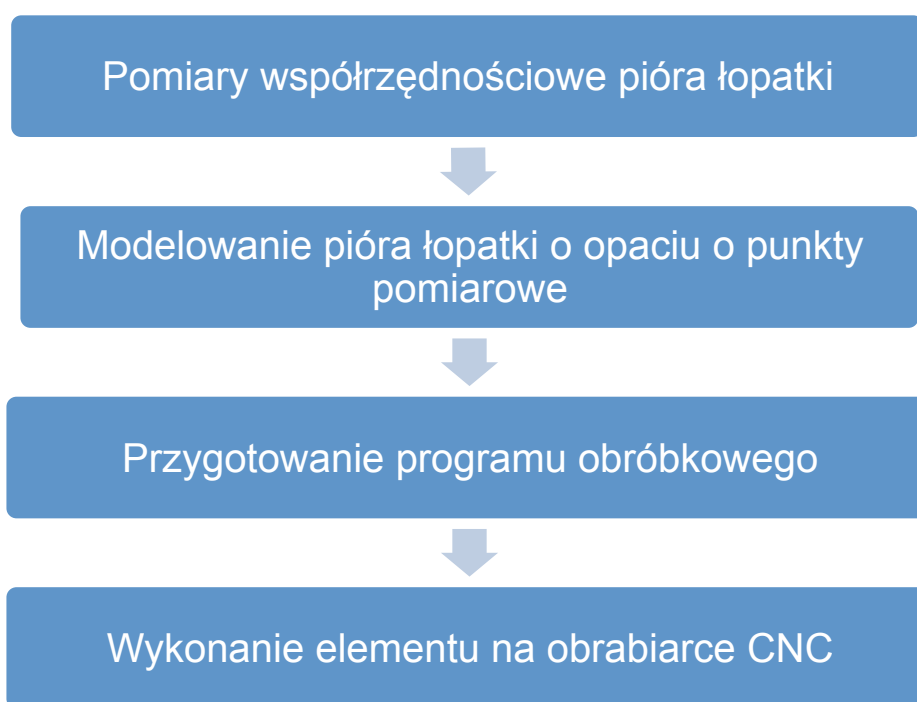
W ostatnich latach obserwuje się bardzo dynamiczny rozwój systemów CAx oraz coraz szersze zastosowanie ich w różnych gałęziach przemysłu. Narzędzia tego typu są

używane na przekroju całego procesu produkcyjnego. Na każdym jego etapie odgrywają istotną rolę. W oparciu o modele CAD przygotowuje się dokumentację 2D, prowadzi analizy oraz programuje obrabiarki numeryczne, jak i współrzędnościowe maszyny pomiarowe.

Problem pojawia się jednak w przypadku, kiedy nie dysponujemy modelem 3D ani dokumentacją techniczną na podstawie której moglibyśmy go stworzyć, a jedynie rzeczywistym elementem. Aby móc wykonać kopie takiego elementu na obrabiarce CNC lub przeprowadzić jego analizy wytrzymałościowe koniecznym jest stworzenie na jego podstawie modelu 3D CAD.

Tego typu sytuacja może mieć miejsce kiedy z różnych przyczyn odcinany jest dostęp do części zamiennych. Brak poszczególnych elementów eksploatacyjnych może spowodować wyłączenie urządzenia z eksploatacji. W maszynach przepływowych po odpowiednich resursach następuje wymiana łopatek, dlatego zaopatrzenie w tego typu elementy jest niezbędne przez cały okres eksploatacji.

W artykule przedstawiono metodykę rekonstrukcji pióra łopatki na podstawie pomiarów współrzędnościowych. Badana była dokładność kopii przy zachowaniu prawidłowej geometrii powierzchni. Poniżej zaprezentowano etapy rekonstrukcji (Rys.1.1).



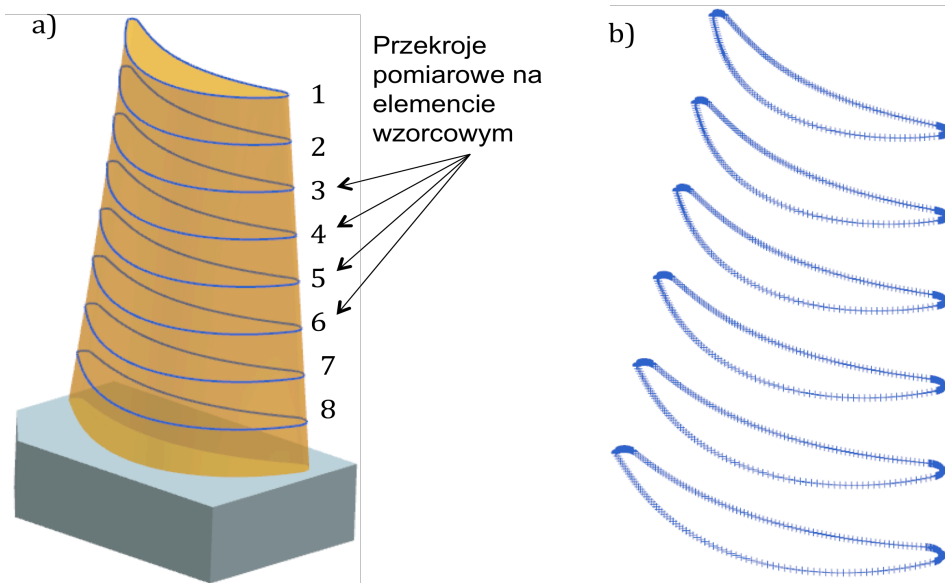
Rys.1.1 Etapy rekonstrukcji

## 2. POMIARY WSPÓLRZĘDNOŚCIOWE

Pierwszym etapem rekonstrukcji był pomiar współrzędnościowy. Pomiar poprzez digitalizację pióra łopatki wykonano z użyciem współrzędnościowej maszyny pomiarowej ACCURA II, wyposażonej w głowicę pomiarową VAST XT gold oraz oprogramowanie pomiarowe Calypso ver. 5.0.20.

Digitalizacja jest procesem pomiarowym polegającym na przetworzeniu rzeczywistego elementu w jego obraz cyfrowy zapisany w postaci trójwymiarowej, pozwalającej na uzyskanie współrzędnych (x, y, z) powierzchni rzeczywistego elementu w kartezjańskim układzie współrzędnych [2].

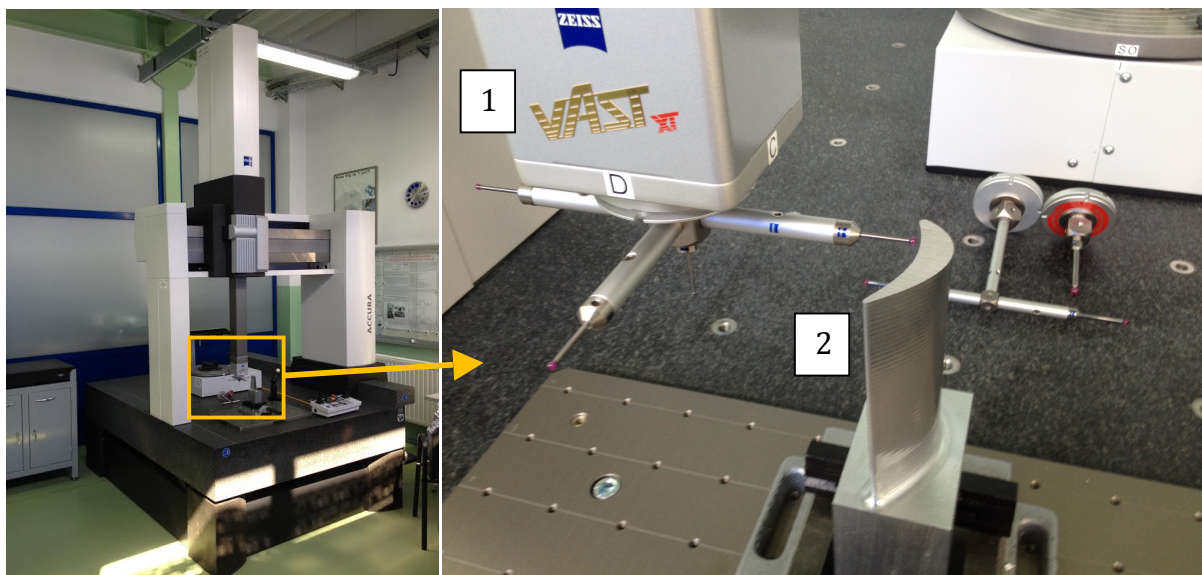
Pióro łopatkki zostało podzielone na 8 przekroi (Rys. 2.1) równo rozmieszczonych wzdłuż osi Z wyznaczonego układu współrzędnych. Każdy z przekrojów pióra łopatkki był mierzony czterema elementami pomiarowymi typu krzywa 2D. Z otrzymanych pomiarów krzywych został utworzony jeden wspólny element krzywa 2D. W taki sam sposób zostały zmierzone pozostałe przekroje. W utworzonych elementach krzywa 2D zostały przeprowadzone korekcje promieniowe, oraz zostały skorygowane wektory normalne tak aby ich punkty leżały w jednej płaszczyźnie [2].



Rys. 2.1 a) Przekroje rozłożone na piórze b) Rozkład punktów pomiarowych na przekrojach (zagęszczenie na krawędziach splywu i natarcia)

Tabela 2.1 Parametry pomiaru

Parametry pomiaru			
średnica kulki pomiarowej	4 mm	wielkość kroku	1 mm
prędkość pomiaru	3mm/s	odległość cięciwy	0,1 mm,

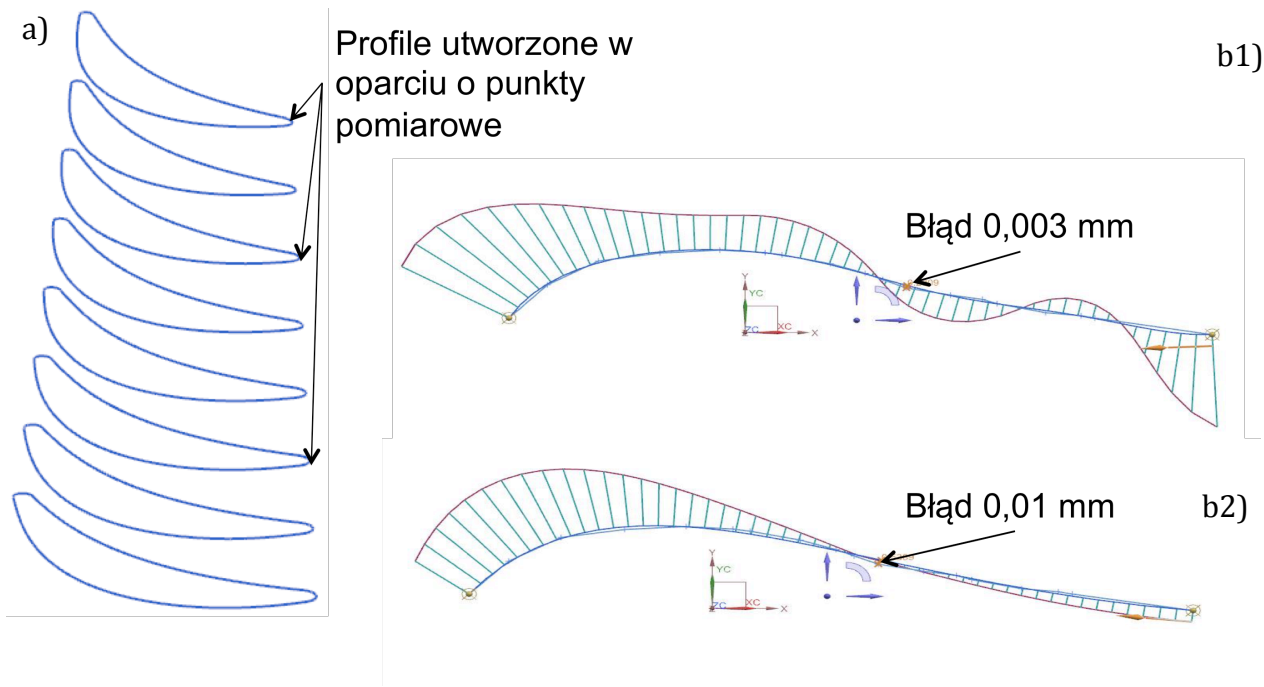


Rys. 2.1 Maszyna pomiarowa CARL ZEISS ACCURA II: 1) Głowica pomiarowa 2) Pióro referencyjne

### 3. MODELOWANIE

Modelowanie to jeden z kluczowych etapów. Wszystkie błędy na etapie modelu są bardzo trudne do zniwelowania w dalszej części rekonstrukcji. Dokładność modelowania w systemie NX wynosiła 0,001 mm.

Model pióra łopaty oparty jest o punkty charakterystyczne, tworzące przekroje powstałe w wyniku pomiarów współrzędnościowych. Lista punktów została zaimportowana do systemu z pliku utworzonego w programie CALYPSO.



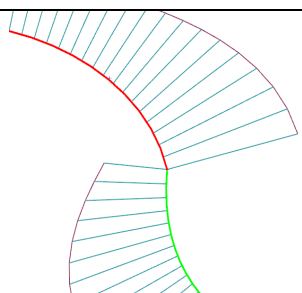
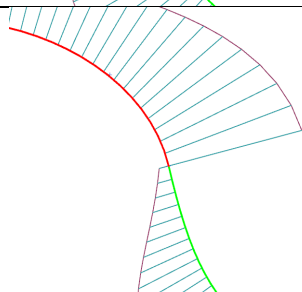
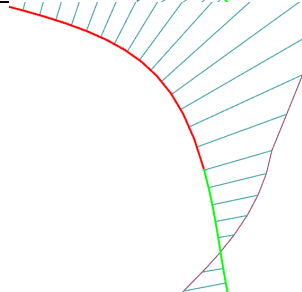
Rys. 3.1 a) Profile utworzone na podstawie punktów pomiarowych b) Wykresy wartości krzywizn na krzywej niewygładzonej(1) oraz wygładzonej(2)

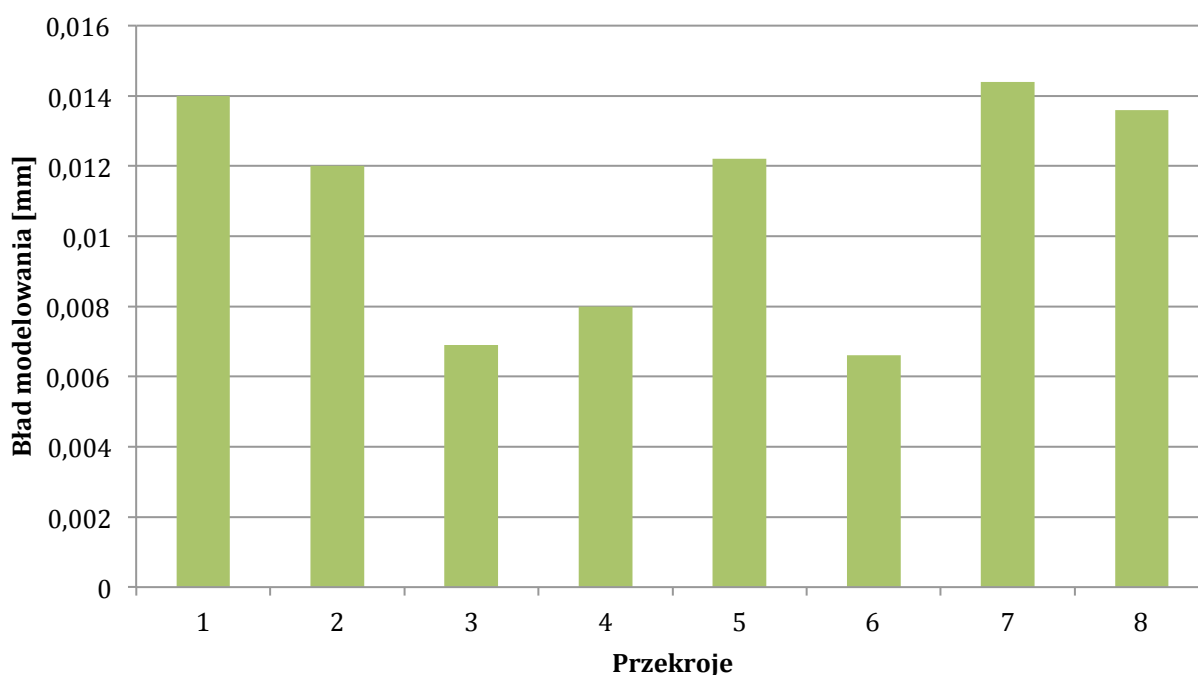
Na punktach utworzono krzywe typu spline (Rys3.1.a). Każdy profil składał się z czterech elementów tego typu połączonych z zachowaniem ciągłości. Oddzielnie były modelowane krawędzie natarcia spływu oraz górna i dolna część profilu. Do stworzenia krzywych aproksymowanych w oparciu o zaimportowane punkty wykorzystano polecenie **FIT SPLINE**. W tym przypadku po zaznaczeniu punktów system generuje krzywą o określonej liczbie segmentów, która jest najlepiej dopasowana. W celu zapewnienia odpowiedniej gładkości modyfikowano ilość segmentów oraz stopnie krzywych. Istotnym elementem był błąd powstający wskutek uproszczenia. Aby rezultat modelowania był akceptowalny należy zachować kompromis między gładkością (mała ilość przegięć) a błędami dopasowania (Rys 3.1b). Na rys. 3.2. przedstawiono maksymalne odchyłki na poszczególnych profilach. Wynosiły one około 0,01 mm. Wyznacznikiem gładkości była analiza krzywizn [3][4].

Istotnym elementem podczas modelowania profilu było zachowanie ciągłości między segmentami. Jest to sposób połączenia krzywych ze sobą. W tabeli 1 zawarte są wykresy krzywizn normalnych przy zachowaniu danej ciągłości oraz jej opis [4].



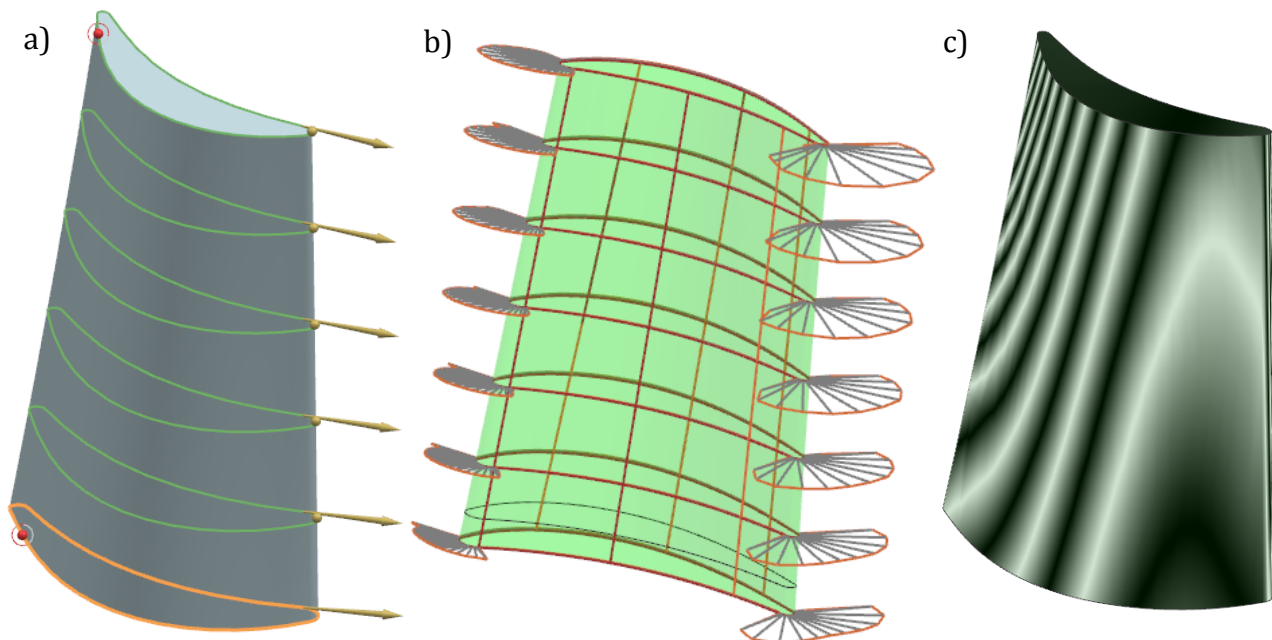
Tabela. 3.1 Opis ciągłości geometrycznych

Rodzaj ciągłości	Wykres krzywizn	Opis
G0		<ul style="list-style-type: none"> <li>-poszczególne segmenty krzywej posiadają punkty wspólne,</li> <li>-poszczególne segmenty powierzchni posiadają wspólne krawędzie,</li> </ul>
G1		<ul style="list-style-type: none"> <li>-poszczególne segmenty krzywej spełniają warunek ciągłości G0 oraz są wzajemnie styczne w wspólnych punktach,</li> <li>-poszczególne segmenty powierzchni spełniają warunek ciągłości G0 oraz są wzajemnie styczne w każdym punkcie wspólnych krawędzi</li> </ul>
G2		<ul style="list-style-type: none"> <li>-poszczególne segmenty krzywej spełniają warunek ciągłości G0 i G1 oraz posiadają taki sam promień krzywizny w wspólnych punktach,</li> <li>-poszczególne segmenty powierzchni spełniają warunek ciągłości G0 i G1 oraz posiadają taki sam promień krzywizny w każdym punkcie wspólnych krawędzi</li> </ul>



Rys. 3.2 Maksymalny błąd powstały w wyniku modelowania

Po przygotowaniu profili następnym krokiem jest utworzenie powierzchni pióra łopatk. W tym celu wykorzystane zostało polecenie **CURVE MESH** (Rys. 3.3a). Ważnym aspektem jest sprawdzenie utworzonej geometrii przy pomocy analizy refleksów korzystając z funkcji **REFLECTION**. Polecenie to nakłada na model teksturę symulującą odbicie się promieni światła na powierzchni. Uwypukla to wszelkie ewentualne załamania które dyskwalifikowałyby model. Na rysunku 3.3c widać jak prążki rozchodzą się płynnie po powierzchni, a przejścia są gładkie więc model można uznać za prawidłowy. Inną metodą weryfikacji jakości powierzchni jest wizualizacja krzywizn krzywych izoparametrycznych (rys. 3.3b). Podobnie jak w przypadku profili nie jest wskazana duża ilość przegięć oraz wymagane jest zachowanie ciągłości. W przypadku kiedy nie zaobserwowano żadnych anomalii model można uznać za prawidłowy i przystąpić do wykonania gotowej części [4][6].

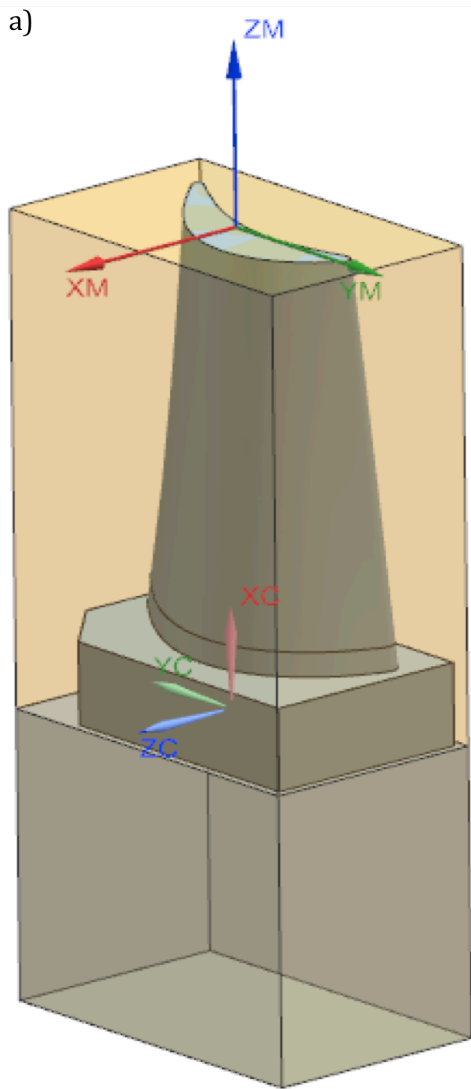


Rys.3.3 a) Pióro utworzone na podstawie profili pomiarowych b) analiza krzywizn  
c) analiza refleksów

## 4. OBRÓBKA

Następnym krokiem rekonstrukcji było wykonanie kopii łopatk referencyjnej na pięcioosiowym centrum obróbkowym. Maszyny tego typu najczęściej programuje się automatycznie. Ścieżki obróbkowe generowane są na podstawie modelu CAD. Dzięki odtworzeniu geometrii pióra łopatk w poprzednim etapie, możliwe było wygenerowanie programu obróbkowego.

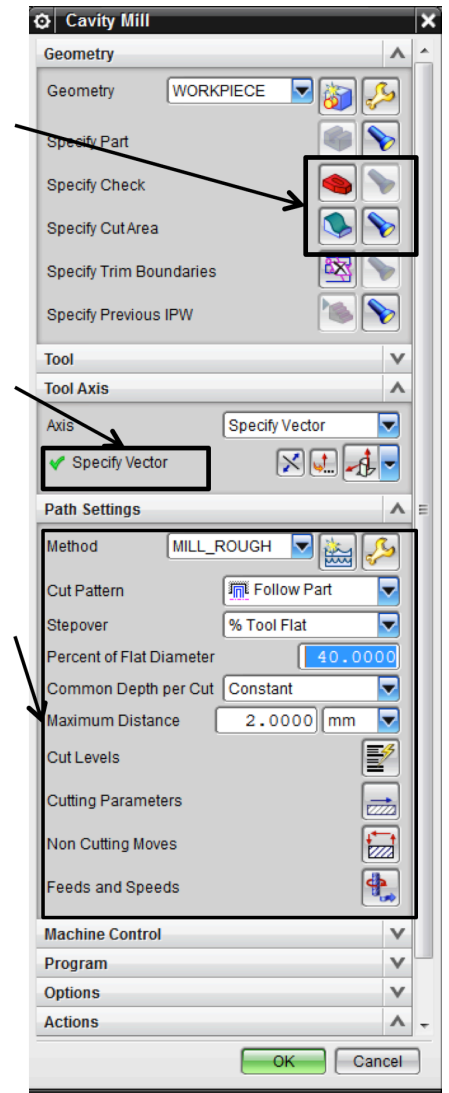
Obróbka składała się z 3 operacji. Pierwszą z nich była pięcioosiowa obróbka indeksowana. Polegała na zgrubnym zdjęciu materiału i pozostawieniu zarysu łopatk. Ścieżki zostały wygenerowane przy pomocy polecenia **CONTUR MILL**, służącego do programowania obróbki 3 osiowej. Indeksowanie osi zachodziło wskutek zmiany wektora narzędzia w operacji. Polecenie to bazuje na modelach gotowego elementu oraz półfabrykatu [5][6][1].



b) Definicja modelu oraz półfabrykatu

Definicja wektora osi Z

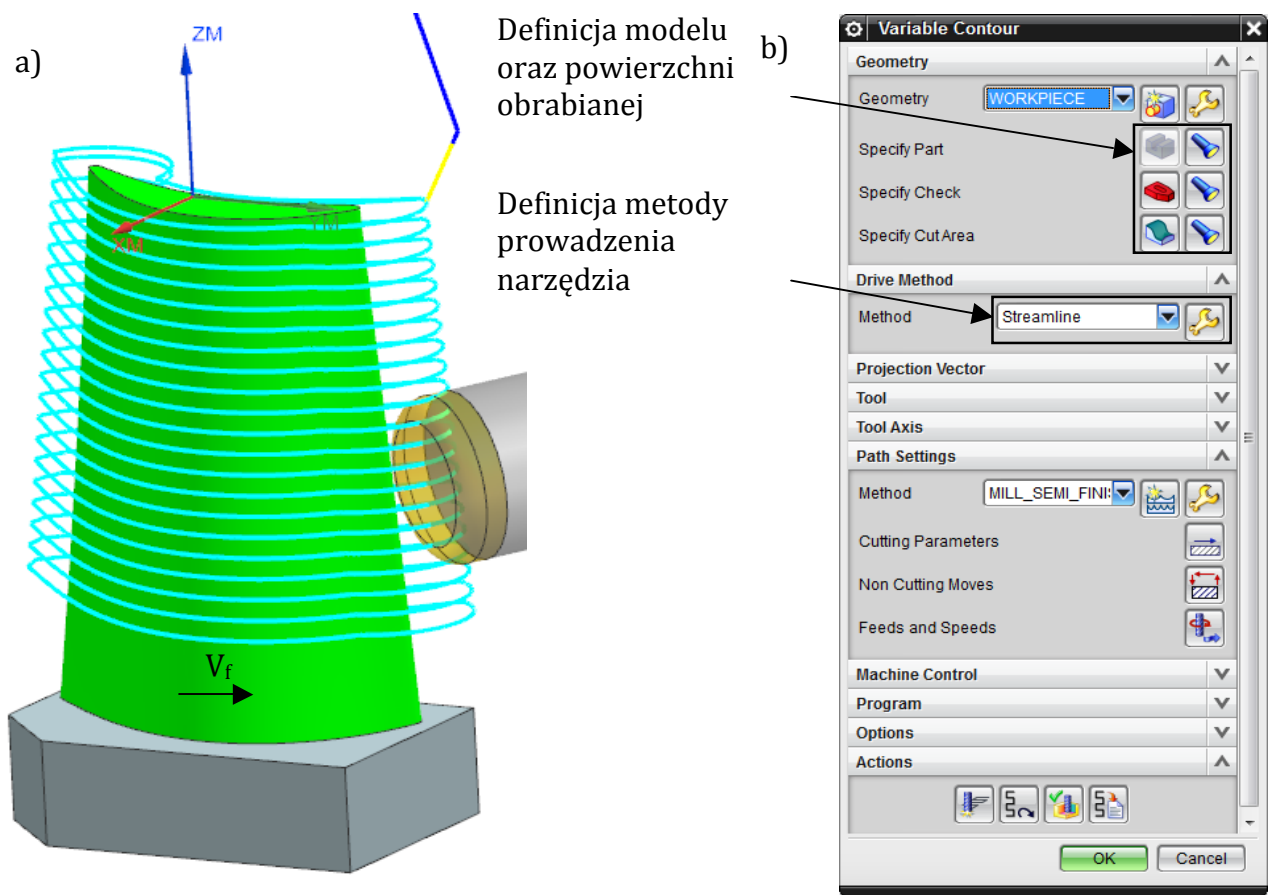
Definicja strategii obróbki oraz parametrów technologicznych



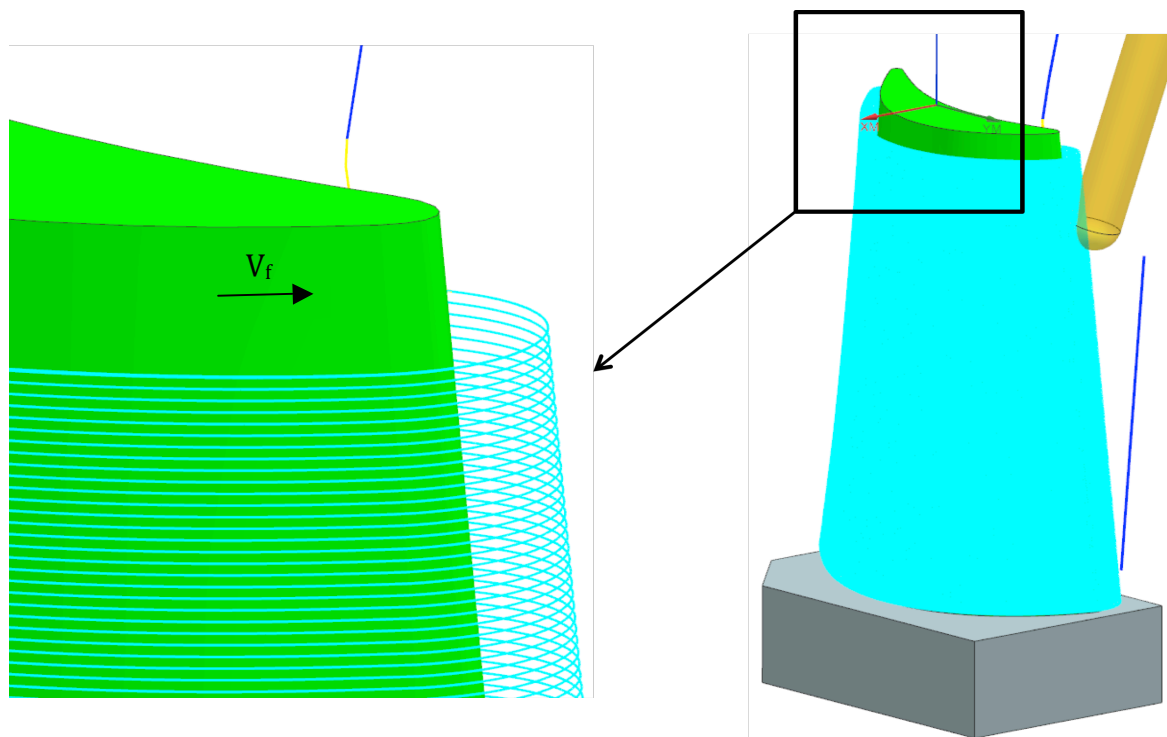
Rys. 4.1 a) Model utworzony na bazie pomiarów oraz zarys półfabrykatu (kolor pomarańczowy) b) Okno dialogowe operacji CAVITY MILL

Następnie przeprowadzono obróbkę półwykańczającą (Rys. 4.2a) mającą na celu wyrównanie nadlatku na piórze. Operacja ta była prowadzona symultanicznie w pięciu osiach. Do wygenerowania ścieżek wykorzystano polecenie **VARIABLE CONTUR**. Wymagało ono zdefiniowania modelu oraz powierzchni które mają być poddane obróbce. Następnym krokiem było określenie kierunku obróbki oraz definicja zagęszczenia ścieżek. Symulacja operacji odbywała się z wykorzystaniem IPW(model powstały podczas symulacji poprzedniej operacji) [6][1].

Ostatnią operacją była obróbka wykańczająca (Rys. 4.3). Również jak w przypadku poprzedniej operacji odbywała się ona symultanicznie w pięciu osiach. Definiowana była przy pomocy tego samego polecenia co obróbka półwykańczająca. Różnica polegała na zastosowaniu innego narzędzia, zmiany jego orientacji oraz zagęszczenia ścieżek. Również w tym przypadku symulacja obróbki przeprowadzona była z wykorzystaniem IPW [6][1].

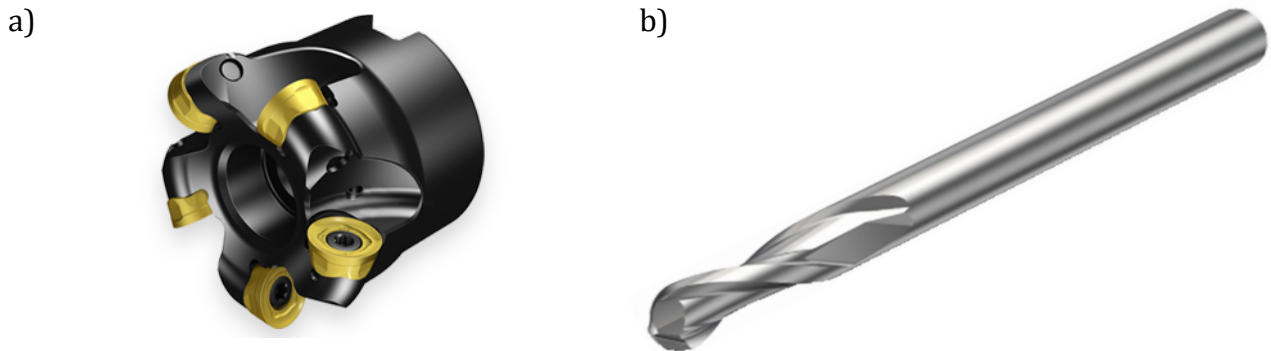


Rys. 4.2 a) Przebieg obróbki półwykończeniowej b) Okno dialogowe operacji CAVITY MILL



Rys. 4.3 Przebieg obróbki wykończeniowej (wysokie zagęszczenie ścieżek)

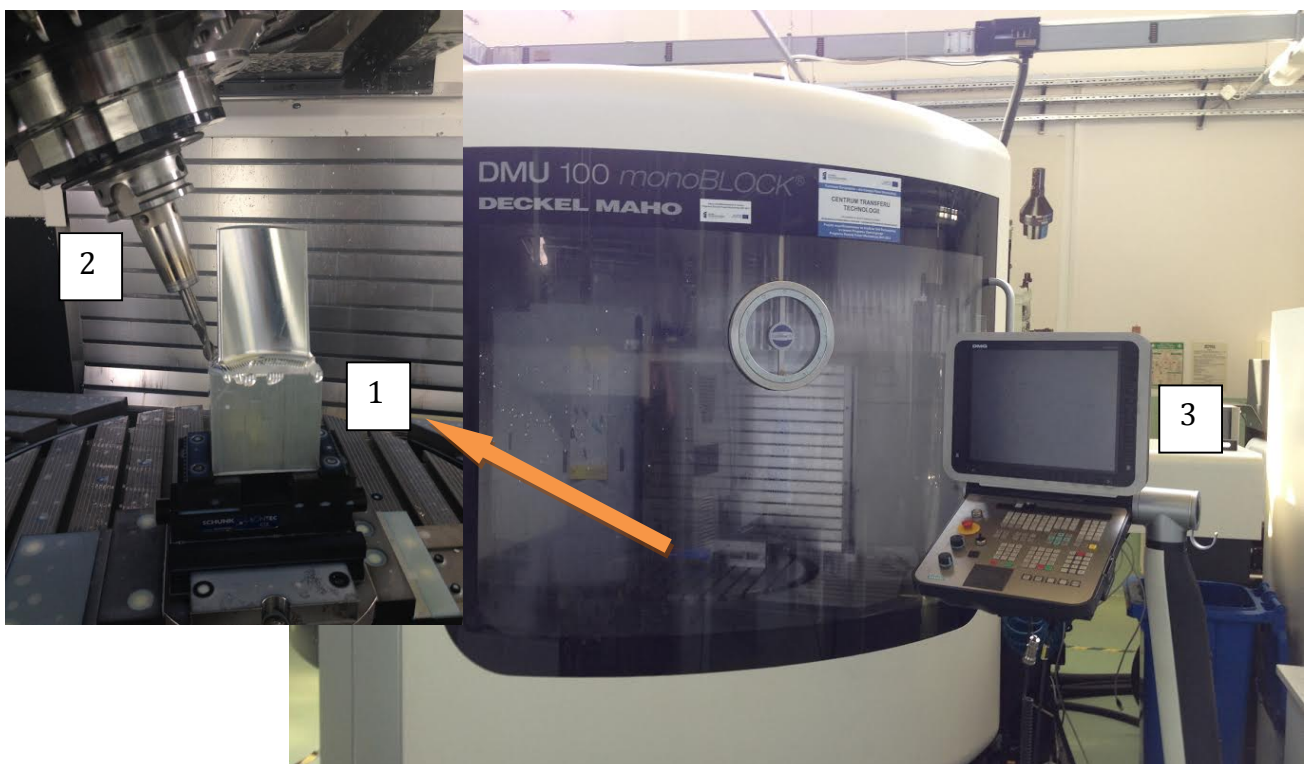
Do wykonania pióra wykorzystano dwa narzędzia. Obróbka zgrubna oraz półwykańczająca została wykonana składanym frezem torusowym SANDVIK typu COROMILL 600 o średnicy 32 mm. Do obróbki wykańczającej zastosowano monolityczny frez kulisty SANDVIK typu AK19A H10F o średnicy 10 mm. Parametry obróbkowe przedstawia tabela 4.1.



Rys. 4.4. a) Frez torusowy SANDVIK COROMILL 600 b) frez kulisty SANDVIK AK19A H10F

Tabela.4.1 Parametry technologiczne operacji obróbkowych

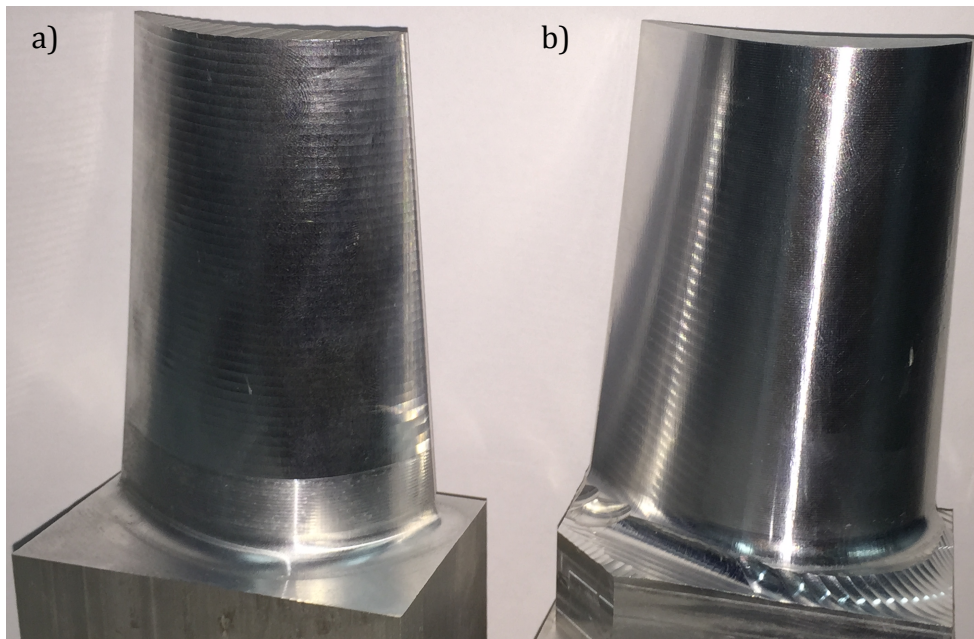
Rodzaj obróbki	Zgrubna	Kształująca	Wykańczająca
$v_c$ [m/min]	600	600	700
$v_f$ [mm/min]	2500	2500	3100
$a_p$ [mm]	2	0,5	0,3



Rys. 4.5. Pięciosiowe centrum obróbkowe DMU 100 monoBLOCK  
1) Przedmiot obrabiany 2) Narzędzie 3) Sterownik SINUMERIK 840D

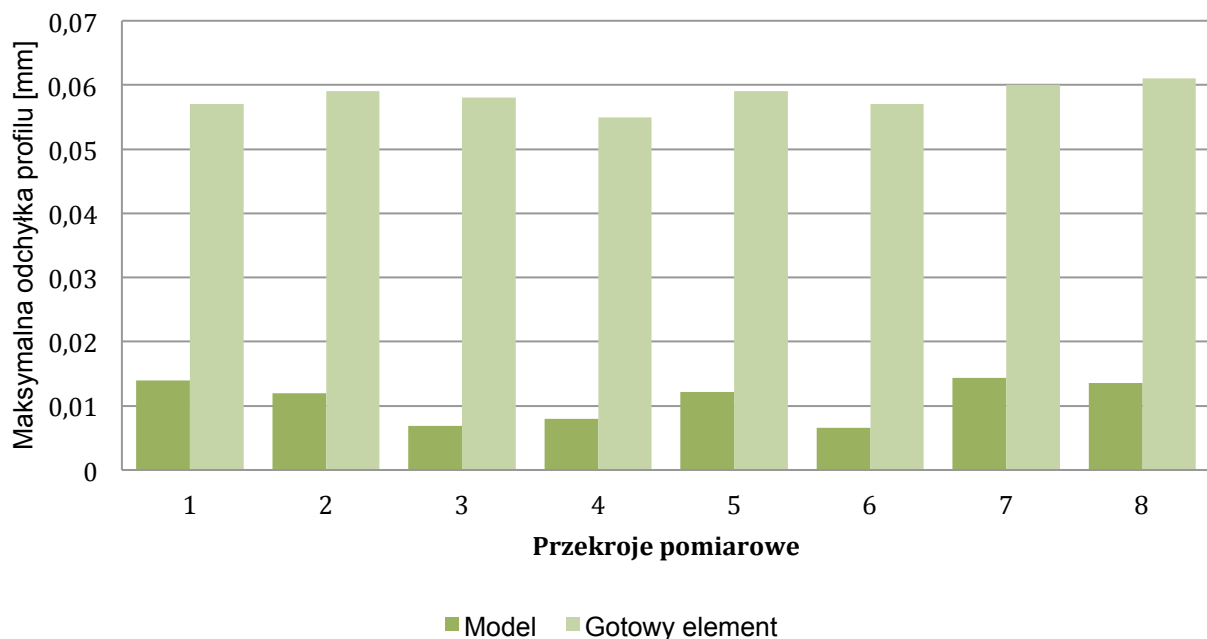


Po przygotowaniu programu element został wykonany na pięcioosiowym centrum obróbkowym DMG MONO BLOCK (Rys. 4.5) znajdującym się na Katedrze Technik Wytwarzania i Automatykacji Politechniki Rzeszowskiej. Obrabiarka pracuje w oparciu o sterownik SIEMENS 840D.



Rys. 4.5 a) Pióro referencyjne b) Kopia pióra

W celu weryfikacji dokładności wykonanej kopii ponownie przeprowadzono pomiary na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Wykorzystano osiem przekroji pomiarowych wzdłuż których zbierane były punkty. Poniższa tabela prezentuje maksymalną odchyłkę każdego z profili.



Rys 4.6 Maksymalna odchyłka zarysu profilu pióra łopatk

Analizując powyższy wykres widać, że odchyłki kształtują się podobnie na wszystkich profilach. Średnio wynoszą około 0,06 mm dla elementu rzeczywistego oraz 0,01 mm dla modelu. Łatwo zauważyć, że błędy modelowania są pięciokrotnie mniejsze niż odchyłki po obróbce. Różnice odchyłek między poszczególnymi profilami wynoszą około 10% dla elementu rzeczywistego oraz 40% dla modelu.

## 5. PODSUMOWANIE

Podsumowując całą rekonstrukcję trzeba zaznaczyć że błędy występują na wszystkich jej etapach. Odchyłki powstałe w wyniku modelowania są kilkakrotnie mniejsze niż te na etapie obróbki. Należy jednak pamiętać o tym że na błędy obróbkowe wpływa wiele czynników których działanie możemy ograniczyć. Natomiast błędy na etapie modelowania są nieodwracalne ponieważ w oparciu o model przygotowywane są wszystkie ścieżki obróbkowe.

## 6. LITERATURA

- [1] Augustyn K.: NX CAM. Programowanie ścieżek dla obrabiarek CNC, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2010
- [2] CALYPSO documentation *Dokumentacja programu*
- [3] Cygnar M., Budzik G.: Wybrane aspekty projektowania elementów wirujących maszyn przepływowych z wykorzystaniem wspomaganie komputerowego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Sączu, Nowy Sącz 2005.
- [4] Kiciak P. Podstawy modelowania krzywych i powierzchni: zastosowania w grafice komputerowej, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 2005
- [5] Marciniak K., Putz B., Wojciechowski J.: Obróbka powierzchni krzywoliniowych na frezarkach sterowanych numerycznie: podstawy geometryczne, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1988
- [6] NX 9.0 documentation *Dokumentacja programu*

*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.*