

Dr hab. inż. Jan BUREK, prof. PRz, e-mail: [jburek@prz.edu.pl](mailto:jburek@prz.edu.pl)

Mgr inż. Michał GDULA, e-mail: [gdulam@prz.edu.pl](mailto:gdulam@prz.edu.pl)

Mgr inż. Marcin PŁODZIENI, e-mail: [plodzien@prz.edu.pl](mailto:plodzien@prz.edu.pl)

Mgr inż. Karol ŻURAWSKI, e-mail: [zurawski@prz.edu.pl](mailto:zurawski@prz.edu.pl)

Mgr inż. Piotr ŻUREK, e-mail: [p\\_zurek@prz.edu.pl](mailto:p_zurek@prz.edu.pl)

Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa,  
Katedra Technik Wytwarzania i Automatyzacji

## POZYCJONOWANIE NARZĘDZI W OBRÓBCE PIĘCIOOSIOWEJ Z WYKORZYSTANIEM SYSTEMU CAM HYPERMILL

### Streszczenie:

W artykule przedstawiono i opisano strategie pozycjonowania narzędzi w obróbce pięcioosiowej. Pozycje narzędzi zostały określone za pomocą programowalnych pięcioosiowych parametrów kąta prowadzenia  $\alpha$  i/lub pochylenia  $\beta$ . Do tego celu wykorzystano system CAM HyperMILL. Analizowano pozycjonowanie frezu toroidalnego w obróbce łopatki turbiny oraz frezu stożkowego w obróbce wirnika. Stwierdzono, że pięcioosiowe parametry pozycjonowania narzędzi w programowaniu symultanicznej obróbki wieloosiowej skomplikowanych geometrycznie części odgrywają znaczącą rolę.

**Słowa kluczowe:** frezowanie wieloosiowe, frezowanie czołowe, frezowanie punktowe, frezowanie obwodowe, łopatka turbiny, wirnik

## POSITIONING OF TOOLS IN FIVE-AXIS MILLING USING CAM HYPERMILL SYSTEM

### Abstract:

In this article strategies of tool positioning in five-axis machining were presented and described. Positions of tools were set by means of programmable five axis parameter of lead angle  $\alpha$  and/or – tilt angle  $\beta$ . To achieve this goal system CAM HyperMILL was used. Toroidal mill positioning in machining of scoop and conical mill in impeller machining was analysed. It was confirmed that five-axis parameters of tool positioning in simultaneous multi-axial machining programming of complicated geometrical parts is essential.

**Key words:** multi-axis milling, five-axis face milling, point milling, flank milling, turbine blade, impeller

## 1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój współczesnego przemysłu lotniczego determinuje badania nad różnymi alternatywnymi technologiami wytwarzania. Pięcioosiowe frezowanie staje się bardziej konkurencyjne w stosunku do odlewania precyzyjnego. Dowodem takiego stanu rzeczy jest coraz częstsze implementowanie tej technologii do produkcji łopatek i wirników sprężarek oraz turbin silników lotniczych.

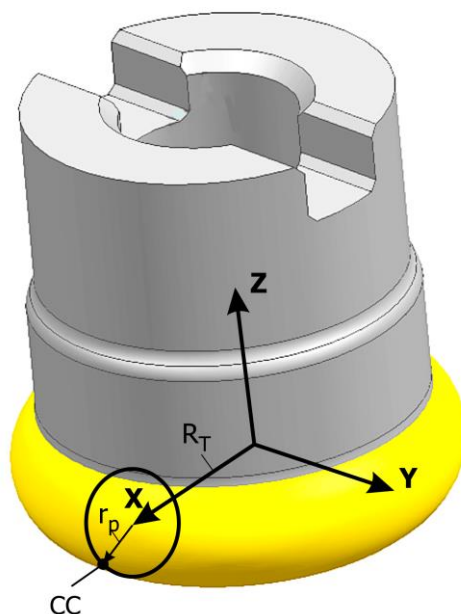
Symultaniczne frezowanie pięcioosiowe jest niezwykle złożonym procesem. Ze względu na skomplikowaną kinematykę na końcowy efekt wpływa wiele aspektów. Jednym z nich jest pozycjonowanie narzędzia względem obrabianego przedmiotu. Stosuje się je do jednoznacznego określenia pozycji w stosunku do obrabianej powierzchni. Głównym celem tej strategii jest usunięcie jak największej ilości nadmiaru z obrabianego przedmiotu bez uszkodzenia obrabianej powierzchni podczas przemieszczania się narzędzia pomiędzy kolejnymi jego pozycjami. Do pewnego stopnia strategia pozycjonowania zależy od geometrii narzędzia.

Określanie orientacji narzędzia odgrywa znaczącą rolę dla otrzymania założonej jakości oraz dokładności kształtowej obrabianych elementów. Obecnie prowadzi się szereg badań, które pozwolą na uzyskanie konkretnych zależności na chropowatość oraz sił skrawających. Wyniki w przyszłości pozwolą tworzyć moduły CAM tak sterujące pozycją, aby zwiększyć jakość wytwarzanych elementów.

## 2. POZYCJONOWANIE FREZU TOROIDALNEGO W OBRÓBCE PIÓRA ŁOPATKI TURBINY

### 2.1. Strategia pozycjonowania frezu toroidalnego

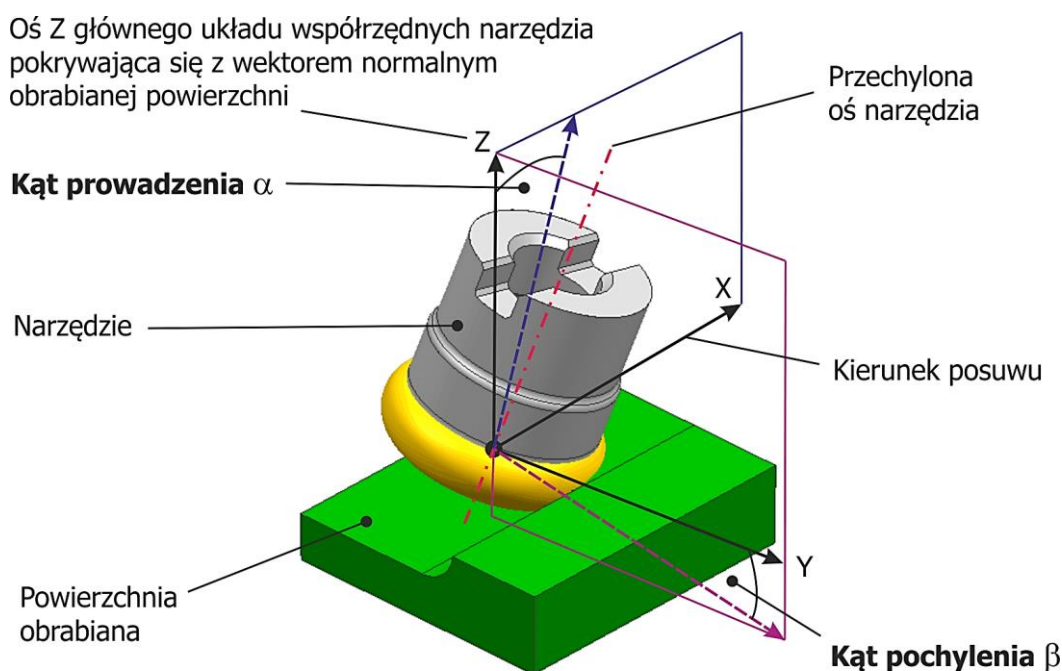
Geometrię frezu toroidalnego charakteryzuje się dwoma promieniami – promieniem płytki skrawającej  $r_p$  oraz odległością promieniową między osią frezu a środkiem płytki skrawającej  $R_T$  (rys. 1).



Rys. 1. Geometria frezu toroidalnego [1]

Toroidalną powierzchnię skrawającą w przypadku opisywanego narzędzia tworzą okrągłe płytki skrawające poprzez ich obrót wokół osi frezu. Stosowanie okrągłych płytek skrawających znacząco ogranicza powstawanie karbu, zatem polepsza się jakość i niezawodność obróbki. Ponadto określenie głębokości skrawania o wartości znacznie mniejszej od promienia płytki pozwala zmniejszyć grubość wiórów  $h_{ex}$  w odniesieniu do posuwu oraz zwiększyć długość krawędzi skrawającej. W rezultacie, w trakcie obróbki generowane są niższe temperatury, dlatego możliwe jest zwiększenie posuwu i prędkości skrawania w celu zwiększenia produktywności.

Pozycjonowanie osi narzędzia z określeniem kąta prowadzenia  $\alpha$  względem wektora normalnego powierzchni obrabianej jest obecnie jedną z głównych strategii stosowanych w programowaniu obróbki powierzchni swobodnych, co czyni ją także punktem odniesienia dla innych pięcioosiowych strategii pozycjonowania narzędzi [1, 4]. Powyższą metodę oferuje większość systemów CAM wyższego rzędu, a wśród nich m.in. CAM HyperMILL. Zasadę określania orientacji osi narzędzia w symultanicznym pięcioosiowym frezowaniu czołowym przedstawia rys. 2.

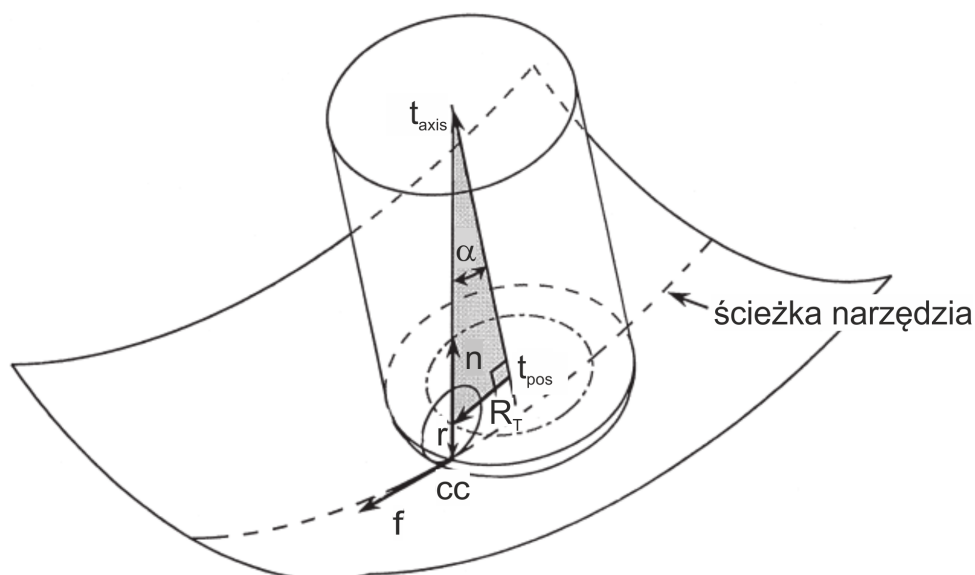


Rys. 2. Zasada określania orientacji osi narzędzia w symultanicznym pięcioosiowym frezowaniu czołowym [1]

Graficzne przedstawienie działania kąta prowadzenia  $\alpha$  obrazuje rys. 3. Oś narzędzia  $t_{axis}$  jest nachylona w kierunku posuwu o zdefiniowany kąt prowadzenia  $\alpha$  (w tym konkretnym przypadku kąt wyprzedzenia, biorąc jako punkt odniesienia wrzeciono obrabiarki). Pozycja narzędzia  $t_{pos}$  jest tak obliczana, że ostrze frezu pozostaje styczne w punkcie kontaktu  $cc$  z obrabianą powierzchnią [4].

Do celów dokonania dokładnej analizy strategii pozycjonowania frezu toroidalnego wprowadza się płaszczyznę zawierającą oś frezu  $t_{axis}$  oraz wektor posuwu  $f$  (rys. 4). Aby móc skorzystać z takiego układu geometrii układ współrzędnych musi zostać określony na krawędzi płytki skrawającej co opisuje równanie:

$$c = cc + m \quad (1)$$



Rys. 3. Strategia pozycjonowania frezu toroidalnego z określonym kątem  $\alpha$  [4]

Jedną z osi układu współrzędnych będzie wektor normalny powierzchni  $n$ . Pozostałe osie układu współrzędnych są prostopadłe do wektora normalnego  $n$  i leżą w utworzonej wcześniej płaszczyźnie [2]. Wektor  $r$  opisano równaniem poniżej:

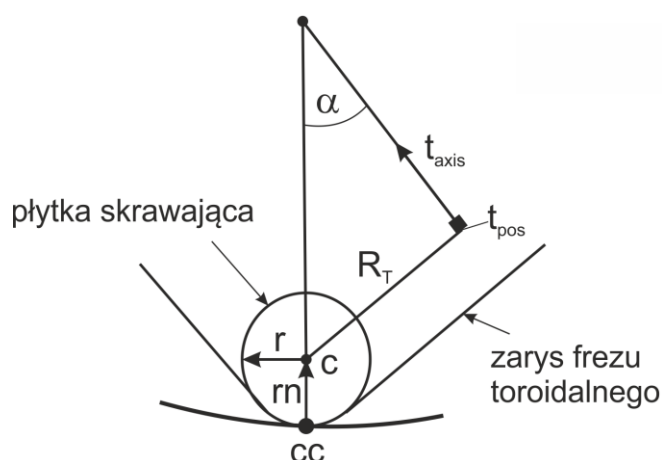
$$r = n \times (n \times f) \quad (2)$$

Pozycja osi narzędzia zostaje obliczona z wykorzystaniem równania (3):

$$t_{axis} = \cos(\alpha)n + \sin(\alpha)r \quad (3)$$

natomiast pozycja narzędzia zostaje obliczona z wykorzystaniem równania (4):

$$t_{pos} = c + R_T \sin(\alpha)n - R_T \cos(\alpha)r \quad (4)$$



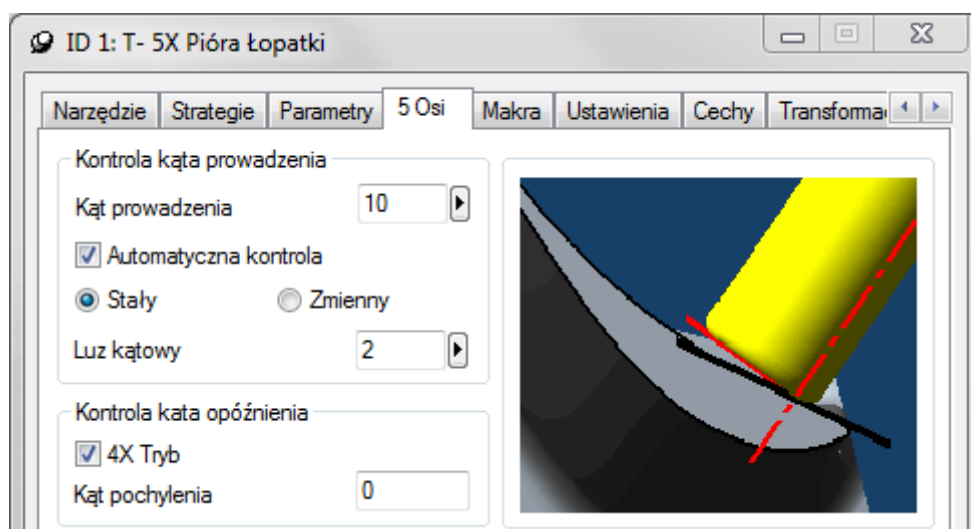
Rys. 4. Parametry stosowane w opisie matematycznym pozycji frezu toroidalnego [4]

Ścieżki narzędzia dla opisywanej strategii pozycjonowania są generowane poprzez obliczenie pozycji narzędzia i osi wrzeciona w punktach kontrolnych z wykorzystaniem równań (3) oraz (4) dla każdego punktu styku [2]. Przed określeniem orientacji osi narzędzia należy zdefiniować w powyższych równaniach kąt wyprzedzenia  $\alpha$ . Mała wartość kąta  $\alpha$  będzie generować w trakcie obróbki powstawanie dość dużej wartości parametru  $R_a$ . Optymalna wartość kąta wyprzedzenia dla frezu toroidalnego wynosi  $4^\circ$  [1].

## 2.2. Definiowanie pięcioosiowych parametrów pozycjonowania frezu toroidalnego w systemie CAM HyperMILL

Definiowanie pięcioosiowych parametrów pozycjonowania narzędzi dokonuje programista na etapie tworzenia danego typu operacji obróbki. Najczęściej określenie powyższych parametrów jest wymagane w symultanicznym pięcioosiowym frezowaniu kształującym oraz wykończeniowym pióra łopatki turbiny.

Na rys. 5. przedstawiono okno dialogowe, w którym użytkownik wprowadza wartości m.in. kąta prowadzenia  $\alpha$ .



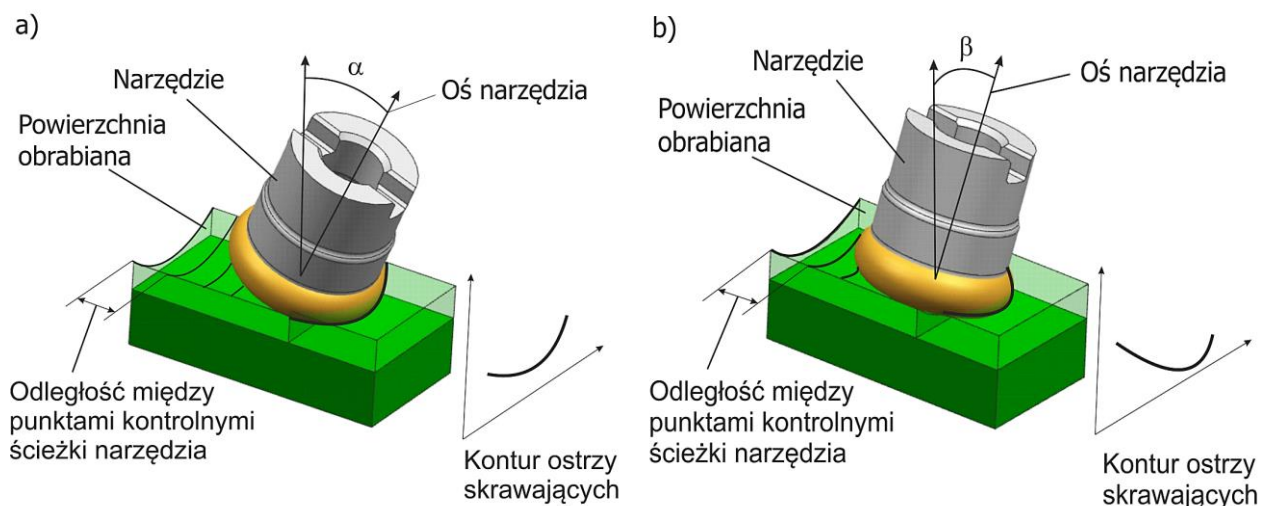
Rys. 5. Okno dialogowe definiowania pięcioosiowych parametrów pozycjonowania frezu toroidalnego dla operacji wykończeniowej pojedynczej łopatki

W oknie kontroli kąta prowadzenia wpisuje się wartość tego kąta. Pochylenie narzędzia realizowane jest w kierunku zdefiniowanego posuwu. Ustawienie wyższej wartości kąta prowadzenia spowoduje zachowanie większej odległości bezpiecznej w przypadku obróbki wklęsłej powierzchni łopatki, jednakże tym samym obniży się jakość obrabianej powierzchni [5].

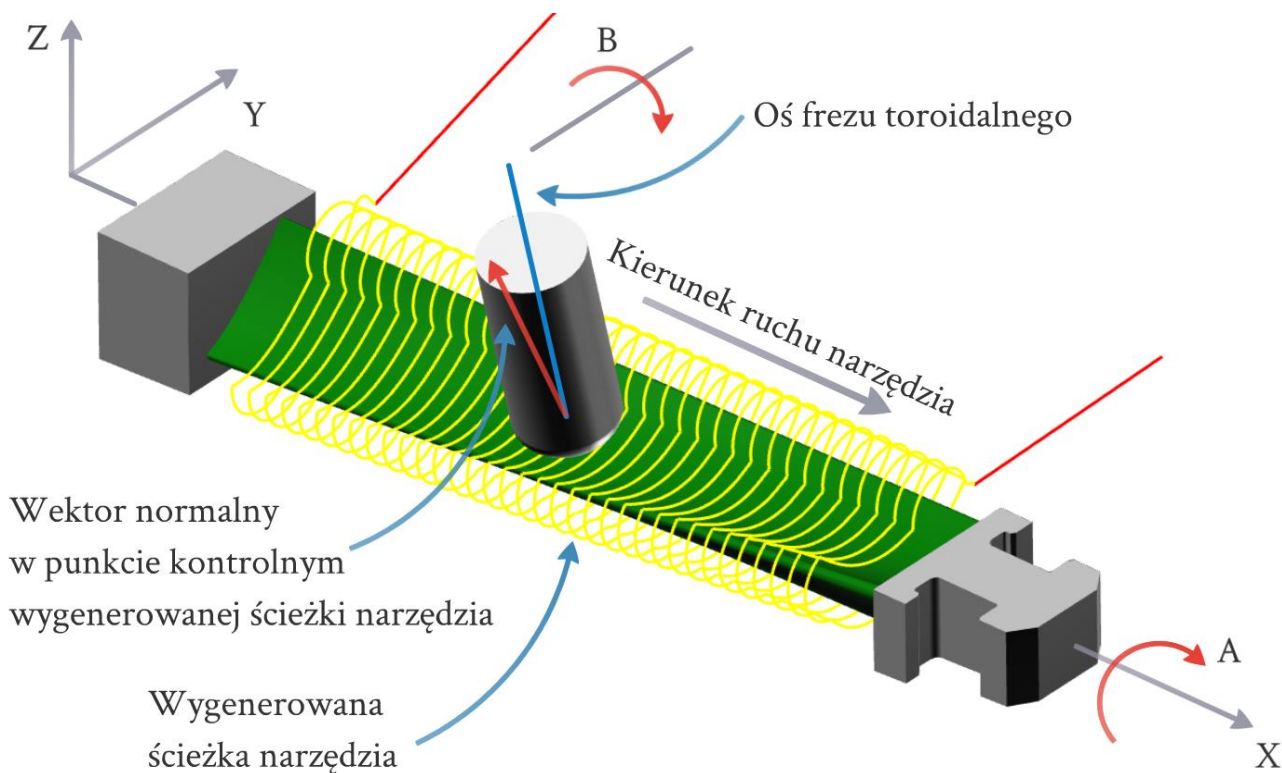
Automatyczna kontrola to opcja, która zapobiega wystąpieniu kolizji z tylnym zapadniętym obszarem pióra łopatki i automatycznie zwiększa określony kąt prowadzenia. W przypadku, gdy ta funkcja jest wyłączona, automatyczne obliczanie zwiększenia kąta prowadzenia się nie odbywa, natomiast, gdy funkcja jest włączona, programista ma możliwość dodatkowego określenia, czy ta kontrola ma przebiegać z wartością stałą czy zmienną. Włączona opcja „stały” powoduje, że system obliczy osobno dla każdej ścieżki kąt prowadzenia, który może być utrzymany na całej długości ścieżki. Włączona opcja „zmienny” powoduje to, że system będzie obliczał najlepsze dopasowanie narzędzia do powierzchni we wszystkich punktach kontrolnych ścieżki [5].

Opcja „luz kątowy” określa minimalny kąt, który ma być utrzymany między narzędziem a obrabianą powierzchnią [5].

W oknie kontroli kąta opóźnienia określa się dodatkowy kąt pochylenia  $\beta$ , który pozwala na utrzymanie pewnej odległości bezpiecznej od strony bocznej powierzchni łopatki, np. półki bandaża. Zazwyczaj kąt pochylenia przyjmuje wartość  $0^\circ$ , a jakkolwiek jego wartość wyższa od 0 powoduje pogorszenie jakości obrabianej powierzchni pióra łopatki [1]. Przykładowe teoretyczne kontury zarysu ostrzy skrawających frezu toroidalnego przy określonych kątach prowadzenia lub pochylenia przedstawia rys. 6, natomiast schematyczny obraz obróbki łopatki turbiny opisywaną strategią - rys. 7.



Rys. 6. Kontur ostrzy skrawających podczas obróbki przy określonym kącie: a) prowadzenia  $\alpha$ , b) pochylenia  $\beta$



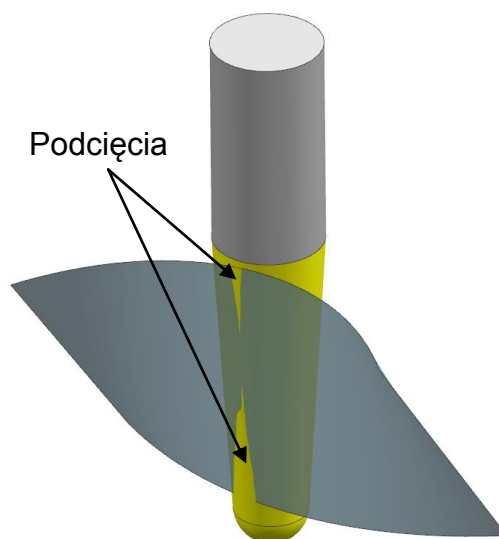
Rys. 7. Schemat obróbki strategią symultanicznego pięcioosiowego frezowania, zaprogramowaną w systemie CAM HyperMILL

### 3. POZYCJONOWANIE FREZU STOŻKOWEGO W OBRÓBCE WIRNIKA

#### 3.1. Strategia pozycjonowania frezu stożkowego

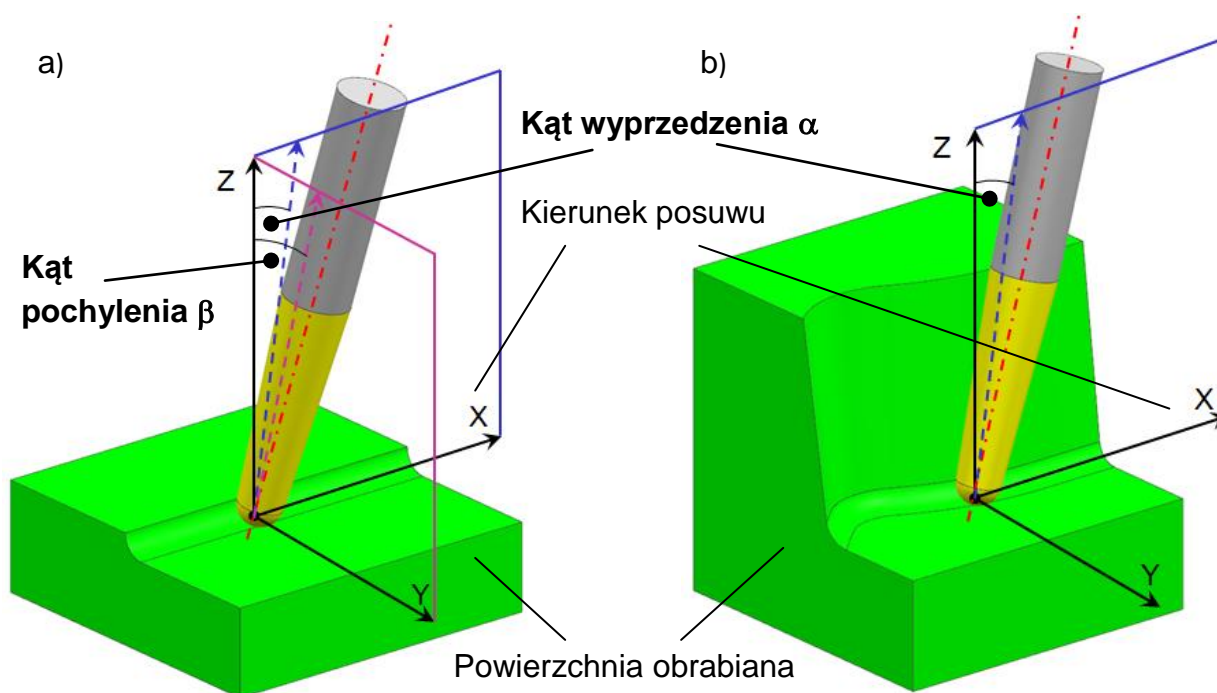
W przemyśle podstawową strategią obróbki wirników jest frezowanie punktowe, czyli tzw. wierszowanie. Polega ona na wykonaniu wielu płytkich przejść frezem kulistym, wokół obrabianej powierzchni. Metoda ta pozwala na wykonanie dowolnego kształtu powierzchni. Lecz by zachować dostateczną jakość powierzchni, należy minimalizować głębokość skrawania, co skutkuje wydłużeniem czasu obróbki [2].

Mniej powszechną metodą obróbki tego typu elementów jest pięcioosiowe frezowanie powierzchnią boczną narzędzia. Jak sama nazwa wskazuje, w tym procesie wykonywane jest wyłącznie jedno przejście, w którym powierzchnia boczna narzędzia prowadzona jest jak najbliżej do obrabianej powierzchni. Główną zaletą tej strategii jest znaczny krótszy czas obróbki w stosunku frezowania punktowego, przy zachowaniu zadowalającej jakości powierzchni. Natomiast podstawowym problemem w tej metodzie jest ustalanie optymalnej pozycji osi narzędzia, szczególnie przy obróbce powierzchni prostokreślnych nierozwijalnych oraz swobodnych, gdzie może dojść do miejscowych podcięć (rys. 8.). Spowodowane jest to niemożnością bezpośredniego odwzorowania tego typu powierzchni rzeczywistym frezem (średnicy większej od zera). W takich przypadkach stosuje się różne metody niwelowania powstającego błędu, które m. in. poprzez odpowiednie położenie kątowne oraz dosunięcie narzędzia do obrabianej powierzchni jest możliwe wykonanie takich powierzchni w zakresie wymaganej tolerancji [2, 3].



Rys. 8. Przykład powierzchni prostokreślniej z widocznymi podcięciami

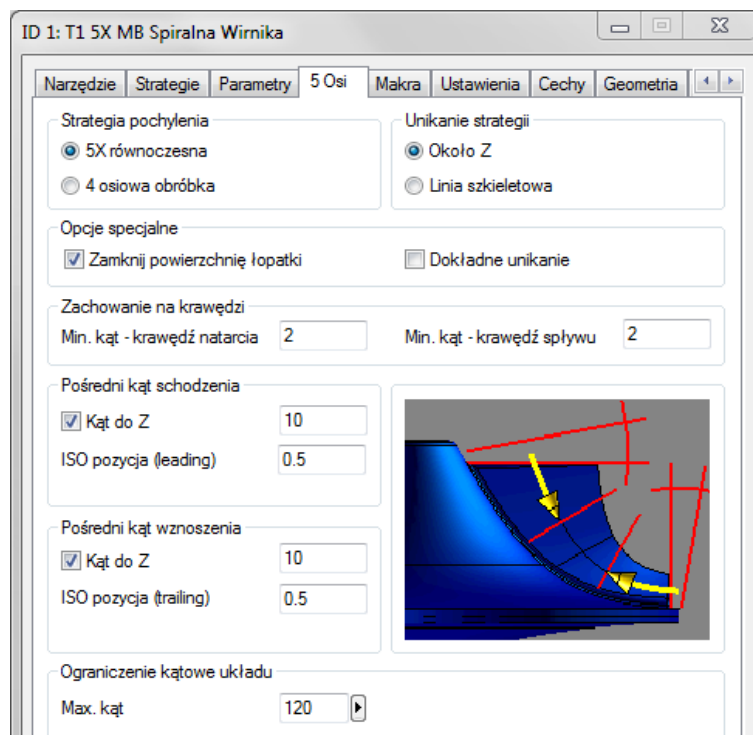
W obu powyższych przypadkach pozycjonowanie osi narzędzia odbywa się poprzez zdefiniowanie kąta prowadzenia  $\alpha$  oraz kąta pochylenia  $\beta$ . Metoda ta jest powszechnie wykorzystywana w zaawansowanych systemach CAM, takich jak HyperMILL. Na rys. 9 przedstawiono zasadę określania położenia osi narzędzia w symultanicznym pięcioosiowym frezowaniu punktowym oraz obwodowym frezem stożkowym.



Rys. 9. Zasada określania orientacji osi narzędzia w symultanicznym pięcioosiowym frezowaniu a) punktowym b) obwodowym

### 3.2. Definiowanie pięcioosiowych parametrów pozycjonowania frezu stożkowego w systemie CAM HyperMILL

Na rys. 10 przedstawiono okno dialogowe operacji wykończeniowej łopatki wirnika metodą punktową, w którym wprowadza się wartości kątów prowadzenia oraz pochylenia.



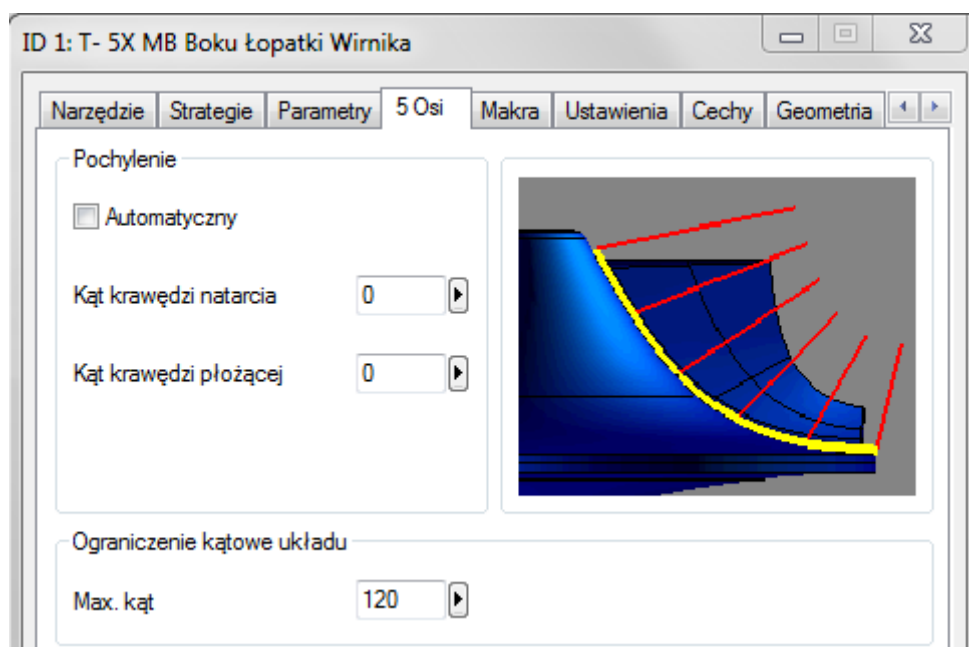
Rys. 10. Okno dialogowe definiowania pięcioosiowych parametrów pozycjonowania frezu stożkowego przy obróbce punktowej łopatki wirnika promieniowego



W oknie „Zachowanie na krawędzi” użytkownik wpisuje minimalną wartość kąta prowadzenia, jaki musi być zachowany, zarówno przy krawędzi natarcia, jak i spływu. W celu uzyskania jeszcze lepszej kontroli położenia narzędzia, system umożliwi wprowadzenie dodatkowych kątów kontrolnych. Wartości te znajdują się w oknach „Pośredni kąt” i definiuje się je osobno, zarówno dla ruchu w kierunku krawędzi natarcia oraz spływu. Kąt ten określany jest względem osi Z aktualnego układu współrzędnych. Opcja „ISO pozycja” ustala położenie kątów pośrednich wzdłuż linii izoparametrycznych obrabianej łopatki [3].

W przypadku tego polecenia kąt pochylenia określany jest automatycznie i uzależniony jest od wybranej strategii unikania. Przy wyborze opcji „Okolo Z” system realizuje odsunięcie głównie poprzez obrót wokół osi Z aktywnego układu współrzędnych. Natomiast wybór opcji „Linia szkieletowa” powoduje realizację odsunięć w kierunku wektora normalnego do linii szkieletowej łopatki [3].

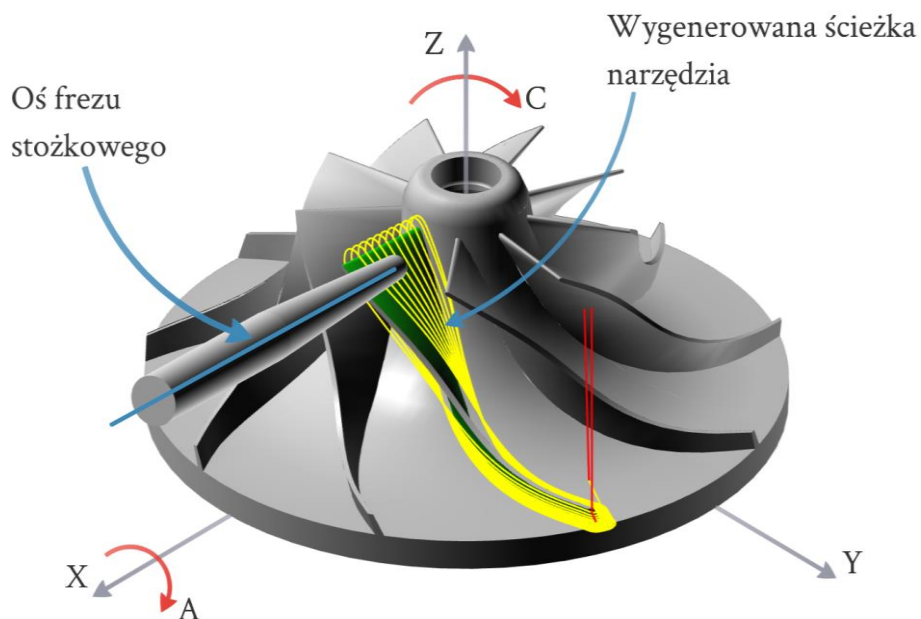
Na rys. 11 przedstawiono okno dialogowe operacji wykończeniowej łopatki wirnika metodą obwodową, w którym wprowadza się wartości kątów prowadzenia.



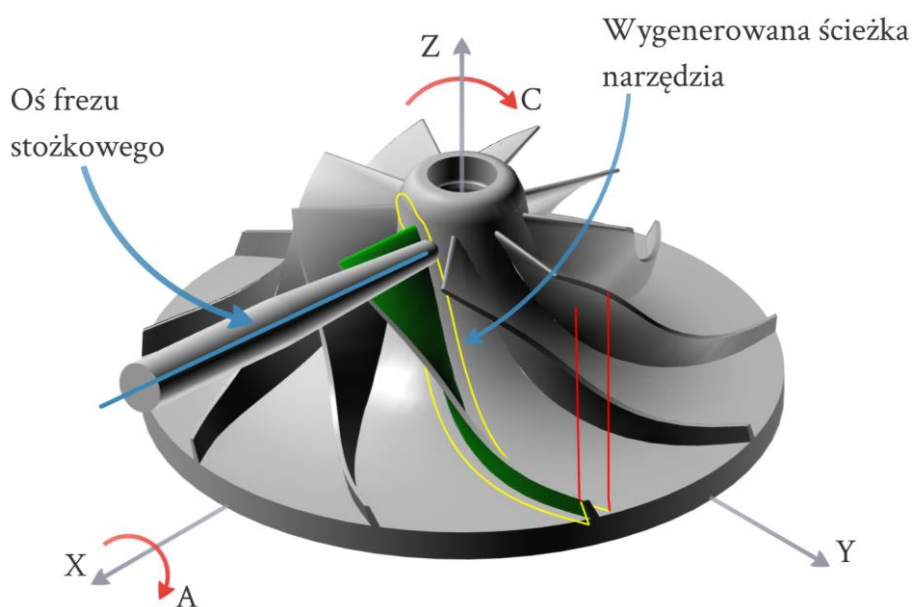
Rys. 11. Okno dialogowe definiowania pięcioosiowych parametrów pozycjonowania frezu stożkowego przy obróbce obwodowej łopatki wirnika promieniowego

W oknie „Pochylenie” użytkownik ma możliwość zdefiniowania wartości kątów prowadzenia przy krawędzi natarcia jak i spływu. Interpolacja kolejnych położen odbywa się pomiędzy obiema wartościami w stosunku do linii izoparametrycznych powierzchni łopatki. W przypadku zaznaczenia opcji „Automatyczny” system sam określi optymalne położenie narzędzia względem obrabianej powierzchni na podstawie linii izoparametrycznych powierzchni łopatki [3].

Przykładowy schemat obróbki wirnika promieniowego z wykorzystaniem powyższych operacji przedstawiono na rys. 12. i 13.



Rys. 12. Schemat operacji wykończeniowej metodą symultanicznego frezowania punktowego zaprogramowaną w systemie CAM HyperMILL



Rys. 13. Schemat operacji wykończeniowej metodą symultanicznego frezowania powierzchnią obwodową zaprogramowaną w systemie CAM HyperMILL

#### 4. PODSUMOWANIE

Pozycjonowanie narzędzia przy frezowaniu pięcioosiowym jest niezwykle istotne ze względu na złożony charakter procesu. Taki stan rzeczy determinuje zastosowanie zaawansowanych systemów CAM, które pozwalają na właściwe generowanie ścieżek obróbkowych. Ilość parametrów, jakie wchodzi w skład gotowego programu, daje duże możliwości w dziedzinie optymalizacji procesu obróbkowego. Dokładna analiza tych parametrów dla konkretnego przedmiotu obrabianego pozwala na znaczne zwiększenie jakości oraz wydajności procesu.

## 5. LITERATURA

- [1] Burek J., Gdula M., Płodzień M., Żyłka Ł.: Wpływ orientacji osi frezu toroidalnego w obróbce 5-osiowej na chropowatość powierzchni. VII Naukowa Konferencja Szkoły Obróbki Skrawaniem, Politechnika Poznańska, Mierzęcin 11-13 września 2013 r., s. 177-184/710 (Mechanik wydanie płytowe)
- [2] Burek J., Żurawski K., Płodzień M., Żurek P.: Analiza strategii symultanicznego pięcioosiowego frezowania powierzchnią boczną frezu stożkowego. VII Naukowa Konferencja Szkoły Obróbki Skrawaniem, Politechnika Poznańska, Mierzęcin 11-13 września 2013 r., s. 177-184/710 (Mechanik wydanie płytowe)
- [3] Jung-Jae L., Sunk-Hwan S.: Interference-Free Tool-Path Planning for Flank Milling of Twisted Ruled Surface. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998 Springer
- [4] Warkentin A., Ismail F., Bedi S.: Comparison between multi-point and other 5-axis tool positioning strategies. International Journal of Machine Tools and Manufacture 40 (2000), p. 185-208
- [5] Dokumentacja systemu CAM HyperMILL